

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

ARCHITETTURA

Ciclo XXX

**Settore Concorsuale:** 08/C1 - Design e Progettazione Tecnologica dell'Architettura

**Settore Scientifico Disciplinare** ICAR/10 Architettura Tecnica

TITOLO TESI

TECNICHE COSTRUTTIVE INNOVATIVE PER L'EDILIZIA  
SOSTENIBILE

**Presentata da:**

Davide Prati

---

**Coordinatore Dottorato**

Prof. Giovanni Leoni

---

**Supervisore**

Prof. Riccardo Gulli

---

**Esame finale anno 2018**



---

---

**TECNICHE COSTRUTTIVE  
INNOVATIVE PER  
L'EDILIZIA SOSTENIBILE**

---

---



# INDICE

## SINTESI 1

- A. ABSTRACT ITALIANO.....3
- B. ABSTRACT INGLESE .....5

## INTRODUZIONE 7

- I. AMBITO SCIENTIFICO-DISCIPLINARE .....9
- II. CAMPO DI INDAGINE.....13
- III. ISTANZE E OBIETTIVI DI RICERCA .....19
- IV. ATTIVITÀ DI RICERCA .....25
- V. RISULTATI ATTESI .....31

## PARTE 1 - PROFILI TEORICI 33

### PRINCIPI, CRITERI E MODELLI 35

#### 1\_\_ESIGENZE.....37

- 1.1 VERSO UNA NUOVA CULTURA DELL'ABITARE.....39
  - 1.1.1 POPOLAZIONE IN MOVIMENTO .....39
  - 1.1.2 I NUOVI MODELLI FAMILIARI .....41
  - 1.1.3 IL TEMA DELL'INDIVIDUALITA' .....43
- 1.2 FLESSIBILITA' .....44
  - 1.2.1 MODELLI .....45

1.3	TEMPORANEITA' .....	53
1.3.1	MODELLI .....	55
1.4	MODULARITA' E ASSEMBLABILITA' .....	61
1.4.1	MODELLI .....	62

## **2\_\_REQUISITI.....71**

2.1	COSTRUZIONE SOSTENIBILE.....	72
2.1.1	STRATEGIE .....	75
2.1.1.1	GESTIONE DEI PROCESSI .....	75
2.1.1.2	IMPATTO SUL SUOLO .....	78
2.1.1.3	MASSIVITA' .....	79
2.2	INDUSTRIALIZZAZIONE E PREFABBRICAZIONE .....	80
2.3	COSTRUZIONE A SECCO .....	85

## **PARTE 2 - SOLUZIONI APPLICATIVE 91**

### **SISTEMA "INTEGRO BS 400" 93**

#### **1 LA CASA BARACCATA.....95**

1.1	I PRECURSORI .....	95
1.2	L'ESEMPIO PORTOGHESE .....	99
1.3	LE ISTRUZIONI REALI DEL GOVERNO BORBONICO .....	101
1.4	LA DEFINIZIONE DEL LINGUAGGIO COSTRUTTIVO.....	104
1.5	COSTRUZIONI IN LEGNO NELLA CALABRIA DEL XIX SECOLO....	107
1.6	L'AVVENTO DEL XX SECOLO.....	108
1.7	CONSIDERAZIONI .....	111

#### **2 SVILUPPO DEL MODULO.....115**

2.1	CONCEPT.....	115
2.2	PRIMA EVOLUZIONE.....	119
2.3	SECONDA EVOLUZIONE.....	131

<b>3</b>	<b>IL SISTEMA STRUTTURALE INTEGRO BS 400 .....</b>	<b>143</b>
3.1	TELAIO PRINCIPALE LIGNEO.....	144
3.1.1	PILASTRI .....	144
3.1.2	TRAVI DI BORDO.....	146
3.1.3	TRAVI DI SPINA .....	147
3.1.4	TRAVETTI .....	147
3.2	SOLAI .....	149
3.2.1	CERCHIATURA DEI SOLAI .....	151
3.3	TAMPONAMENTO ARMATO A SECCO.....	153
3.3.1	IRRIGIDIMENTI E PRIMO TAVOLATO DI RIPARTIZIONE .....	153
3.3.2	TAMPONAMENTO .....	155
3.4	SISTEMA DI POST-COMPRESSIONE .....	158
3.5	COPERTURA .....	162
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA .....</b>	<b>169</b>
4.1	DESCRIZIONE QUALITATIVA DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE .....	169
4.1.1	VERIFICA DEL TELAIIO LIGNEO .....	172
4.1.1.1	MODELLAZIONE DELLA GEOMETRIA E VINCOLI.....	172
4.1.1.2	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E MODELLAZIONE DELLE SEZIONI .....	173
4.1.1.3	ASSEGNAZIONE DEI CARICHI .....	173
4.1.1.4	AZIONE SISMICA.....	178
4.1.1.5	SOLLECITAZIONI E SPOSTAMENTI .....	179
4.1.1.6	VALUTAZIONI SULLE VERIFICHE .....	181
4.1.2	SISTEMA DI TAMPONAMENTO COLLABORANTE .....	183
4.1.2.1	DETERMINAZIONE DELLO SFORZO DI POSTCOMPRESSIONE .....	183
4.1.2.2	VERIFICA ALL'AZIONE FUORI PIANO .....	186
4.1.3	VERIFICA DEL TELAIIO CON BIELLE COMPRESSE IN MURATURA .....	188
4.1.3.1	SOLLECITAZIONI E SPOSTAMENTI .....	188
4.1.3.2	VALUTAZIONI SULLE VERIFICHE .....	191

4.2	FINITURA DELLE SUPERFICI.....	193
4.2.1	PARETE VENTILATA ESTERNA .....	193
4.2.2	ANALISI TERMICA DELLA PARETE.....	202
4.3	PROGETTAZIONE PARAMETRICA .....	213
4.3.1	METODO COMPUTAZIONALE .....	214
4.3.1.1	GLI STRUMENTI UTILIZZATI .....	215
4.3.1.2	UNO STRUMENTO NEUTRALE.....	217
4.3.2	ALGORITMO PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI.....	218
4.3.2.1	L'ALGORITMO .....	220
4.3.2.2	OUTPUT: I POLIMINI.....	223
4.3.2.3	CONDIZIONI DI SCELTA: IL RAPPORTO S/V .....	227
4.3.3	ALGORITMO PER L'ADATTABILITA' FUNZIONALE.....	229
4.3.3.1	QUADRO NORMATIVO .....	230
4.3.3.2	L'ALGORITMO .....	237
4.3.3.3	OUTPUT: GENERAZIONE OTTIMIZZATA DELLE UNITA' ABITATIVE .....	239
4.3.4	ALGORITMO PER LA COMPATIBILITA' TIPOLOGICA.....	243
4.3.4.1	L'ALGORITMO .....	247
4.3.4.2	OUTPUT: SCHEMI TIPOLOGICI DI RIFERIMENTO .....	247
4.3.5	CONSIDERAZIONI FINALI .....	249
4.4	CANTIERIZZAZIONE.....	250
4.4.1	TELAIO PRINCIPALE LIGNEO.....	251
4.4.2	COPERTURA .....	264
4.4.3	PARETE A SECCO .....	270
4.4.4	ANALISI DEI TEMPI DI REALIZZAZIONE.....	273
4.5	ESPERIENZE DI PROTOTIPAZIONE .....	280
4.5.1	MODELLINO PRELIMINARE IN SCALA 1:10.....	280
4.5.2	REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO IN SCALA 1:2 .....	283
4.5.3	MODELLO FINALE IN SCALA 1:5.....	290

## SOLAIO “INTEGRO FS PRFV”

297

1	SOLAI IN LEGNO.....	299
---	---------------------	-----

1.1	MODELLI TIPOLOGICO-COSTRUTTIVI .....	299
1.2	METODI TRADIZIONALI DI CONSOLIDAMENTO .....	307
1.2.1	SOLAIO CONSOLIDATO CON SOLETTA IN C.A.....	309
1.2.2	SOLAIO CONSOLIDATO CON PROFILI SOTTILI IN ACCIAIO ....	312
1.2.3	SOLAIO CONSOLIDATO CON FRP (FIBER REINFORCED POLYMER) 313	
1.3	PANORAMICA DELLE SOLUZIONI COMMERCIALI.....	314
1.3.1	SOLAIO COMPOUND DELLA COPERLEGNO .....	315
1.3.2	SOLAIO LATERCOMPOUND DELLA COPERLEGNO.....	317
1.3.3	SOLAIO SOLECO DI PICASISTEMI.....	318
1.3.4	SOLAIO ARMORAPIDO DELLA ECOSISM.....	320
1.3.5	SOLAIO STEP DELLA FERRAMATI .....	321
1.3.6	SOLAIO NEW CLASSIC PLASTBAU DELLA DE.COM .....	322
1.3.7	SOLAIO SVELTO DELLA FERRACIN GROUP .....	324
1.3.8	SOLAIO IN GRC DEL GRUPPOCENTRONORD.....	325
1.3.9	SOLAIO EMMAFLOOR DELLA EDYL COMPOSITES TECHNOLOGY .....	327
<b>2</b>	<b>PANNELLO SANDWICH.....</b>	<b>331</b>
2.1	ESPERIENZE PRECEDENTI .....	331
2.2	IPTESI PROGETTUALE .....	342
2.2.1	PANNELLI DI LEGNO MULTISTRATO .....	343
2.2.2	IL GRIGLIATO STAMPATO IN PRFV .....	345
2.2.2.1	PROPRIETÀ DEI COMPONENTI .....	346
2.2.2.2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	348
2.2.2.3	GRIGLIATO STAMPATO SCH38/38 DC (MM GRIGLIATI) .....	350
2.2.3	SISTEMA DI INCOLLAGGIO.....	354
2.2.3.1	IPN (INTERPENETRATED POLYMER NETWORK) .....	356
2.2.3.2	RESINA EPOSSIDICA RC02 .....	357
2.2.3.3	RESINA EPOSSIDICA BIRE SIN .....	358
2.2.3.4	ADESIVO A BASE DI POLIURETANO SIKAFLEX.....	359
<b>3</b>	<b>ATTIVITA' DI LABORATORIO .....</b>	<b>361</b>

3.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	361
3.1.1	PROVA DI CARICO A QUATTRO COLTELLI.....	361
3.1.2	ESTENSIMETRI .....	364
3.1.3	TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO .....	368
3.1.4	DIGITAL IMAGE CORRELATION .....	369
3.1.5	INSTALLAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE.....	372
3.1.6	ILLUMINAZIONE.....	373
3.1.7	CALIBRAZIONE DELLE CAMERE.....	374
3.1.8	PATTERN.....	375
3.1.9	VERIFICA DEL SISTEMA DIC .....	377
3.2	I FASE DI SPERIMENTAZIONE.....	380
3.2.1	CONFEZIONAMENTO PROVINI.....	380
3.2.2	RACCOLTA DATI.....	388
3.2.3	CONFRONTO PROVE .....	389
3.3	II FASE DI SPERIMENTAZIONE .....	397
3.3.1	CONFEZIONAMENTO PROVINI.....	398
3.3.2	RACCOLTA DATI.....	405
3.3.3	CONFRONTO PROVE .....	406
3.3.4	CONFRONTO PROVE CON I FASE DI SPERIMENTAZIONE .....	412
3.4	III FASE DI SPERIMENTAZIONE.....	415
3.4.1	CONFEZIONAMENTO PROVINI.....	417
3.4.2	RACCOLTA DATI.....	428
<b>4</b>	<b>ANALISI DEI DATI .....</b>	<b>431</b>
4.1	OSSERVAZIONI PRELIMINARI .....	431
4.2	ELABORAZIONE E CONFRONTO DEI DATI SPERIMENTALI .....	433
4.2.1	CONFRONTO PROVE CON SEZIONE SIMMETRICA.....	433
4.2.2	CONFRONTO PROVE CON SEZIONE SIMMETRICA PRECEDENTI.....	443
4.2.3	CONFRONTO PROVE CON SEZIONE ASIMMETRICA .....	447
4.2.4	CONFRONTO PROVINI CON BATTENTATURA .....	454
4.3	VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA DELL'IMPALCATO .....	457
4.3.1	CALCOLO DELLE RIGIDEZZE REALI .....	457

4.3.2	CALCOLO DEI MOMENTI DI INERZIA .....	461
4.3.3	CALCOLO DEL MODULO ELASTICO DEL GRIGLIATO EG .....	464
4.3.4	CALCOLO DELLE RIGIDEZZE E DELLE FRECCE TEORICHE ...	465
4.3.5	CONSIDERAZIONI NORMATIVE.....	469
4.3.6	VERIFICA A FLESSIONE DELL'IMPALCATO .....	475
4.4	SOLUZIONE PROGETTUALE.....	484
4.4.1	SCELTE PROGETTUALI .....	485
4.4.2	STRATIGRAFIA DI COMPLETAMENTO.....	487
4.4.2.1	ISOLANTE ACUSTICO MASSIVO .....	488
4.4.2.2	ISOLANTE TERMICO .....	489
4.4.2.3	ISOLANTE AL RUMORE DA CALPESTIO.....	489
4.4.2.4	SOTTOPAVIMENTO.....	490
4.4.2.5	SISTEMA TERMORIFLETTENTE.....	491
4.4.2.6	SISTEMA ATTIVO SCALDANTE ELETTRICO .....	492
4.4.2.7	SISTEMA TERMODIFFONDENTE .....	493
4.4.2.8	PAVIMENTAZIONE .....	494
4.4.3	ANALISI TERMICA DEL SOLAIO .....	495
4.4.4	APPLICAZIONI .....	498
4.4.4.1	COLLEGAMENTI.....	498
4.4.4.2	NUOVE COSTRUZIONI .....	501
4.4.4.3	RECUPERO DELL'ESISTENTE.....	505

## CONCLUSIONI 509

I.	ESITI FINALI.....	511
II.	SVILUPPI FUTURI.....	516

## APPENDICE 519

A.	PROGETTAZIONE PARAMETRICA.....	521
A.1	SCHEDE PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI .....	521
A.1.1	RISULTATI PRIMA ITERAZIONE .....	522

A.1.2	RISULTATI SECONDA ITERAZIONE .....	523
A.1.3	RISULTATI TERZA ITERAZIONE .....	524
A.1.4	RISULTATI QUARTA ITERAZIONE .....	525
A.1.5	RISULTATI QUINTA ITERAZIONE.....	526
A.1.6	RISULTATI SESTA ITERAZIONE.....	528
A.1.7	RISULTATI SETTIMA ITERAZIONE.....	531
A.2	SCHEDE PER L'ADATTABILITA' FUNZIONALE .....	540
A.2.1	SCHEDE MONOLOCALE A - 1 SOLUZIONE.....	541
A.2.2	SCHEDE BILOCALE AA - 2 SOLUZIONI .....	542
A.2.3	SCHEDE TRILOCALE AAB - 5 SOLUZIONI .....	544
A.2.4	SCHEDE QUADRILOCALE AAA - 5 SOLUZIONI.....	549
A.2.5	SCHEDE PLURILOCALE AABB - 1 SOLUZIONE .....	554
A.2.6	SCHEDE PLURILOCALE AAAA - 1 SOLUZIONE.....	555
A.2.7	SCHEDE PLURILOCALE AABBB - 4 SOLUZIONI.....	556
<b>B.</b>	<b>TEST DI LABORATORIO.....</b>	<b>560</b>
B.1	PRIMA FASE DI SPERIMENTAZIONE .....	560
B.1.1	SCHEDE PROVINO I.1.....	560
B.1.2	SCHEDE PROVINO I.2 .....	565
B.1.3	SCHEDE PROVINO I.3 .....	570
B.1.4	SCHEDE PROVINO I.4 .....	573
B.1.5	SCHEDE PROVINO I.5 .....	578
B.1.6	SCHEDE PROVINO I.6.....	583
B.1.7	SCHEDE PROVINO I.7 .....	587
B.1.8	SCHEDE PROVINO I.8.....	592
B.1.9	SCHEDE PROVINO I.9 .....	597
B.1.10	SCHEDE PROVINO I.10.....	602
B.2	SECONDA FASE DI SPERIMENTAZIONE.....	608
B.2.1	SCHEDE PROVINO II.1.....	608
B.2.2	SCHEDE PROVINO II.2.....	610
B.2.3	SCHEDE PROVINO II.3.....	613
B.2.4	SCHEDE PROVINO II.4.....	616
B.2.5	SCHEDE PROVINO II.5.....	619

B.2.6 SCHEDE PROVINO II.6.....	621
B.2.7 SCHEDE PROVINO II.7.....	624
B.2.8 SCHEDE PROVINO II.8.....	627
B.2.9 SCHEDE PROVINO II.9.....	630
B.2.10 SCHEDE PROVINO II.10.....	632
B.2.11 SCHEDE PROVINO II.11.....	635
B.2.12 SCHEDE PROVINO II.12.....	638
B.3 TERZA FASE DI SPERIMENTAZIONE.....	641
B.3.1 SCHEDE PROVINO III.1 .....	641
B.3.2 SCHEDE PROVINO III.2 .....	643
B.3.3 SCHEDE PROVINO III.3 .....	645
B.3.4 SCHEDE PROVINO III.4 .....	647
B.3.5 SCHEDE PROVINO III.5 .....	649
B.3.6 SCHEDE PROVINO III.6 .....	651
B.3.7 SCHEDE PROVINO III.7 .....	653
B.3.8 SCHEDE PROVINO III.8 .....	655
B.3.9 SCHEDE PROVINO III.9 .....	656
B.3.10 SCHEDE PROVINO III.10 .....	659
B.3.11 SCHEDE PROVINO III.11 .....	661
B.3.12 SCHEDE PROVINO III.12 .....	663
B.3.13 SCHEDE PROVINO III.13 .....	665
B.3.14 SCHEDE PROVINO III.14 .....	667
B.3.15 SCHEDE PROVINO III.15 .....	669
B.3.16 SCHEDE PROVINO III.16 .....	670
B.3.17 SCHEDE PROVINO III.17 .....	672
B.3.18 SCHEDE PROVINO III.18 .....	674
B.3.19 SCHEDE PROVINO III.19 .....	676
B.3.20 SCHEDE PROVINO III.20 .....	678
B.3.21 SCHEDE PROVINO III.20 .....	681

**INDICE DELLE TABELLE**

**709**

**BIBLIOGRAFIA**

**RINGRAZIAMENTI**

# SINTESI



## A. ABSTRACT ITALIANO

Il primario obiettivo di questa ricerca è definire a livello progettuale e attraverso la prototipazione in scala nuove tecniche costruttive a secco per l'edilizia di qualità a basso costo, basate su tecniche costruttive storiche, attualizzate in una concezione moderna ed innovativa dell'arte del costruire. Sistemi versatili e adattabili a diverse situazioni progettuali, per edifici di nuova realizzazione, potenzialmente utili anche per lo sviluppo di tecniche e componenti per il recupero di edifici esistenti, nonché dotati di alte prestazioni in contesti sismici. I criteri fondamentali sono quelli della bioclimatica e dell'edilizia sostenibile, con particolare attenzione alle prestazioni energetiche, all'innovazione dal punto di vista dei materiali utilizzati e dei processi di realizzazione.

Seppur divisa concettualmente in fasi distinte, la ricerca si è svolta, dato il suo carattere prettamente applicativo, in un continuo alternarsi ed intersecarsi di fasi conoscitive, progettuali, sperimentali che hanno costituito il feedback necessario ad avanzare e risolvere le problematiche riscontrate.

In una prima fase si sono indagati diversi aspetti legati alle caratteristiche intrinseche dei sistemi costruttivi oggetto di ricerca. Si sono dunque trattati i temi dell'edilizia a basso costo, della sostenibilità dei processi, della sostenibilità economica. Ampio spazio è stato dedicato, inoltre, alle tematiche che ruotano attorno all'edilizia prefabbricata, ovvero che riguardano i caratteri e le condizioni delle architetture realizzate a secco, progettate in modo da essere potenzialmente 'smontabili' e quindi caratterizzate dal paradigma della reversibilità.

La seconda parte della ricerca si è incentrata sullo sviluppo e messa a punto, attraverso diverse fasi evolutive, del sistema costruttivo denominato INTEGRO BS 400: un organismo strutturale costituito da un telaio ligneo puntiforme di passo 400 cm, controventato da tamponamenti massivi in laterizio assemblati senza l'utilizzo di malte, a cui si conferisce coesione attraverso un sistema di post-compressione realizzato mediante tiranti in acciaio. È stato così definito un modulo base, facilmente replicabile e aggregabile, che permette di realizzare edifici residenziali articolati, di rapida realizzazione e adattabili nel tempo alle mutate esigenze degli utenti.

La terza fase ha visto lo sviluppo di un sistema di orizzontamento denominato INTEGRO FS, atto a svolgere le funzioni di impalcato sia all'interno del sistema costruttivo oggetto di ricerca, sia in interventi sul patrimonio edilizio esistente. Il sistema studiato vuole apportare un miglioramento tecnologico-costruttivo nel rispetto delle normative vigenti ed individuare come carattere fondante la reversibilità della soluzione tecnica proposta, la leggerezza dei materiali e la rigidità nel piano. Si tratta di un pannello sandwich costituito da un'anima realizzata con un grigliato stampato in resina

poliestere rinforzato con un'unica orditura di fibre di vetro, accoppiato a due pannelli multistrato in legno disposti rispettivamente all'intradosso e all'estradosso. Per la solidarizzazione dei grigliati in PRFV con i pannelli in legno sono stati valutati diversi sistemi di incollaggio, realizzati attraverso diversi adesivi, in alcuni casi coadiuvati dalla interposizione di una rete in fibra di vetro.

In una quarta fase si è svolta la fondamentale verifica delle possibilità applicative delle nuove tecniche elaborate, attraverso la sperimentazione costruttiva e l'analisi prestazionale dei prototipi. Per quanto concerne il sistema parete sono stati realizzati in un primo momento modelli virtuali tridimensionali e modelli in scala ridotta per verificare operativamente le prime ipotesi progettuali. In un secondo momento, una volta definite meglio le componenti dell'intero sistema, è stato realizzato un modello in scala 1:2 della soluzione intermedia. Dell'ultima ipotesi progettuale, è stato invece realizzato un modello della soluzione d'angolo in scala 1:5. Questa attività, pur non cimentandosi con prototipi in scala 1:1, ha consentito di mettere in luce diverse problematiche inerenti la fattibilità tecnica delle ipotesi progettuali tradotte in forma costruita. L'analisi delle criticità emerse ha quindi consentito di formulare proposte correttive e migliorare progressivamente la definizione del sistema proposto.

Per quanto riguarda l'impalcato sandwich è stato invece possibile programmare e portare a termine una serie di campagne di test in laboratorio finalizzate alla comprensione delle caratteristiche di resistenza e rigidità dell'oggetto di indagine. Sono state eseguite in tutto tre sessioni di test, realizzate con modalità ripetibili e confrontabili, riuscendo ad indagare le caratteristiche apportate al sistema da diversi tipi di collanti. Durante i test è stata anche valutata la possibilità di una ottimizzazione della sezione resistente facendo variare la posizione dei componenti del pannello sandwich. È stata inoltre verificata l'importanza dell'utilizzo del grigliato stampato in PRFV come core strutturale dell'intero sistema effettuando alcuni test in cui questo elemento è stato sostituito da un materiale meno performante (XPS).

In linea con le indagini scientifiche finora condotte dall'ambito disciplinare dell'Architettura Tecnica (ICAR/10) del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna, questo progetto di ricerca ha contribuito allo sviluppo di strumenti innovativi utilizzabili sia nelle nuove costruzioni sia negli interventi di recupero dell'edilizia recente, proponendo processi e metodi validi per la progettazione, nell'ottica di un'architettura ecosostenibile. Avvalendosi inoltre della collaborazione di aziende esterne, questa ricerca attua ed implementa quelle sinergie al giorno d'oggi sempre più ricercate all'interno dell'Università di Bologna, volte a garantire un rapporto più stretto fra la teoria e la pratica del costruire.

## B. ABSTRACT INGLESE

The primary objective of this research is to define, at design level and through scale modeling, new dry construction techniques for low-cost building, recovering historic constructive techniques, updated in a modern and innovative concept of building art. Versatile systems, adaptable to different design situations, in new constructions, potentially useful in developing techniques and components for existing buildings refurbishment, as well as provided with high performance in seismic contexts. The fundamental criteria are bioclimatic and sustainable construction, with particular attention to energy performance, innovation concerning materials and implementation processes.

Even if conceptually divided into distinct stages, research was carried out, given its purely applicative character, in continuous alternation and intersection of cognitive, design, experimental phases that provided the feedback needed to progress and solve problems encountered.

In the first stage, several aspects related to intrinsic features of constructive systems in question have been investigated. So issues of low-cost building, processes and economic sustainability were addressed. Large space has been devoted to themes revolving around prefabricated building industry, relating features and conditions of dry construction architecture, designed to be potentially “decomposable” and therefore characterized by the paradigm of reversibility.

The second part of the research focused on developing and fine tuning, through various evolution phases, the building system called INTEGRO BS 400: a structural organism consisting of a 400 cm span wood frame structure, filled with a massive bracing brick wall assembled without using mortar, to which cohesion is given through a post-compression system made of steel tie rods. A basic module was thus defined, easily replicable and aggregable, designed to create articulated, fast-realization residential buildings that can be tailored to users’ needs, changing over time.

The third phase saw the development of the floor system called INTEGRO FS, able to perform floors functions both within the building system object of research and in interventions on existing buildings. The system at issue wants to bring about a technological-constructive improvement in compliance with current regulations and identify as fundamental characters reversibility of the proposed technical solution, materials lightness and stiffness in the plane. This is a sandwich panel consisting of a core made of a grating printed in polyester resin, reinforced with a single frame of glass fibres, coupled with wood multilayer panels both at the intrados and at the extrados. To couple GFRP gratings and wooden panels several gluing systems have been evaluated, made with different adhesives, in some cases improved by the interposition of a fiberglass mesh.

In the fourth phase, the fundamental verification of application possibilities of these new techniques developed was carried out through constructive experimentation and prototypes performance analysis. Concerning the wall system, three-dimensional virtual models and small-scale models were first implemented to test operationally the first design hypotheses. Later, once the components of the entire system were defined, a 1:2 scale model of the intermediate solution was made. Finally, a 1:5 scale model of the latest design version was built, representing the corner solution. This activity, though not challenging with prototypes in 1:1 scale, allowed highlighting various problems concerning technical feasibility of design hypotheses translated into built form. The analysis of emerging problems has therefore allowed making corrective proposals and gradually improving the proposed system definition.

As regards the sandwich panel, it was possible to schedule and complete a series of laboratory test campaigns aimed at understanding strength and stiffness characteristics of the survey object. Three test sessions were performed, carried out with reproducible and comparable modes, investigating features added to the system by using different adhesives. During the tests was also evaluated the possibility of optimizing the cross section by varying sandwich panel components position. Furthermore, the importance of using GFRP grating as entire system structural core has been verified by performing some tests where this item has been replaced by a less performing material (XPS).

In line with the scientific investigations conducted so far in the disciplinary field of Technical Architecture (ICAR / 10) of the Architecture Department in the University of Bologna, this research project contributed to the development of innovative tools that can be used both in new constructions and in recent building renovation, providing processes and methods valid for design, with the goal of an eco-sustainable architecture. With the collaboration of external companies, this research puts into effect and implements those increasingly sought-after synergies within the University of Bologna, aimed at ensuring a closer relationship between the theory and the practice of building.

---

# INTRODUZIONE



## I. AMBITO SCIENTIFICO-DISCIPLINARE

Il progetto di ricerca si svolge nell'ambito disciplinare di Architettura Tecnica (ICAR/10), afferente al Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna.

In continuità col percorso formativo svolto durante il Corso di Studi in Ingegneria Edile ma soprattutto per dare seguito alla attività svolta in qualità di Assegnista di Ricerca presso il CIRI – Edilizia e Costruzioni<sup>1</sup>, unità operativa “*Tecnologie innovative applicate al restauro, recupero e riqualificazione del patrimonio costruito - Formazione e restauro dei materiali*”, il candidato prosegue la sua formazione universitaria cercando di approfondire le tematiche inerenti la progettazione di nuovi sistemi costruttivi. Avendo avuto modo di seguire in prima persona la progettazione e la realizzazione di un primo prototipo di impalcato realizzato mediante l'accoppiamento di un grigliato stampato in PRFV e due pannelli di legno, la volontà è stata quella di approfondire l'elemento in oggetto e, al contempo, di contestualizzarlo all'interno di un sistema costruttivo.

Questa esperienza precedente, svolta all'interno del laboratorio LISG<sup>2</sup> (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica) afferente al DICAM, ha permesso al candidato di impostare un percorso di ricerca che presentasse caratteri di originalità e concretezza, con un focus rivolto sia all'analisi teorica e alla progettazione sia alla conseguente realizzazione pratica e verifica prestazionale.

Parte essenziale di questo nuovo percorso di ricerca è stata infatti lo svolgimento di ulteriori prove di laboratorio per definire la bontà degli assunti teorici. La fase di prototipazione e di testing, infatti, è il momento in cui si svolge la verifica ultima dell'appropriatezza delle scelte compiute e dove i diversi linguaggi che confluiscono nella definizione del processo progettuale ritrovano uno spazio comune di dialogo e confronto. Affinché si compia questo passaggio, è necessario acquisire e promuovere una conoscenza non solo tecnica, ma anche pratica, dei processi costruttivi.

Le competenze del laboratorio LISG includono una vasta gamma di aspetti del controllo sperimentale, sia delle costruzioni nuove, sia di quelle di carattere storico e monumentale. Tra questi, la determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali, il controllo di qualità, lo studio del comportamento meccanico di modelli ed elementi strutturali in campo statico e dinamico, il controllo non distruttivo e il monitoraggio delle strutture. La disponibilità degli spazi e la collaborazione dei tecnici ha reso possibile la realizzazione dei modelli costruttivi studiati e la loro verifica strutturale, mediante lo svolgimento di misurazioni e prove di carico.

Il problema della fattibilità costruttiva dei sistemi sviluppati ha parimenti trovato pieno supporto all'interno delle strutture del dipartimento di architettura, nell'ottica di un maggiore avvicinamento della ricerca teorica al sapere costruttivo.

Per i modelli in scala ridotta ci si è avvalsi degli spazi e degli strumenti disponibili all'interno del laboratorio Silab Fabbricazione sito in via Saragozza 8. La struttura si occupa di modellazione e fabbricazione di componenti di progetto ed è stata istituita nel 2010. Dispone di strumentazione per lavorazioni meccaniche di tipo "leggero" e "pesante" nonché di macchine speciali e per la prototipazione 3D che possono consentire la possibilità di fabbricare, fino alla dimensione reale, oggetti autoprodotti e coerenti con le varie fasi di progetto

Prefigurare fisicamente il progetto, verificandone coerenza e consistenza, consente di indagarne e monitorarne le performance acquisendo, contemporaneamente, una significativa sensibilità di controllo materico tramite un flusso di informazioni di tipo "file-to-fabrication". Questo consente di utilizzare modalità progettuali di tipo induttivo, unisce il "saper fare" alla conoscenza tecnico-scientifica, e le affianca ad esperienze formative complesse.

Per le esperienze di prototipazione ci si è avvalsi degli spazi del laboratorio LeDo (Learning by Doing) sito in viale del Risorgimento 2. Si tratta di un laboratorio didattico gestito sinergicamente dal DA e dal DICAM che trae ispirazione dalla attività svolta in questi anni presso i Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau<sup>3</sup>, condotta in collaborazione con alcune Scuole di Ingegneria e Architettura francesi. Questo specifico settore della conoscenza è infatti connotato da una relazione diretta tra la Tecnica e le Forme che non può prescindere dall'indagine sulla fattibilità costruttiva, essendo questa ancora condizionata dall'impiego di processi e metodi di natura materiale e a forte vocazione artigianale.

Oltre ad operare all'interno dello stimolante ambiente dei laboratori universitari, il candidato ha avuto modo di confrontarsi con diverse realtà produttive esterne. Oltre al supporto materiale in termini di fornitura dei materiali, il rapporto con aziende del settore delle costruzioni ha contribuito all'acquisizione di specifici know-how maggiormente legati ad aspetti produttivi e commerciali che, in alcuni casi, vengono ignorati dall'ambiente accademico.

Ad esempio, il coinvolgimento diretto dell'azienda MM<sup>4</sup> di Udine, che opera da quarant'anni nel settore della vetroresina PRFV (plastici rinforzati con fibre di vetro), producendo grigliati, profili e strutture composite di elevata qualità, è risultato essenziale allo sviluppo dell'attività di ricerca. I grigliati e le strutture in vetroresina della MM vengono realizzati secondo tecnologie originali e brevettate, basate principalmente sullo stampo ad iniezione e sulla pultrusione. I grigliati stampati in PRFV sono realizzati, infatti, mediante la tecnologia RTM (Resin Transfer Moulding) che consente la distribuzione continua della fibra di vetro, anche ortogonalmente, e risulta molto importante ai fini dell'aumento della resistenza meccanica del manufatto. Inoltre, le proprietà intrinseche della

vetroresina PRFV (tra cui la resistenza alla corrosione, la amagneticità, l'isolamento elettrico e l'assenza di manutenzione) consentono un'elevata flessibilità di impiego.

La proposta formulata all'interno del progetto di ricerca di utilizzare un prodotto già commercializzato dalla ditta, in un contesto diverso dal suo comune utilizzo, ha notevolmente interessato la dirigenza che ha supportato le attività svolte attraverso la fornitura del materiale.

Il carattere eminentemente pratico e costruttivo del percorso di ricerca ha necessariamente coinvolto anche altre aziende. Prima fra tutte la Ardea Progetti e Sistemi<sup>5</sup>, nata nel 1993, che è una società altamente specializzata in progettazione di materiali compositi e nella produzione di tecnologie in FRP finalizzate al consolidamento ed al restauro strutturale in edilizia. Ardea ha messo a punto e perfezionato i sistemi di incollaggio con marchio commerciale Betontex, ora afferenti al marchio FibreNet<sup>6</sup>, che possono contare su diverse tecnologie brevettate che li presentano all'avanguardia nel settore.

Ulteriore supporto nel campo dei sistemi di incollaggio è stato trovato in Sika Italia<sup>7</sup> multinazionale del settore delle costruzioni la cui divisione sealing & bonding ha fornito supporto e consulenza per l'adozione di soluzioni di incollaggio elastico di categoria superiore.

La rete di relazioni con diverse imprese del settore delle costruzioni è divenuta, ai fini del percorso di ricerca, un valore aggiunto di esperienza nell'ottica della cosiddetta "*terza missione*" che, accanto ai due obiettivi fondamentali della formazione e della ricerca, l'Università vuole perseguire. L'intento cioè di favorire l'applicazione diretta, la valorizzazione e l'impiego della conoscenza per contribuire allo sviluppo sociale, culturale ed economico della società intesa nell'accezione primaria di trasferimento tecnologico.

<sup>1</sup> Il Centro Interdipartimentale per la ricerca Industriale (CIRI) Edilizia e Costruzioni fa parte della rete di strutture per la ricerca e l'innovazione della regione Emilia Romagna dedicate alla ricerca industriale ed al trasferimento tecnologico.

<sup>2</sup> Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica – LISG Via Terracini, 28 40131 - Bologna

<sup>3</sup> Siti a Villefontaine presso Lione, i Grands Ateliers sono una piattaforma scientifica, tecnologica ed educativa. Consentono agli studenti architetti e ingegneri di progettare e realizzare, nell'ambito di moduli educativi integrati nel loro curriculum, prototipi di edifici, per lo più su scala 1. Questa pedagogia implementa un vero mix culturale che associa, quando possibile, architettura, arte, design, ingegneria, scienze sociali e mondo industriale. I Grands Ateliers mirano anche a sviluppare la ricerca francese in architettura e diffondere ampiamente la cultura scientifica, tecnica e industriale intorno all'edilizia eco-compatibile e la città sostenibile.

<sup>4</sup> M.M. s.r.l. Via Antonio Zanussi 300/302 - Z.I.U. 33100 UDINE ITALIA. La M.M. S.r.l. di Udine nasce nell'anno 1977 a partire dall'iniziativa imprenditoriale di Ruggero Montagnese e Giorgio Morandini, i quali, approfittando dell'esperienza maturata anteriormente nel settore della vetroresina, hanno sviluppato una conoscenza propria e originale nella produzione di grigliati in vetroresina o PRFV.

<sup>5</sup> Ardea Progetti e Sistemi. Via E. Cristoni 58 Loc. La Meridiana - 40033 Casalecchio di Reno (BO) - Italy

<sup>6</sup> Fibre Net S.r.l. a socio unico Via Jacopo Stellini, 3 - Z.I.U. 33050 Pavia di Udine (Ud) ITALY

<sup>7</sup> Sede legale e operativa - Via Luigi Einaudi, 6 20068 Peschiera Borromeo (MI)

## II. CAMPO DI INDAGINE

Questo lavoro di ricerca fonda le sue radici nell'eterogeneo e incerto confine tra teoria e pratica del costruire. Tale collocazione indica l'originalità e il carattere sperimentale dello studio. Questo campo di indagine, al confine con le scienze esatte, le scienze empiriche e le scienze umane, non è una disciplina codificata, dotata di un proprio corpus omogeneo di teorie e di metodi.

La pratica del costruire, come noto, è stata fino al XVIII secolo esclusivamente tramandata oralmente tra le maestranze in ragione dell'”*arcanum magisterium*”. Attraverso la consegna del silenzio venivano custodite le regole della geometria e dell'arte del taglio delle pietre per la costruzione delle volte e di tutto ciò che costituiva il bagaglio intellettuale del costruttore medievale. Il vincolo della segretezza non impediva certo l'osservazione e quindi l'acquisizione di nuove conoscenze. Solo a partire dal XVIII secolo, con lo sviluppo e l'ampliamento delle tecniche costruttive, si osserva una disarticolazione dello studio della costruzione, non più interamente compreso nell'architettura, fra molteplici discipline <sup>1</sup>.

L'eterogeneità si manifesta compiutamente relegando l'aspetto statico quale argomento della scienza, con lo sviluppo della meccanica e con le sperimentazioni sulla resistenza dei materiali, ponendo l'aspetto tecnologico al centro dell'ingegneria strutturale e vincolando indissolubilmente l'aspetto storico alla storia dell'architettura e al restauro dei monumenti.

Gli aspetti strutturale, architettonico e tecnologico vengono di conseguenza trattati in ambienti caratterizzati da filosofie della cultura diverse e spesso contrapposte. Si è spesso assistito, e ancora oggi si percepisce, un forte scollamento fra una ingegneria strutturale sempre più basata sulla teorizzazione matematica, una tecnologia che ha sposato le strategie scientifiche dell'industrializzazione e una storia dell'architettura che resta ancorata allo schema logico della indipendenza della struttura nell'impianto costruttivo.

Da questa inconciliabilità sono derivate ampie lacune nella conoscenza della evoluzione dei modi di costruire, particolarmente in merito ai caratteri evolutivi della costruzione muraria in epoca moderna e sulla contemporanea genesi dei nuovi sistemi costruttivi in cemento armato.

Affrontare un tema di ricerca complesso e per natura eterogeneo come il recupero e la riproposizione di tecniche costruttive storiche attualizzate per una concezione innovativa, soprattutto nel contesto contemporaneo ricco di problematiche normative e prestazionali di cui tenere conto, prefigurerebbe l'istituzione di un progetto di ricerca interdisciplinare in cui ciascuna competenza venisse rappresentata da un singolo ricercatore.

Si è scelto invece di affrontare questo percorso ricerca cercando, per quanto possibile, di integrare i diversi strumenti che il percorso formativo di un ingegnere edile contempla. Un percorso formativo che non rinuncia agli strumenti della critica e della interpretazione della cultura storica e architettonica moderna ma che sia pronto a riesumare strumenti conoscitivi del passato come la lettura dell'opera esemplare considerata come testo; la classificazione, la selezione e la riorganizzazione delle buone pratiche come metodo verso la conoscenza e soprattutto il l'attività di laboratorio, che dà modo di conoscere una pratica attraverso la sua appropriazione materiale <sup>2</sup>.

Un esempio di questo approccio si riscontra chiaramente nelle attività dei primi professionisti formati dalla Scuola di Applicazioni per gli ingegneri, fondata a Bologna nel 1877. L'opera di Silvio Canevazzi <sup>3</sup> ad esempio mostra come la formulazione matematica del problema strutturale sia conseguente all'intenzione di dare fondamento scientifico ad un sapere non ancora codificato mediante l'impiego del modello. Si vuole descrivere una realtà che si è già manifestata, come un atto che segue, non precede, la pratica del costruire. Nei testi di Canevazzi, ad una prima fase di indagine, dedicata alla descrizione delle caratteristiche meccaniche del nuovo materiale e delle metodologie di calcolo semplificate per l'impiego da parte dei professionisti e costruttori, segue una evoluzione dell'indagine scientifica sempre più indirizzata ad affinare le procedure di calcolo sulla scorta dei modelli eseguiti presso i laboratori sperimentali, a cui le Scuole di Applicazione italiane affidano il compito di registrare e validare gli avanzamenti scientifici.

Questo corpus teorico sarà la base dei successivi sviluppi della teoria del cemento armato in Italia, con il metodo alle tensioni ammissibili di Odone Belluzzi <sup>4</sup> che è rimasto sostanzialmente immutato fino all'introduzione negli anni '90 del calcolo semiprobabilistico agli stati limite <sup>5</sup>.

Un esempio analogo, ma forse meno noto, può essere l'opera di Gino Zani <sup>6</sup>, allievo di Attilio Muggia <sup>7</sup>, che ha prestato la sua opera nei paesi colpiti dal terremoto del 1908. Nella breve prefazione alla relazione sulla casa asismica economica si può leggere:

*“Il problema della casa asisimica economica nei paesi distrutti dal terremoto del 28 dicembre 1908 è diventato così assillante da richiamare ancora una volta la attenzione dei tecnici e delle autorità politiche. La presente relazione non è uno studio teorico, ma il riassunto documentale dei risultati pratici ottenuti in molti anni di lavoro da chi fino dai primi giorni del terremoto si è dedicato al difficile problema della casa asismica. E serve a dimostrare come sia possibile utilizzando la mano d'opera ed i materiali locali, senza ricorrere alla industria forestiera, senza discostarsi dai sistemi costruttivi comunemente in uso e con la osservanza scrupolosa delle norme tecniche vigenti, costruire case asismiche robuste, durature, igieniche, di vario tipo, di varia struttura, il cui costo può variare dalle L. 4.000,00 alle L. 10.000,00 per ogni vano. È possibile cioè con gli stessi sistemi costruire sia*

*case popolari di prezzo inferiore a quello delle baracche in legno, sia case economiche in muratura ordinaria con ossatura asismica di legno o di ferro o di cemento armato, sia villini signorili. La economia della costruzione, che ammonta a circa il 30% rispetto ai tipi di case più comunemente in uso, è ottenuta non a scapito della solidità della durata e della igiene della casa, ma con l'adattare, dopo numerosi esperimenti, alle esigenze delle abitazioni asismiche e delle consuetudini locali i sistemi costruttivi più largamente impiegati nei paesi che hanno la migliore organizzazione edilizia e specialmente negli Stati Uniti d'America e nella Germania. E serve inoltre dimostrare come sia possibile mettere in valore alcuni materiali del luogo, e creare così con limitati mezzi industrie che potrebbero sopravvivere anche dopo la ricostruzione delle città distrutte.”<sup>8</sup>*

Leggere queste righe evidenzia come fosse piena la consapevolezza che la pratica dovesse precedere e supportare la teoria. La “*causa delle cose*” viene prima della norma che è, in generale, un compromesso tra saperi pratici, interessi privati e interessi pubblici. I problemi normativi non vengono trascurati ma sono affrontati successivamente rispetto alla individuazione di una soluzione progettuale al problema posto. Anche l'eterogeneità di cui si è accennato è evidente, in un contesto comunque meno assillato dai vincoli normativi e prestazionali rispetto a quello attuale.<sup>9</sup>

A questa vicenda si collega strettamente la storia dell'evoluzione della teoria e della pratica del cemento armato che ha finito poi per dominare il panorama delle costruzioni nel contesto italiano. È noto come la diffusione delle “*pilastrate*” all'interno dei telai iperstatici in cemento armato diventeranno il modello costruttivo adottato diffusamente in tutto il territorio nazionale a partire dagli anni cinquanta, quando prenderà corpo una diversa consapevolezza rispetto alle potenzialità applicative di questo sistema che consentirà di liberare la progettazione dai condizionamenti statico-costruttivi.

Nelle aree con elevata vulnerabilità sismica, infatti, la normativa sulle costruzioni edilizie, emanata con i Regi Decreti posteriori alla prima disposizione normativa del 1909<sup>10</sup> suggerisce di adottare soluzioni “*miste*” muratura-cemento armato, secondo diverse configurazioni. In particolare con il Regio Decreto n. 705 del 3 aprile 1926<sup>11</sup> e con il successivo Regio Decreto n. 431 del 13 marzo 1927<sup>12</sup> viene redatta la prima mappa aggiornata delle aree sismiche divise per categorie di intensità e sono indicate una serie di prescrizioni normative tra cui la necessità di impiegare, anche nel caso della costruzione di edifici murari, tondini di ferro o pilastri in c.a. “*annegati*” all'interno dei setti murari in corrispondenza delle connessioni angolari (ingabbiamento), solai latero-cementizi ad orditura incrociata, ed in genere dispositivi che evitassero azioni spingenti sulle membrature perimetrali (cerchiature). Una norma che induce conseguentemente una importante variazione nei

modi di costruire, decretando l'affermazione del tipo edilizio con “*muratura rinforzata*” o “*animata*” nei casi di costruzioni con sviluppo in altezza superiore ai due livelli.<sup>13</sup>

Riflessioni sulle interazioni tra telaio e muratura di riempimento o tamponamento le possiamo trovare nei lavori di Enrico Del Piano<sup>14</sup> che nel testo “*Contributo al calcolo delle intelaiature ricolme di muratura*”<sup>15</sup> propone la risoluzione di telai in cemento armato in cui le murature sono realizzate contemporaneamente con l’*ossatura*” in c.a. ed in cui le sollecitazioni si ripartiscono in varia proporzione fra intelaiatura e muro. Per comprendere quale consapevolezza muovesse questi professionisti si deve notare come nello stesso testo venga citato anche il lavoro teorico di Modesto Panetti<sup>16</sup> che tiene conto delle reazioni che derivano tra i pilastri e la muratura nelle intelaiature ricolme di materiale di parete sollecitate da forze sismiche orizzontali.

Il livello conseguito dalla riflessione teorica e dall’apparato normativo non troverà però un eguale riscontro sul piano applicativo e dell’efficacia pratica per due principali ragioni: la prima è conseguente al lento e contraddittorio processo di classificazione delle aree sismiche che si svilupperà fino ai primi anni ottanta del Novecento; la seconda è correlata alle nuove esigenze poste dalla ricostruzione post bellica e dal rapido sviluppo economico degli anni sessanta, che genereranno una radicale trasformazione dei tessuti urbani con ridotta attenzione per le istanze normative e prestazionali degli edifici.

La normativa, per converso, sta attualmente divenendo egemone contribuendo a far smarrire gran parte delle buone pratiche che hanno consentito a valenti progettisti di realizzare opere che fossero in grado di soddisfare sia la pratica costruttiva che l’esigenza prestazionale grazie alla profonda comprensione materica dei fenomeni statico-costruttivi.

Il campo di indagine che si vuole esplorare, con molta modestia, è quindi proprio quello incerto e nebuloso compreso tra la teoria e la pratica del costruire. Quello che si vuole evitare è la eccessiva scientificizzazione del problema evitando di ragionare per “*teoremi*”, cioè procedendo solamente attraverso ciò che è noto per mezzo di regole esatte e tradurlo in costruzione, quanto piuttosto di lavorare per “*congettura*”, cioè cercando di tradurre in comprensione ciò che è noto per esperienza.<sup>17</sup>

<sup>1</sup> Riccardo Gulli e Giovanni Mochi, *Bovedas tabicadas: architettura e costruzione* (Roma: CDP, 1995).

<sup>2</sup> Sergio Poretti "Storia delle costruzioni e storia dell'architettura" in Giovanni Mochi, a c. di, *Teoria e pratica del costruire: saperi, strumenti, modelli: esperienze didattiche e di ricerca a confronto: seminario internazionale: Ravenna, 27-29 ottobre 2005* (Ravenna: Moderna, 2005).

<sup>3</sup> Ingegnere, nato a Saliceta San Giuliano (Modena) il 16 marzo 1852, morto a Bologna il 13 marzo 1918. Dopo essere stato per due anni assistente alla Scuola d'applicazione per gl'ingegneri di Roma, entrò nel Real Corpo delle miniere e frequentò poi fino al 1876 il corso d'ingegneria mineraria a Liegi. Ritornato in patria, fu nominato (1877) professore incaricato di meccanica applicata alle costruzioni, presso la Scuola d'applicazione per gl'ingegneri di Bologna e, nel 1880, professore ordinario di costruzioni idrauliche e ponti, presso la stessa scuola: occupò le due cattedre fino alla morte. In una serie di memorie (pubblicate la maggior parte negli Atti dell'Accademia delle scienze di Bologna) il C. svolse numerosi e disparati argomenti di scienza delle costruzioni, sia nel campo teorico sia in quello sperimentale. Speciale menzione meritano le note riguardanti la teoria del cemento armato, redatte in anni in cui regnava molta incertezza sull'argomento, e quelle dedicate all'edilizia antisismica.

<sup>4</sup> Nato a Bologna il 1° febbraio 1892, morto a Bologna il 24 agosto 1956. Nel 1921 si laureò a Bologna in ingegneria civile. Dopo aver brevemente lavorato presso il Gabinetto di scienza dei materiali, nello stesso anno fu nominato insegnante di elettrotecnica presso l'istituto tecnico industriale Aldini Valeriani di Bologna, ove rimase fino al 1927. Nel 1927 conseguì la libera docenza in scienza delle costruzioni e nello stesso anno successe per incarico al prof. G. Albenga nell'ateneo bolognese. La sua produzione, comprendente circa ottanta scritti, può essere inquadrata e suddivisa in cicli caratterizzati ognuno dalla ricerca e dallo studio sistematico di determinati problemi. Il B., infatti, in una serie di note strettamente connesse tra loro, espone i metodi risolutivi di determinati problemi tecnici, mettendo in evidenza i particolari pregi e i vantaggi di ogni sistema e dandone lucide e profonde giustificazioni teoriche.

<sup>5</sup> Giovanni Mochi e Giorgia Predari, *La costruzione moderna a Bologna: 1875-1915: ragione scientifica e sapere tecnico nella pratica del costruire in cemento armato* (Milano: Bruno Mondadori, 2012).

<sup>6</sup> Gino Zani (Città di San Marino, 31 dicembre 1883 – Città di San Marino, 22 marzo 1964) è stato un ingegnere sammarinese. Si laureò in ingegneria a Bologna nel 1908. Fu uno dei principali artefici della ricostruzione di Reggio Calabria dopo il terremoto del 1908. Fu uno dei precursori della moderna edilizia antisismica, dei moderni sistemi di prefabbricazione, un abile architetto, un valente urbanista e uno storico. A lui si deve la rifabbrica del centro storico della Repubblica di San Marino nei primi anni del 900.

<sup>7</sup> Ingegnere e architetto (Venezia 1860 - Bologna 1936); pioniere in Italia delle costruzioni in cemento armato (nel 1900 progettò il primo ponte in cemento armato, con otto arcate, sul Po, a Piacenza), progettò e costruì molte opere d'ingegneria civile (tra cui, con altri, la scalea della Montagnola a Bologna). Tenne (1912-35) la cattedra di architettura tecnica alla scuola d'ingegneria di Bologna.

<sup>8</sup> Gino Zani, «La casa asismica economica», 1923, <http://www.ginozani.org/>.

<sup>9</sup> Si riporta uno stralcio di alcune mail in merito a questo argomento scambiate con la Prof. Silvia Castellaro Prof. Silvia Castellaro mer 18/10/2017 19:26

.....

Voi ingegneri pensate sempre alle norme. La verità non è nelle norme. La Scienza non è nelle norme. Confondete la norma che è un compromesso tra saperi pratici, interessi privati, interessi pubblici con la ricerca delle cause delle cose. Segnati anche questo che è una delle differenze sostanziali che sto percependo tra Ingegneria e Scienze.

.....

Davide Prati gio 19/10/2017 19:36

.....

Io avevo fatto il parallelo tra "congettura" e "teorema". Gli ingegneri, soprattutto civili, lavorano per teoremi. Vogliono conoscere la regola esatta per tradurla in costruzione. Io ho lavorato per congettura, cercando di tradurre in comprensione quello che è noto per esperienza da secoli. Purtroppo è difficile dialogare con tecnici e tecnologi non utilizzando le "norme".

.....

<sup>10</sup> il Regio Decreto n. 193 del 18 aprile 1909, seguito dalla circolare 2664 del 20 aprile 1909 (Istruzioni tecniche), pubblicato all'indomani del disastroso terremoto di Messina e Reggio Calabria del 28 dicembre del 1908

<sup>11</sup> Emanato a seguito del terremoto di Siena e Grosseto del 1926

<sup>12</sup> Norme tecniche ed igieniche di edilizia per le località colpite dai terremoti

<sup>13</sup> Giorgia Predari, *I solai latero-cementizi nella costruzione moderna in Italia, 1930-1950* (Bologna: Bononia University Press, 2015).

<sup>14</sup> Ingegnere nato a Rimini nel 1873, laureatosi nel 1896 al Politecnico Federale di Zurigo (Svizzera), collega universitario dell'Ingegnere Robert Maillart ed intimo amico e collega del Prof. Giuseppe Albenga, fu un pioniere nel calcolo di ponti ad arco in cemento armato, progettò numerose opere pubbliche in Italia, Svizzera, Francia, Austria e fu precursore e divulgatore del brevetto Hennebique e Liupold in Italia. Responsabile progettista dai primi decenni del XX° secolo dell'Impresa Giovanni Chini di Milano, dell'Impresa Garbarino-Mezzacane-Sciaccaluga di Genova e in seguito strutturista per l'architetto Giulio Ulisse Arata di Piacenza.

<sup>15</sup> Enrico Del Piano, *Contributo al calcolo delle intelaiature ricolme di muratura: determinazione delle sollecitazioni in alcuni casi speciali* (Bologna: Zanichelli, 1937).

<sup>16</sup> Ingegnere italiano (Acquaviva delle Fonti, 1875 - Torino 1957). Prof. universitario di meccanica applicata e di costruzioni aeronautiche. Accademico pontificio (1936) e socio nazionale dei Lincei (1947). Senatore della Repubblica (1948-53), ministro delle Poste e Telecomunicazioni (1953). A Panetti sono dovuti importanti lavori nei varî rami della meccanica applicata, delle costruzioni sismiche, dell'aerodinamica e della meccanica del volo.

<sup>17</sup> Vedere nota 9

### III. ISTANZE E OBIETTIVI DI RICERCA

Il settore delle costruzioni, soprattutto nel campo dell'edilizia, ha subito nel corso degli ultimi due decenni un processo involutivo, sia in termini occupazionali che di qualificazione delle maestranze, che si è manifestato con evidenza con i primi effetti della recente crisi finanziaria che ha colpito l'economia nazionale.<sup>1</sup>

Le primarie istanze che guidano la ricerca di soluzioni tecnologiche innovative nel campo della costruzione edilizia seguono i principi posti dal tema della sostenibilità, che nella sua accezione più ampia si estende dalla scala ambientale fino a quella dei materiali. A tali istanze a carattere generale si associano quelle più specifiche riguardanti l'efficienza prestazionale, la sicurezza strutturale, l'ottimizzazione economica dei processi, la funzionalità d'uso, la qualità delle condizioni abitative e di design.

L'orizzonte entro cui si muovono le pratiche costruttive è limitato a due ambiti tra loro distinti: il primo relativo alla struttura, il secondo ai componenti edilizi, ovvero specificatamente all'involucro. Il primo ambito è contrassegnato da una condizione di sostanziale invarianza in termini di innovazione di prodotti e sistemi; il secondo, invece, è connotato da una forte implicazione con le innovazioni prodotte nel campo dell'ingegneria dei materiali, anche come derivazione mutuata da altri settori di attività. Tale differenziazione segue anche le logiche di industrializzazione dei processi produttivi.<sup>2</sup>

Per il primo ambito, quello della struttura, le tipologie in uso sono tre: massivo (trilitico), puntiforme (intelaiato), a setti. Queste sono realizzabili con cinque materiali disponibili: pietra, laterizio, calcestruzzo cementizio armato, acciaio, legno. Al di fuori di queste tipologie e di questi materiali, non esistono soluzioni costruttive certificabili da normativa. Nel secondo ambito si colloca invece una vasta gamma di soluzioni e prodotti che rispondono ad un'evoluzione continua dei requisiti prestazionali per adattarsi alle istanze oggi poste dal quadro esigenziale e normativo, soprattutto nei termini di impatto ambientale e di riduzione dei consumi energetici.

Ciò induce a comprendere come il concetto di innovazione possa essere differentemente declinato se associato ai due ambiti sopracitati; mentre per la struttura le innovazioni sono limitate al solo incremento delle prestazioni dei materiali o, nel caso dell'acciaio, ai possibili processi di riciclo, nel campo dei componenti edilizi la varietà delle soluzioni segue le dinamiche associate alla produzione industriale ed improntate su processi e metodi innovativi.

Dato questo contesto il progetto che viene presentato prevede il soddisfacimento delle istanze sopracitate attraverso l'ideazione di un sistema strutturale integrato, realizzato a secco, che consenta

di rispondere correttamente al quadro normativo vigente ed in grado di soddisfare alcuni assunti fondativi di seguito esposti:

- Temporaneità, intesa come il superamento dell'exasperazione della vita utile degli edifici. Ovvero la presa di coscienza che l'operato del prodotto edilizio, almeno in alcune sue parti, deve essere circoscritto in un determinato lasso temporale.
- Adattabilità, ottenibile con un approccio a strati, ciascuno previsto per una diversa durata. Lo strato di base è la struttura permanente, progettata per durare a lungo, mantenendo un'alta capacità di adattamento a diversi usi e funzioni durante tutto il ciclo di vita dell'edificio. Il secondo strato, mirato alle esigenze degli occupanti, comprenderà i componenti edilizi e potrà avere una durata di 10-20 anni. Il terzo strato è costituito da elementi intercambiabili, le finiture e la domotica, che avendo un'obsolescenza maggiore saranno soggetti ad un più rapido processo di sostituzione.
- Replicabilità, riferita ad un oggetto il più possibile standardizzato ma dotato di una sua dignità e flessibilità compositiva, ispirato ai principi bioclimatici, con sistemi di produzione e accumulo di energia, di riciclo delle acque reflue e dei rifiuti. Un sistema dotato di un centro di elaborazione dati interno, capace di autoregolamentare i consumi di ogni edificio per renderlo autosufficiente e di integrarlo in tempo reale con il sistema urbano, come modello replicabile in contesti diversi contrassegnati da condizioni climatiche analoghe.
- Mutabilità, intesa come flessibilità d'uso, risponde alle esigenze dei modelli sociali contemporanei e al veloce evolversi delle esigenze funzionali, ovvero un edificio in grado di variare le caratteristiche dimensionali e morfologiche delle unità edilizie attraverso processi aggregativi a sviluppo orizzontale e verticale.

La scelta di sviluppare un sistema costruttivo modulare<sup>3</sup> caratterizzato da una stratificazione a secco è una delle possibilità che si aprono una volta scelta la via dell'industrializzazione edilizia<sup>4</sup>. Questo binomio presenta un'intrinseca e notevole potenzialità dal punto di vista della flessibilità, intesa come possibilità di modifica volumetrica e aggiornamento delle tecnologie messe a sistema, poiché le regole e le modalità di aggregazione sono già definite all'atto della progettazione del modulo e le unioni a secco permettono rapidi ammodernamenti dei componenti senza la necessità di compiere azioni distruttive. Ciò porta ad un elevato risparmio in termini di tempi, costi e uso di risorse, tra cui il suolo, che è uno degli obiettivi primari perseguiti dalla ricerca sulla sostenibilità.

Il problema di adottare soluzioni economicamente e ambientalmente compatibili, uno dei punti cardine della sostenibilità edilizia, trova invece soluzione nella flessibilità dei componenti

certificati industrializzati, soggetti a numerose ricerche e prodotti secondo il rispetto per l'ambiente.<sup>5</sup> Si ha quindi un ciclo logico che unisce i due principi generali: le caratteristiche del processo edilizio industrializzato agevolano il raggiungimento degli obiettivi della sostenibilità e questa a sua volta funge da incentivo e motore per la ricerca e la sperimentazione di nuove soluzioni industrializzate.<sup>6</sup>

Uno degli obiettivi è quello di associare alle tecniche di prefabbricazione a secco la componente massiva del laterizio, per realizzare edifici modulari e mutabili in grado di offrire un elevato comfort climatico all'interno della fascia mediterranea.<sup>7</sup>

La più evidente conseguenza è quella che l'intero processo, dal progetto alla costruzione, sia contrassegnato dalla presenza di pratiche artigianali e di procedure standardizzate che trovano nella fase del cantiere il momento di verifica delle problematiche esecutive, spesso viziate dall'indeterminatezza generata dalla mancanza di un controllo preventivo delle procedure di messa in opera e della compatibilità tra gli elementi costruttivi, i componenti edilizi e la dotazione impiantistica.

Le procedure di validazione di materiali e componenti nel campo dell'edilizia sono infatti prevalentemente contrassegnate da due fasi distinte: il soggetto industriale sviluppa il prodotto e poi affida ai laboratori esterni il testing per la certificazione delle caratteristiche. In questa logica i mondi della progettazione, della costruzione e della produzione sono tra loro disgiunti, in quanto l'unico luogo in cui trovano un momento di corrispondenza è quello finale, il cantiere, con tutte le implicazioni che ne conseguono in termini di ottimizzazione, compatibilità ed efficacia delle soluzioni adottate. Il paradigma che viene qui proposto segue una logica inversa, assegnando al laboratorio la fase di controllo preventivo dei processi, attraverso lo sviluppo di sistemi tecnologici integrati.

Il primario obiettivo di questa ricerca è quello di definire a livello progettuale e attraverso la prototipazione in scala le parti di un nuovo sistema strutturale a secco basato su un telaio ligneo modulare controventato da tamponamenti massivi assemblati senza l'utilizzo di malte, a cui si conferisce coesione attraverso un sistema di post-compressione realizzato con tiranti in acciaio. Il sistema costruttivo oggetto di studio segue quindi le "linee guida" esposte precedentemente: industrializzazione del processo edilizio, modularità, temporalità, adattabilità, mutabilità, replicabilità, sostenibilità. La concezione del presente lavoro fonda le proprie radici nella tradizione costruttiva storica, richiamando la "gaiola portoghese" o la "casa baraccata"<sup>8</sup>. Pur tenendo fede a questi principi costruttivi originari, divenuti base dei primi regolamenti antisismici, si è cercato di attualizzare il sistema proposto nell'ottica di un superamento delle classiche tecniche costruttive che ad oggi caratterizzano un mercato molto statico e rigido come quello dell'edilizia. Si tratta quindi di un sistema costruttivo di tipo massivo, in antitesi alla ormai "casa adiabatica" in voga oggi, in cui la

maggior parte delle lavorazioni avvengono in officina, al fine di ridurre e velocizzare al massimo le operazioni in cantiere. Particolare attenzione è stata posta nella scelta dei materiali impiegati, rivolgendosi a quelli maggiormente sostenibili dal punto di vista ambientale ed economico.

La ricerca si è concentrata attorno alla progettazione del tamponamento murario collaborante realizzato a secco e concepito come mezzo sia per assicurare efficienza climatica e meccanica, sia per garantire una riduzione dei tempi e dei costi. Questo tamponamento innovativo, del quale è stato calcolato il comportamento isolante in varie province italiane e in diversi mesi dell'anno, è stato inserito in un telaio ligneo modulare di passo 4x4 m opportunamente progettato e verificato per le sollecitazioni statiche. È stato così possibile definire un modulo base del sistema costruttivo, facilmente replicabile e aggregabile, che permette di realizzare edifici residenziali più articolati, di rapida realizzazione e adattabili nel tempo alle mutate esigenze degli utenti. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II "*Sistema INTEGRO BS 400*")

All'interno del sistema costruttivo viene utilizzata come orizzontamento una tecnologia innovativa di solaio ligneo a ordito e impalcato costituito dalla combinazione di un grigliato in resina poliesteri, rinforzato con fibre di vetro ad orditura unica, accoppiato a due pannelli multistrato in legno disposti rispettivamente all'intradosso e all'estradosso del grigliato. Questo elemento, originariamente destinato alla sostituzione di orizzontamenti nel costruito storico, non soggetto a vincoli di tutela, ha manifestato grande adattabilità a questo tipo di sistema grazie alle sue caratteristiche di modularità. Questo impalcato innovativo vuole apportare un miglioramento tecnologico-costruttivo nel rispetto delle normative vigenti e individuare come carattere fondante la reversibilità della soluzione tecnica proposta, la leggerezza dei materiali e la rigidità nel piano.

Data l'importanza di questo elemento si è scelto di strutturare una campagna conoscitiva molto approfondita sulle sue caratteristiche meccaniche svolgendo numerose prove di laboratorio. Durante diverse campagne di test, realizzate su banchi prova differenti presso il laboratorio LISG, sono state indagate le caratteristiche di rigidità e resistenza del pannello sandwich nelle sue diverse configurazioni. Facendo variare la disposizione dei pannelli lignei e passando da una configurazione a sezione simmetrica ad una configurazione asimmetrica si sono tentate ottimizzazioni della sezione resistente mentre, cambiando tipologia di incollaggio, si è cercato di bilanciare l'aumento di rigidità del pannello sandwich così da sfruttare appieno le caratteristiche dei diversi componenti. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO BS 400*")

---

<sup>1</sup> Fabrizio Patti, «L'edilizia è un disastro di produttività, ecco come costi e tempi possono dimezzarsi», 9 ottobre 2017, <http://www.linkiesta.it/it/article/2017/10/09/ledilizia-e-un-disastro-di-produttivita-ecco-come-costi-e-tempi-posson/35764/>.

<sup>2</sup> Alessandro Greco e Riccardo Gulli, a c. di, *Innovazione ed evoluzione nel progetto della residenza: le nuove frontiere dell'industrializzazione per l'housing in Italia* (Monfalcone: Edicomeditazioni, 2010).

<sup>3</sup> Nicola Bartolini et al., «Parametric Design Tools and Methods for an Innovative Constructive Procedure», *TeMa: Tempo, Materia, Architettura*, n. 1 (1 dicembre 2016), <https://doi.org/10.17410/tema.v2i1.92>.

<sup>4</sup> Paolo Bergamaschi, Paolo Bertozzi, e Agnese Ghini, *Il sistema stratificato a secco: una tecnologia sostenibile per l'architettura della casa* (Palermo: D. Flaccovio, 2010).

<sup>5</sup> Paolo Vaccaro, *Aspetti e problemi della prefabbricazione dell'edilizia residenziale in Italia* (Venezia: s.n., 1964).

<sup>6</sup> Gianluca Minguzzi, a c. di, *Architettura sostenibile: processo costruttivo e criteri biocompatibili* (S.l.: Mariotti 1820, 2017).

<sup>7</sup> D. I. C. Di Perna et al., «Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica», *L'industria dei Laterizi*, n. 110 (2008).

<sup>8</sup> Alessia Bianco, a c. di, *La «Casa baraccata»: guida al progetto e al cantiere di restauro* (Roma: GB Editoria, 2010).



## IV. ATTIVITÀ DI RICERCA

Seppur divisa concettualmente in quattro fasi distinte, si vuole sottolineare come la ricerca si sia svolta, dato il suo carattere prettamente applicativo, in un continuo alternarsi ed intersecarsi di fasi conoscitive, progettuali, sperimentali che hanno costituito il continuo feedback necessario ad avanzare e risolvere le problematiche riscontrate.

### FASE 1 – RICERCA STORICA E INQUADRAMENTO

In una prima fase si sono indagati diversi aspetti che sono legati alle caratteristiche intrinseche del sistema costruttivo in esame. Questo sistema è interamente realizzato a secco, costituito da una serie di elementi discreti prefabbricati e il più possibile standardizzati; si tratta di un sistema costruttivo di tipo massivo, che vede l'utilizzo di materiali innovativi e sostenibili. Da ciò discende la necessità di un'analisi formale di ricerca teorica utile a mettere in luce tutte le potenzialità significative e le possibili applicazioni cui questa struttura può essere destinata.

Si sono dunque trattati i temi dell'edilizia a basso costo, della sostenibilità dei processi, della sostenibilità economica. Argomenti questi, che rispecchiano problematiche sociali ed economiche di grande attualità. Ampio spazio è stato dedicato, inoltre, alle tematiche che ruotano attorno all'edilizia prefabbricata, ovvero che riguardano i caratteri e le condizioni delle architetture realizzate a secco. Il che significa confrontarsi con tecnologie che sono progettate in modo da essere potenzialmente “*smontabili*” e quindi caratterizzate dal paradigma della reversibilità. La “*cultura della reversibilità*” è sinonimo di basso impatto ambientale, di zero rifiuti, ed è un aspetto che oggi è ormai d'obbligo e che non può rimanere estraneo al fare architettura.

Il connotato della reversibilità assunto come necessario, apre la strada verso la valutazione delle caratteristiche e delle condizioni delle architetture mobili e transitorie, delle architetture trasformabili, versatili, ampliabili, flessibili e così via. Tutti aspetti questi, oggi fortemente innovativi in quanto consentono di trovare soluzioni adeguate per la progettazione di forme dell'abitare che corrispondano ai bisogni mutevoli dell'uomo. Attualmente il genere dell'architettura temporanea rappresenta una soluzione diffusa nei casi di emergenza abitativa, ma anche per abitazioni destinate ai cosiddetti “*homeless*”, nonché nei casi di manifestazioni temporanee e situazioni di emergenza. Più in generale in tutte le situazioni in cui sia necessario far fronte a fenomeni contingenti in uno specifico contesto. La sfida attuale però, che può costituire la vera innovazione sul tema, consiste nell'applicazione dell'architettura temporanea all'edilizia abitativa di base, la quale è lecita se si pone

l'attenzione su quali sono le nuove esigenze della società e sul cosiddetto fenomeno del “*nomadismo moderno*”. In questo modo, quindi, si va al di là dell'innovazione tecnologica e si affronta un altro tipo di innovazione, la quale è spaziale, di stile di vita, di confronto con le esigenze degli utenti in rapporto con il contesto. (si veda Parte 1 - Profili teorici - Capitolo I “Principi, criteri e modelli”)

Il recupero dell'antico sistema costruttivo della casa baraccata è stato intrapreso per via delle sue caratteristiche intrinseche, che lo hanno portato ad essere nel corso dei secoli una tecnologia efficiente ed affidabile, ben rispondente a quelli che sono i principi sui quali ci si è voluti fondare per sviluppare questo progetto di ricerca. Infatti si tratta di una costruzione principalmente realizzata a secco in legno e laterizio (o pietra), veloce da realizzare, con materiali economici e dal basso impatto ambientale. La ricerca storica sulla sua genesi ha permesso di mettere in luce le principali ragioni per cui questo sistema costruttivo abbia resistito per diverse centinaia di anni come il sistema più affidabile anche dal punto di vista sismico, facendo da modello ai primi esempi di normative antisismiche. In particolare, analizzando la storia dei terremoti avvenuti tra 800 e 900 nel sud Italia, vediamo come da soluzione di ricovero temporanea, sia divenuto requisito fondamentale anche per le nuove costruzioni fino all'arrivo del cemento armato. In più questo sistema rappresenta anche un modo di costruire tradizionale del nostro paese che è stato quasi senza motivo abbandonato, ma che ancora oggi avrebbe ragione d'essere per le sue peculiarità. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II “*Sistema INTEGRO BS 400*” - Paragrafo 1)

La scelta di approfondire, anche dal punto di vista della sua applicabilità pratica, l'elemento tecnico strutturale costituito dall'impalcato sandwich costituito dal grigliato stampato e dai pannelli lignei ha imposto la necessità di effettuare uno screening delle più diffuse tecnologie presenti sul mercato attuale. L'accoppiamento di più elementi strutturali funzionanti a flessione e resi collaboranti mediante l'utilizzo di connessioni consente di realizzare strutture di tipo composto. Un ambito ormai consolidato di impiego di queste strutture è quello pertinente al consolidamento dei solai lignei, dove l'accoppiamento della struttura lignea esistente con una “*soletta*” rigida risulta piuttosto conveniente: si possono infatti realizzare sezioni più efficienti a partire da elementi di ridotte dimensioni.

L'intervento di consolidamento dei solai lignei esistenti rientra, a seconda dei casi, nelle operazioni di adeguamento, miglioramento o di riparazione locale atte a incrementare le caratteristiche tecniche degli elementi e di conseguenza degli edifici esistenti; questo avviene spesso per adeguare le strutture agli standard di utilizzo attuali oppure alle mutate esigenze funzionali. Le tecniche di intervento prevedono di riutilizzare le travature lignee esistenti alle quali viene solidarizzata una soletta di limitato spessore realizzata con materiali diversi (calcestruzzo, pannelli o tavolati lignei, piastre o profili metallici, materiali compositi) e resa flessionalmente collaborante

attraverso un sistema di connessione. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III “*Solaio INTEGRO FS PRFV*” - Paragrafo 1)

## **FASE 2 – IPOTESI PROGETTUALE PER IL SISTEMA STRUTTURALE E DEFINIZIONE DEL MODULO BASE**

La seconda fase della ricerca si è incentrata sullo sviluppo di un sistema costruttivo innovativo, denominato “*INTEGRO BS 400*” (INTEGRO BUILDING SYSTEM 400), seguendone l’evoluzione dal primo concept iniziale, nato da un’intuizione del Prof. Riccardo Gulli. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II “*Sistema INTEGRO BS 400*” - Paragrafo 2)

L’organismo strutturale originario si basa sull’impiego combinato di uno scheletro puntiforme in acciaio, con un passo di 400 cm, e di pareti a conci (a base di argilla trattata con i processi di geopolimerizzazione) armate con barre dywydag e piatti in acciaio. La scelta di impiegare una struttura “*mista*”, con scheletro leggero e murature armate, è motivata da alcune ragioni ma, soprattutto dall’attuale normativa sismica (NTC 2008) che limita fortemente l’impiego di murature armate in termini di flessibilità tipologica degli organismi edilizi, essendo vincolata alla continuità strutturale delle singole cellule, ovvero alla scolarità dell’impianto murario. Il sistema INTEGRO consente di eseguire strutture che rispondono ai criteri della muratura armata ma al contempo fornisce una alternativa, che nel tipo BS 400, non è condizionata al rispetto di detti vincoli e garantisce sia l’esecuzione di pareti collaboranti con la struttura (per gli effetti controventanti dei telai), sia la rapidità/economicità di esecuzione in ragione dell’impiego di procedimenti interamente a secco, sia le esigenze di inerzia termica sopra enunciate.

In una seconda fase si sono quindi valutate tutte le criticità e i punti di forza del concept originale, cercando di renderlo ancora più semplice ed efficiente. I principali cambiamenti apportati hanno interessato la sostituzione dell’acciaio col legno per il telaio, e la modifica dell’armatura interna, che è stata in parte portata all’esterno e in parte sostituita con un elemento reticolare formato da travetti in legno.

Si è quindi ragionato sul complesso della parete come elemento unitario, composta dalla parte di telaio strutturale in legno e quella di tamponamento formata dai blocchi in geopolimero. Con lo sviluppo dei dettagli costruttivi si è voluto mettere in luce lo schema di montaggio e la modularità degli elementi che compongono il tutto. Un altro aspetto rilevante è stato capire come poter inserire finestre e porte senza compromettere in toto la funzione di controventamento assunta dal pacchetto.

Anche questa ipotesi progettuale ha presentato notevoli criticità. Concettualmente la posa della trave accoppiata alla piastra in sommità una volta terminata la realizzazione del tamponamento

sottostante rende tale sistema più vicino alla concezione di muratura portante che a quella di telaio, poiché gli elementi lignei assumono essenzialmente funzioni di ritegno dei blocchi e di propagazione degli sforzi. Difatti anche la logica realizzativa si discosta molto da quella intelaiata poiché non è possibile la preventiva realizzazione della struttura completa, in relazione al vincolo di dover alloggiare la trave solo una volta completato il campo murario sottostante, conferendo alla realizzazione del sistema costruttivo una logica strato per strato.

Inoltre, lo spessore del tamponamento grezzo era arrivato a raggiungere la notevole dimensione di 40 cm al grezzo, senza contare le finiture esterne comprendenti le contro pareti areate; tale dimensionamento era dettato dalla necessità del tamponamento di inglobare i pilastri per garantire un corretto ammorsamento tra i corsi e attivare quindi, in caso di necessità, un buon comportamento scatolare.

Ultimo, ma non meno importante, per la realizzazione del tamponamento tra due pilastri in un interpiano erano necessari 149 blocchi sagomati ad hoc di geopolimero; il materiale a cui si fa riferimento è risultato di grande interesse nel campo dei rivestimenti ma la sua ipotetica introduzione come blocco, strutturale e non, non è più oggetto di ricerca: si tratta quindi di una soluzione concettualmente valida, ma non percorribile a livello pratico.

Queste riflessioni hanno infine suggerito di rivolgersi, ai fini della realizzazione del tamponamento armato, alla riduzione dello spessore complessivo di parete e a blocchi in laterizio già presenti in commercio semplificando, di fatto, sia la composizione della parete sia la reperibilità del materiale. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II “*Sistema INTEGRO BS 400*” - Paragrafo 3)

### **FASE 3 – IPOTESI PROGETTUALE PER L’IMPALCATO COLLABORANTE**

L’altro elemento di fabbrica, oggetto di questa ricerca, è chiamato ad assolvere le funzioni ordinarie di un orizzontamento: sostegno dei carichi e ripartizione degli stessi alla struttura in elevazione, nonché collegamento tra le pareti garantendone una maggiore stabilità. I solai sono estremamente importanti in caso di evento eccezionale, quale il sisma; infatti devono garantire due caratteristiche fondamentali: la continuità strutturale e la rigidità di piano; necessarie entrambe a una corretta ripartizione dell’azione dinamica alla struttura verticale, evitandone così il collasso. Sono questi i requisiti con cui si vuole connotare l’impalcato in esame.

In particolare, la continuità strutturale tra orizzontamento e pareti è necessaria a scongiurare i collassi strutturali definiti come primo modo di danno. Questi risultano essere innescabili da forze sismiche già di bassa entità e possono generare rotazioni e perdite di stabilità degli elementi verticali.

Al fine di evitarli deve essere garantito, non solo un buon collegamento tra solaio e parete, ma anche tra gli elementi in elevazione stessi, assicurando un comportamento scatolare dell'edificio. Tale caratteristica si ottiene con l'introduzione di un cordolo continuo su tutti i lati del fabbricato.

La rigidità di piano è una caratteristica necessaria degli orizzontamenti per ottenere una buona trasmissione delle forze del sisma alle pareti. Altra caratteristica fondamentale coincide con la leggerezza. In passato la sostituzione di solai originari con solai in latero cemento, con adeguati valori di rigidità ma estremamente pesanti, ha portato a un peggioramento delle condizioni statiche dei fabbricati. Questi interventi hanno generato, in caso di sisma, azioni dinamiche elevate sulle pareti, che ne hanno determinato un collasso fuori dal piano a causa del cosiddetto martellamento.

Le caratteristiche sopracitate diventano obiettivi fondamentali per l'impalcato oggetto di questa tesi. Per conseguire una maggiore rigidità, l'elemento strutturale portante, costituito dal grigliato stampato in fibre di vetro, è stato accoppiato con pannelli multistrato di legno sia all'intradosso che all'estradosso. L'incremento prestazionale apportato è stato verificato sperimentalmente con prove di carico a flessione. L'incremento di rigidità che si punta ad ottenere è paragonabile a quello indotto da una soletta collaborante in cemento armato, ma con spessori e pesi notevolmente ridotti. I pannelli di compensato hanno un peso di circa  $5 \text{ kg/m}^2$  per 9 mm di spessore; il grigliato SCH 38/38DC utilizzato pesa circa  $30 \text{ kg/m}^2$ . Valori nettamente inferiori a quelli di un solaio tradizionale e per uno spessore limitato a 62 mm.

Per solidarizzazione dei grigliati in PRFV e dei pannelli in legno si è scelto di utilizzare un incollaggio realizzato da diversi adesivi in alcuni casi coadiuvato dalla interposizione di una rete in fibra di vetro. Tale soluzione diminuisce considerevolmente i problemi di scorrimento relativo fra i vari strati ed i fenomeni di punzonamento legati all'utilizzo di connettori meccanici che verranno impiegati esclusivamente per il collegamento alla struttura portante ed al cordolo perimetrale. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 2)

#### **FASE 4 - SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA E VERIFICA PRESTAZIONALE DEI PROTOTIPI**

La fase finale di sperimentazione costruttiva è stata rivolta alla verifica fondamentale delle possibilità applicative dei sistemi innovativi messi a punto elaborati dal progetto di ricerca, con particolare interesse verso la messa in luce dell'importanza assunta dall'attività pratica nel verificare l'appropriatezza delle considerazioni svolte in ambito teorico.

Il passaggio dalla fase ideativa a quella della sua traduzione in forma costruita avviene attraverso due momenti: il progetto e la costruzione. Il forte motivo d'interesse rappresentato da

queste esperienze operative consiste non solo nel raggiungimento di una ancor più profonda comprensione dei sistemi costruttivi proposti, attraverso la sperimentazione diretta del processo di montaggio, ma anche dalla realizzazione di modelli reali su cui poter effettuare prove di carico e verifiche prestazionali, al fine di definirne il comportamento strutturale ed energetico.

Per quanto concerne il sistema parete sono stati realizzati in un primo momento dei modelli virtuali tridimensionali e modelli in scala ridotta per verificare operativamente le prime ipotesi progettuali. In un secondo momento, una volta definite meglio le componenti dell'intero sistema, è stato realizzato un modello in scala 1:2 della soluzione intermedia. Dell'ultima soluzione progettuale, quella attualmente definitiva, è stato invece realizzato un modello della soluzione d'angolo in scala 1:10. Questa attività, seppur non cimentandosi con prototipi in scala 1:1, ha consentito di mettere in luce diverse problematiche inerenti la fattibilità tecnica delle ipotesi progettuali tradotte in forma costruita. L'analisi delle criticità emerse ha quindi consentito di formulare proposte correttive e migliorare, progressivamente, la definizione del sistema strutturale proposto. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II "*Sistema INTEGRO BS 400*" - Paragrafo 4)

Per quanto riguarda l'impalcato sandwich è stato invece possibile programmare e portare a termine una serie di campagne di test in laboratorio finalizzate alla comprensione delle caratteristiche di resistenza e rigidità dell'oggetto di indagine. Appoggiandosi alle strutture e al personale dei laboratori è stata messa a punto una macchina di prova per realizzare test di carico a 4 coltelli su provini realizzati ad hoc di dimensioni 1220x300 mm. Per l'acquisizione strumentale sono state utilizzate, oltre alle apparecchiature standard quali LVDT ed estensimetri, anche un innovativo sistema di comparazione basato sulla fotografia stereometrica digitale.

Sono state eseguite in tutto tre sessioni di test, realizzate con modalità ripetibili e confrontabili, riuscendo ad indagare le caratteristiche apportate al sistema da diversi tipi di collanti. Durante i test è stata anche valutata la possibilità di una ottimizzazione della sezione resistente facendo variare la posizione dei componenti il pannello sandwich. È stata inoltre verificata l'importanza dell'utilizzo del grigliato stampato in PRFV come core strutturale dell'intero sistema effettuando alcuni test in cui questo elemento è stato sostituito da un materiale meno performante (XPS). (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 3)

La possibilità di cimentarsi in attività di laboratorio ha consentito di comprendere appieno le difficoltà insite nella realizzazione di un nuovo componente edilizio strutturale ma ha anche affinato le capacità di analisi ed interpretazione dei dati che sono divenute parte integrante del percorso formativo del candidato. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 4)

## V. RISULTATI ATTESI

In rapporto all'obiettivo principale della ricerca, i risultati finali attesi sono i seguenti:

- Ideazione, sviluppo e perfezionamento di un sistema strutturale basato sul recupero di tecniche costruttive storiche attualizzate in una concezione moderna ed innovativa dell'arte del costruire.
- A partire da esperienze precedenti miglioramento ed ottimizzazione di un innovativo pannello sandwich strutturale atto a svolgere le funzioni di impalcato in orizzontamenti lignei sia all'interno del sistema costruttivo sia negli interventi sul patrimonio edilizio esistente

In relazione agli obiettivi secondari della ricerca, gli esiti finali attesi sono i seguenti:

- Comprensione qualitativa delle performance statico strutturali del sistema parete proposto nonché delle sue potenzialità aggregative ed espressive
- Individuazione delle criticità relative alla fattibilità tecnica delle soluzioni proposte in previsione di un ulteriore sviluppo e affinamento orientato ad una sperimentazione costruttiva a scala reale
- Piena comprensione delle caratteristiche di resistenza e rigidità dell'impalcato sandwich ed ottimizzazione della sua composizione
- Individuazione dei migliori sistemi di posa e connessione dell'impalcato alle orditure principali con individuazione di criteri base per il calcolo del solaio in condizioni di utilizzo

In linea con le indagini scientifiche finora condotte dall'ambito disciplinare di Architettura Tecnica (ICAR/10), questo progetto di ricerca nasce per contribuire allo sviluppo di strumenti innovativi sia nell'ottica delle nuove costruzioni sia in quella del recupero dell'edilizia recente, proponendo processi e metodi validi per la progettazione degli interventi, nell'ottica di una architettura ecosostenibile.

Inoltre, la presente ricerca, avvalendosi della collaborazione di aziende esterne, attua ed implementa quelle sinergie al giorno d'oggi sempre più ricercate all'interno dell'Università di Bologna, volte a garantire un rapporto più stretto fra la teoria e la pratica del costruire. In particolare, data la condizione attuale del settore delle costruzioni, si è maturata la convinzione che la ricerca nell'ambito dell'innovazione delle tecniche costruttive debba cercare di tornare ad essere propositiva

e trainante nei confronti del mondo della produzione, come avviene già in altri ambiti, e non svolgere meramente funzione di servizio e certificazione delle prestazioni.

Pur ritenendo il percorso di ricerca dotato di un suo sviluppo ed una sua struttura tali da ritenere la presente Tesi di Dottorato conclusa, non si pretende di avere affrontato e risolto tutte le problematiche emerse data la reale complessità dei temi affrontati. In alcuni casi la mancanza di risorse disponibili ha impedito l'esplorazione di tematiche parallele, soprattutto inerenti la prototipazione, per le quali non si è potuto trovare adeguato supporto.

---

**- PARTE 1 -**

**PROFILI TEORICI**



# I - PRINCIPI, CRITERI E MODELLI



## 1 ESIGENZE

Questo progetto di ricerca si pone come obiettivo quello di proporre nuove tecniche costruttive proiettate verso il superamento dei classici paradigmi edilizi ed architettonici. In questo contesto il progetto dell'abitare ha il ruolo di adeguare gli spazi del vivere quotidiano a esigenze di funzionalità e di qualità della vita. Nell'ambito della ricerca sui temi dell'edilizia, gli obiettivi da perseguire dovrebbero essere quelli di un'adeguata rispondenza dei prodotti edilizi alle necessità dettate dalla trasformazione della cultura abitativa.

Affrontare il tema della residenza al giorno d'oggi significa quindi confrontarsi con i diversi cambiamenti che stanno interessando la società contemporanea rispetto al modo di abitare e di vivere la casa. Per poter offrire risposte adeguate all'utenza bisogna in primo luogo conoscere il contesto socio-culturale in cui si opera e definire le nuove esigenze dell'abitare.

Svolgendo questa analisi è immediato prendere coscienza che i modelli tipologici odierni non risultano più adeguati a soddisfare queste nuove esigenze e possono essere oggetto di forte rinnovamento. La ricerca deve muoversi verso soluzioni diverse rispetto a quelle utilizzate diffusamente in passato. Sempre più di frequente, anche attraverso le pagine di cronaca, si segnalano situazioni di "mala abitazione" imputabili non solo e non tanto alla mancanza di alloggi, quanto all'apparente inadeguatezza del patrimonio residenziale di cui disponiamo rispetto ai bisogni e ai modi dell'abitare contemporaneo. Il patrimonio edilizio che abbiamo ereditato è statico e inadeguato alle esigenze di coloro che si spostano per motivi di lavoro o di studio. Le tipologie che si sono utilizzate nel recente passato discendono, nella maggior parte dei casi, da scelte progettuali che derivano più che altro da logiche di convenienza costruttiva e non da una conoscenza consapevole del luogo, del clima e, soprattutto, delle esigenze dell'utenza. Molti dei modelli insediativi ed abitativi elaborati dalla cultura architettonica nel corso del secolo scorso sono quindi in crisi e sono gli indicatori che segnalano l'esigenza di una nuova apertura progettuale, più attenta alle dinamiche sociali in evoluzione.

Assumere le esigenze della contemporaneità comporta, probabilmente, la necessità di sperimentare modelli generali dell'abitare meno convenzionali, organizzazioni spaziali almeno in parte alternative a quelle adottate dalle vecchie regole della zonizzazione, dello standard e della tipizzazione, assetti molto più aperti alle differenti culture dell'abitare.

Occorre individuare delle nuove strategie di progetto contemporaneo ed interpretarle come risposta a questo cambiamento. Le sperimentazioni in atto evidenziano che il punto cruciale su cui è necessario concentrare l'attenzione sono i canoni di "permanenza" e "immutabilità", i quali devono

essere messi sempre più in discussione. *“Ciò che maggiormente è cambiato è il destinatario, l'utente della residenza, che non sappiamo più bene chi sia, [...] perché è un corpo di utenza con molte sfaccettature, ibrido, molto meno facile da individuare nelle necessità, nella forma, nella complessità dello stile di vita, perché ha molti stili di vita”*.<sup>1</sup> Accertata l'esistenza di questa incertezza, è il progettista a doversi adattare, progettando una casa “intelligente”, capace di rispondere alle complesse esigenze che si possono presentare durante la sua vita utile. Deve offrire quindi flessibilità nel tempo per modifiche sostanziali degli spazi, ma anche varianti di destinazione d'uso, modifiche di impianti. Un processo progettuale “user oriented” che riesca, al limite, ad adattarsi in tempo reale alle esigenze dell'utente.

*“Oggi è possibile ripartire da questi concetti per riconsiderare l'abitazione come un 'abitacolo' in movimento. In questa concezione il 'neo-nomadismo' può essere individuabile con una architettura reversibile, ambientalmente compatibile ed ecologica in cui gli utenti possano ritagliarsi il proprio habitat domestico su misura, grazie alla flessibilità dello spazio che permette varie possibilità combinatorie all'interno dello stesso standard, con la possibilità di mutare nel tempo in base alle esigenze personali. Questo è possibile anche grazie alla prefabbricazione dell'oggetto 'casa' che in alcune realizzazioni, attraverso l'abbinamento di singole cellule, è possibile un ampliamento infinito.”*<sup>2</sup>

L'architettura quindi è costretta dai tempi e dalla tecnica ad interagire con uno spazio che non è più statico, ma dinamico, scorrevole, discontinuo. In quest'ottica, per offrire un prodotto che sia al passo con i tempi e che costituisca una risposta reale ai bisogni della società, è necessario elaborare nuovi obiettivi e strategie progettuali, che possono essere così riassumibili:

- Flessibilità
- Temporaneità
- Modularità e assemblabilità

Dopo una analisi sui nuovi assetti della popolazione, specificatamente nel contesto italiano, verranno affrontate le tre caratteristiche individuate che dovrebbero rappresentare una nuova architettura improntata sull'innovazione. Questi verranno ampiamente presentati e discussi portandone ad esempio modelli di riferimento che si ritengono interessanti per sviluppare nuove proposte.

---

## 1.1 VERSO UNA NUOVA CULTURA DELL'ABITARE

---

Già da qualche decennio si assiste ad un cambiamento inesorabile ed irreversibile degli stili di vita dell'individuo moderno, dovuto ai cosiddetti fenomeni della mondializzazione e della globalizzazione. Questi non sono certo mutamenti recenti, ma negli ultimi tempi hanno accresciuto notevolmente il loro impatto, arrivando a toccare sempre più numerosi aspetti della società contemporanea, tra cui quello dell'abitare. La globalizzazione ha prodotto l'effetto di contrarre i tempi e dilatare gli spazi degli accadimenti. Le attività, ma anche gli oggetti e le abitudini, sono sottoposti a ritmi più veloci e ad una costante trasformazione. Contemporaneamente i confini spaziali si fanno meno definiti e i luoghi sono sempre più indifferenziati.

---

### 1.1.1 POPOLAZIONE IN MOVIMENTO

---

Nella società moderna, al pari dell'aumento dello scambio di informazioni, si genera anche la sempre maggiore necessità di scambi fisici e interpersonali.

*“Mediamente ogni giorno cinquecentomila passeggeri si spostano in treno fra Firenze, Roma, Napoli e viceversa. Milioni di persone dunque, sono in movimento giornalmente [...]. Non è un fatto sporadico, è un fatto di routine. Ci si sposta fundamentalmente con ritmi sempre più continuativi e regolari; si viaggia convenzionalmente e non eccezionalmente, si tende a vivere viaggiando, a condurre un'esistenza in movimento”*

3

Queste poche righe esprimono in modo conciso e chiaro l'essenza di quella tendenza che oggi viene definita come “nomadismo moderno”. I “*nuovi nomadi*” sono coloro che, costretti a continui spostamenti, si assoggettano anche a soluzioni scomode, insoddisfacenti, come il pendolarismo che può prolungarsi per diversi giorni con ritorno a casa solo per il week-end. La continua mobilità di gran parte della popolazione è ormai una realtà diffusamente accettata, ed è un fenomeno in forte espansione, ulteriormente enfatizzato da altri aspetti quali lo sviluppo del settore terziario, l'aumento sempre maggiore di scambio di informazioni, l'incremento della telematica e della rete di scambi e servizi su cui si basa la economia attuale.

Questo fenomeno non va confuso con altri tipi di mobilità territoriale di massa, avvenuti in passato. L'urbanesimo del XIX e XX secolo oppure le migrazioni da sud a nord della manodopera contadina negli anni '50 e '60 in cerca di un impiego nell'industria, al pari dei più recenti fenomeni

di migrazione di popolazioni di origine extraeuropea verso i Paesi Occidentali, erano legati ad uno specifico contesto e hanno coinvolto precise fasce della popolazione. Attualmente chi si sposta non appartiene a uno specifico target sociale e non agisce secondo un'esigenza collettiva e condivisa. La mobilità è in generale sinonimo di vitalità e progresso e i soggetti interessati, che sono solitamente più o meno giovani, spaziano dal direttore di banca, al consulente finanziario, al giornalista fino ad arrivare al neolaureato che cerca opportunità all'estero o più semplicemente allo studente fuori sede.<sup>4</sup>

Se si vuole affrontare il tema dell'innovazione dell'abitare non si può dunque non prendere atto di questo importante fenomeno, positivo per molti aspetti dal punto di vista dello sviluppo individuale e sociale, ma critico per altri. La mobilità che caratterizza una piccola o una gran parte della vita di un individuo incide necessariamente su più fattori come ad esempio sulle modalità di formazione di un nucleo familiare, il che impone di considerare questo fenomeno nello studio sull'innovazione dell'edilizia residenziale.

Regioni	Fino a 15	Da 16 a 30	Da 31 a 45	Da 46 a 60	Oltre 60	Totale
<b>Piemonte</b>	47,9	31,4	9,7	6,1	4,9	100,0
<b>Valle d'Aosta</b>	61,8	27,0	5,8	3,2	2,2	100,0
<b>Lombardia</b>	45,3	29,4	10,6	8,2	6,6	100,0
<b>Provincia Autonoma di Bolzano</b>	62,2	25,8	6,5	3,5	2,0	100,0
<b>Provincia Autonoma di Trento</b>	59,3	27,8	6,9	3,5	2,5	100,0
<b>Veneto</b>	53,6	30,6	7,8	4,5	3,5	100,0
<b>Friuli-Venezia Giulia</b>	55,6	31,7	7,0	3,3	2,3	100,0
<b>Liguria</b>	44,7	33,4	10,4	6,6	5,0	100,0
<b>Emilia-Romagna</b>	52,4	31,9	8,2	4,2	3,3	100,0
<b>Toscana</b>	53,6	30,2	7,8	4,7	3,6	100,0
<b>Umbria</b>	60,8	27,9	5,6	2,8	2,9	100,0
<b>Marche</b>	63,4	26,6	5,5	2,5	2,0	100,0
<b>Lazio</b>	32,4	28,7	13,2	12,7	13,2	100,0
<b>Abruzzo</b>	59,2	28,0	5,9	3,4	3,5	100,0
<b>Molise</b>	64,9	22,7	4,8	4,0	3,7	100,0
<b>Campania</b>	49,7	30,2	8,3	6,3	5,5	100,0
<b>Puglia</b>	59,6	27,2	5,5	4,0	3,7	100,0
<b>Basilicata</b>	60,2	24,4	5,7	4,8	4,8	100,0
<b>Calabria</b>	59,4	27,2	5,3	4,2	4,0	100,0
<b>Sicilia</b>	54,0	30,6	6,8	4,6	4,0	100,0
<b>Sardegna</b>	57,9	27,9	6,4	4,6	3,2	100,0
<b>Italia</b>	<b>50,4</b>	<b>29,7</b>	<b>8,6</b>	<b>6,1</b>	<b>5,2</b>	<b>100,0</b>

Tabella 1-1 Popolazione residente in famiglia che si sposta giornalmente per motivo di lavoro -tempo impiegato e regione- Censimento 2011 (valori percentuali). (ISTAT 2013)

Regioni	Fino a 15	Da 16a 30	Da 31 a 45	Da 46 a 60	Oltre 60	Totale
<b>Piemonte</b>	63,7	19,3	6,6	5,3	5,1	100,0
<b>Valle d'Aosta</b>	70,8	18,9	4,9	3,4	2,0	100,0
<b>Lombardia</b>	63,5	18,6	7,0	5,9	5,0	100,0
<b>Provincia Autonoma di Bolzano</b>	65,1	20,0	6,4	4,6	3,9	100,0
<b>Provincia Autonoma di Trento</b>	63,9	19,6	7,1	4,9	4,5	100,0
<b>Veneto</b>	63,2	18,7	7,1	5,6	5,4	100,0
<b>Friuli-Venezia Giulia</b>	62,6	21,6	7,1	5,0	3,8	100,0
<b>Liguria</b>	61,4	22,4	6,6	4,9	4,7	100,0
<b>Emilia-Romagna</b>	65,7	19,1	6,5	4,7	4,1	100,0
<b>Toscana</b>	64,5	19,6	6,2	5,1	4,5	100,0
<b>Umbria</b>	66,0	20,0	6,2	4,3	3,5	100,0
<b>Marche</b>	67,2	18,8	7,0	4,2	2,9	100,0
<b>Lazio</b>	56,0	22,7	7,5	6,7	7,1	100,0
<b>Abruzzo</b>	62,6	22,3	6,4	4,7	4,0	100,0
<b>Molise</b>	69,2	18,9	4,9	3,9	3,1	100,0
<b>Campania</b>	64,6	20,3	4,9	5,0	5,1	100,0
<b>Puglia</b>	70,6	18,1	4,4	3,7	3,1	100,0
<b>Basilicata</b>	68,4	17,7	5,2	4,6	4,1	100,0
<b>Calabria</b>	66,7	19,8	5,0	4,1	4,3	100,0
<b>Sicilia</b>	68,2	19,9	4,7	3,8	3,4	100,0
<b>Sardegna</b>	65,8	20,3	5,7	4,7	3,5	100,0
<b>Italia</b>	<b>64,4</b>	<b>19,7</b>	<b>6,1</b>	<b>5,1</b>	<b>4,7</b>	<b>100,0</b>

Tabella 1-2 Popolazione residente in famiglia che si sposta giornalmente per motivo di studio -tempo impiegato e regione- Censimento 2011 (valori percentuali). (ISTAT 2013)

### 1.1.2 I NUOVI MODELLI FAMILIARI

Il modello familiare tradizionale ha costituito fino ad oggi il target unico di riferimento per il progetto residenziale. È necessario però considerare che la famiglia si sta evolvendo in modo rapido e sostanziale. Il modello familiare è stata e continua ad essere l'unità base e il nucleo fondamentale della società, ma ha subito cambiamenti importanti nella sua definizione riguardo ad aspetti come la sua funzione, composizione e natura. Analizzando alcuni dati dell'Ente ISTAT si può dire che negli anni si sia verificata, in generale, una grande crescita del numero di famiglie a fronte di una forte riduzione del numero medio dei suoi componenti. Questo pare rappresentativo dei mutamenti della struttura della popolazione e direttamente conseguenziale al suo invecchiamento. La struttura della famiglia diventa più semplice, diminuiscono le nascite, ma la maggior parte delle coppie ha un figlio, ci si sposa di meno e più tardi e il cambiamento avviene in un contesto di evidenti differenze tra le varie regioni italiane, ovvero aumentano i "single" e le famiglie mono-paternali.<sup>5</sup>

TIPOLOGIE	Anni									
	1988		1994-1995		1998-1999		2002-2003		2006-2007	
	migliaia	%								
<b>FAMIGLIE SENZA NUCLEI</b>	4.116	20,7	4.744	22,9	6.029	27,2	6.592	28,4	6.592	28,4
Una persona sola	3.832	19,3	4.369	21,1	5.624	25,4	6.121	26,4	6.121	26,4
<b>FAMIGLIE CON UN NUCLEO</b>	15.510	78,0	15.773	76,0	15.800	71,5	10.342	70,4	16.342	70,4
Un nucleo senza altre persone	15	74,1	14.955	72,1	14.985	67,5	15.510	66,8	15.510	66,8
Coppie senza figli	3.534	17,8	3.914	18,9	4.250	19,2	4.687	20,2	4.687	20,2
Coppie con figli	9.810	49,4	9.470	45,6	9.049	40,8	8.967	38,6	8.957	38,6
Un solo genitore con figli	1.372	6,9	1.571	7,6	1.685	7,6	1.867	8,0	1.867	8,0
Un nucleo con altre persone	793	4,0	818	3,9	881	4,0	832	3,6	832	3,6
Coppie senza figli	169	0,9	224	1,1	286	1,3	259	1,1	259	1,1
Coppie con figli	535	2,7	479	2,3	446	2,0	427	1,8	427	1,8
Un solo genitore con figli	89	0,4	115	0,6	148	0,7	146	0,6	146	0,6
<b>FAMIGLIE CON DUE O PIU' NUCLEI</b>	247	1,2	236	1,1	292	1,3	282	1,2	282	1,2
<b>Totale</b>	<b>19.872</b>	<b>100,0</b>	<b>20.753</b>	<b>100,0</b>	<b>22.187</b>	<b>100,0</b>	<b>23.216</b>	<b>100,0</b>	<b>23.216</b>	<b>100,0</b>

Tabella 1-3 Famiglie per tipologia- Anno 1988, Medie 1994-1995, 1998-1999, 2002-2003, 2006-2007 (valori in migliaia per 100 famiglie). (ISTAT 2013)

NUMERO DI COMPONENTI	Anni				
	1988	1994-1995	1998-1999	2002-2003	2006-2007
<b>UNO</b>	19,3	21,1	22,2	25,4	26,4
<b>DUE</b>	23,6	25,4	26,2	25,8	27,5
<b>TRE</b>	23,1	23,3	22,9	22,0	21,8
<b>QUATTRO</b>	23,3	21,8	21,0	20,0	18,2
<b>CINQUE</b>	7,9	6,4	6,0	5,4	4,7
<b>SEI O PIU'</b>	2,9	2,0	1,7	1,4	1,4
<b>Totale</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Tabella 1-4 Famiglie per numero di componenti -Anno 1988, Medie 1994-1995, 1998-1999, 2002-2003, 2006-2007 (per 100 famiglie). (ISTAT 2013)

Sono cambiati anche i ruoli dei vari soggetti all'interno del nucleo familiare, in quanto le donne sono sempre più inserite nel mondo del lavoro, con una conseguente lontananza di entrambi i coniugi da casa e l'assenza di un riferimento per le persone anziane che vivono sempre più spesso

sole. Di conseguenza sono cambiate le attività all'interno della casa, le abitudini e le modalità di vivere l'abitazione stessa.

Si modifica quindi il nucleo familiare "standard" che era costituito solitamente da due coniugi con due figli. Non può pertanto essere più preso a riferimento per il progetto residenziale essendosi formati in parallelo innumerevoli altri tipi di utenza che non sono più secondari, ma ampiamente diffusi.

---

### 1.1.3 IL TEMA DELL'INDIVIDUALITÀ

---

All'interno di questo quadro si delinea *"la figura di un individuo che necessita di libertà di scelta, di movimento, di consumo; un individuo che non si riconosce più all'interno delle certezze del moderno, nell'identificazione dell'idea di collettività. Questa nuova figura sociale nasce e vive all'interno delle logiche della metropoli il cui spazio è attraversato da infiniti percorsi individuali, il cui spazio è lo spazio del consumo, dell'annientamento dei valori e dei fini comuni per l'esaltazione dei desideri di ognuno"*.<sup>6</sup> Aumenta dunque l'individualità del singolo, che vive però all'interno di una società anonima, per tutti e che può esprimere il proprio individualismo solamente nello spazio della casa che è il luogo sacro della libertà e della identità. Le ricerche che affrontano il tema dell'individualità si contano ormai numerose in tutti gli ambiti: sociologico, antropologico, economico e di mercato. Da queste emerge sempre chiaramente che il rapporto fra lo spazio privato e lo spazio pubblico sta drasticamente cambiando e che oggi il concetto di casa di abitazione è interpretato con maggiore soggettività. Le scelte abitative degli individui sono quindi più consapevoli che in passato e gli utenti preferiscono costruire la propria casa "su misura" modellando lo spazio a loro immagine e somiglianza. Emerge, in questo contesto, il tema della "personalizzazione di massa" che, se già è cardine di settori come l'elettronica e l'automotive, storicamente fatica ad essere accolto dall'edilizia. Non più l'"offerta" che propone e impone il modello abitativo ma la "domanda" che contribuisce alla fase di progettazione personalizzandolo secondo le proprie esigenze.<sup>7</sup>

In sostanza gli aspetti e i fenomeni sociali che si ritengono significativi, esemplificativi di un cambiamento nel modo di abitare, sono la sempre più diffusa mobilità territoriale, la trasformazione del nucleo familiare tradizionale e la crescente esigenza di individualità. Considerando quindi queste "nuove" tendenze, il termine abitare deve intendersi nell'accezione più ampia di "vivere la residenza" e la ricerca in questo ambito dovrebbe mirare a dei risultati funzionali al soddisfacimento di queste esigenze.

---

## 1.2 FLESSIBILITA'

---

Pensare lo spazio flessibile significa riferirsi ad uno spazio capace di adattarsi alle più diverse esigenze individuali e collettive. Si intende la “flessibilità” come la capacità di uno spazio di modificare le sue proprietà geometriche nel tempo. Queste qualità rendono la casa stessa un “meccanismo variabile”, con infinite possibilità combinatorie all’interno di un medesimo standard. Lo spazio “customizzabile” diventa vivo e dinamico e permette ad ognuno di ritagliarsi il proprio habitat domestico su misura e di modificare lo spazio in cui vive a seconda delle necessità attuali, che cambieranno continuamente col trascorrere del tempo.

Alcuni semplici esempi sono esplicitivi dell’evoluzione dei bisogni d’utilizzo degli spazi in una residenza nel corso di seppur brevi periodi di tempo. La camera dei figli, ad esempio, viene sfruttata in modo completamente diverso durante gli anni dell’infanzia, dell’adolescenza e della maturità. La cucina, un tempo solamente luogo di servizio, destinato unicamente all’atto della preparazione dei pasti, diviene oggi luogo di incontro, di ricevimento di ospiti e amici, destinato allo sviluppo delle relazioni sociali. Lo spazio che il progettista è chiamato a concepire deve essere in grado di assecondare i bisogni presenti e futuri, quindi non prevedibili, di un nucleo familiare concepito non più in termini statici ma dinamici.

Le condizioni di dinamicità devono essere parte integrante del DNA del progetto e difficilmente possono aggiungersi in seguito, perché coinvolgono la progettazione dello spazio architettonico, la relazione fra i vari elementi che costituiscono il progetto, l’involucro, le partizioni interne, le dotazioni impiantistiche in tipologia, posizionamento ed accessibilità e, non ultimo, il sistema strutturale.

La flessibilità è declinabile in diversi modi, ma se ne possono distinguere diverse tipologie relativamente ad un sistema edilizio:

- Flessibilità d'uso: indica la capacità degli ambienti di accogliere nel tempo diverse esigenze di utilizzo, di permettere cioè l'alternarsi di attività che l'utenza può svolgere all'interno degli spazi di progetto.
- Flessibilità spaziale: è la capacità dello spazio di variare nella sua composizione interna o anche esterna, permettendo aumenti o riduzioni di superficie o di volume degli ambienti o dell'organismo edilizio nel suo complesso.
- Flessibilità costruttiva: è la capacità dei singoli elementi che compongono l'edificio di essere modificati o sostituiti senza intaccare le altre parti che non sono oggetto di variazione. Questa

caratteristica è molto importante per permettere la manutenibilità dell'edificio, con particolare incidenza sulla durabilità e qualità dello stesso.

- Flessibilità tecnologica: riguarda la versatilità e l'accessibilità dei sistemi tecnologici e impiantistici, e la loro capacità di essere modificabili nel tempo considerando anche l'eventualità di una parziale o completa sostituzione senza coinvolgere le restanti parti dell'edificio.
- Flessibilità climatica: consiste nella capacità dell'edificio di variare le proprie caratteristiche qualitative per riuscire ad adattarsi ciclicamente alle condizioni ambientali in continuo mutamento.

Tutti questi aspetti in cui è riconoscibile il carattere di flessibilità possono essere integrati all'interno di un progetto architettonico ciascuno singolarmente oppure contemporaneamente, poiché ciascuno dotato di una propria specificità, unica e riconoscibile, che contribuisce a caratterizzare il progetto. Alcuni possono rivelarsi più intuitivi di altri, ma ciascuno di questi deve costituire parte integrante del processo progettuale e non può essere “forzato” a posteriori. Il compito del progettista si fa quindi più arduo, poiché non si limita all'elaborazione stilistica e strutturale, ma deve essere in grado di sintetizzare questa nuova concezione flessibile dell'abitare all'interno dello spazio domestico.

---

### 1.2.1 MODELLI

Gli aspetti che riguardano la flessibilità tecnologica e climatica stanno avendo recentemente un forte impulso innovativo, legato alla veloce innovazione e al potenziamento delle soluzioni tecniche e impiantistiche degli ultimi decenni. Il tema della flessibilità intesa dal punto di vista spaziale e di destinazione d'uso ha, invece, un excursus storico più radicato nel tempo.

Numerose sperimentazioni, infatti, sono state fatte in questo senso nel XX secolo e fra queste una delle prime si può far risalire a R. B. Fuller<sup>8</sup> con la sua Dymaxion House degli anni '30 (Figura 1-1). Si tratta di una casa ad alta efficienza, leggera, estremamente economica e “montabile” con facilità; la casa è dotata di numerose innovazioni funzionali nel mobilio e nell'impiantistica ed è coperta da una struttura sferica sagomata in analogia alla campana delle meduse, capace di ruotare sul proprio asse per sfruttare la ventilazione naturale per il condizionamento. La struttura della casa era progettata per essere contenuta interamente in due contenitori cilindrici, facilmente trasportabili, mentre gli arredi si sarebbero potuti acquistare dai rivenditori locali. La Dymaxion rappresenta un esperimento del tutto radicale, inserito in un contesto progettuale e filosofico più ampio, e deriva

principalmente dall'evoluzione degli studi sulla Dymaxion Car, un'auto innovativa su cui Fuller ha lavorato per molti anni.

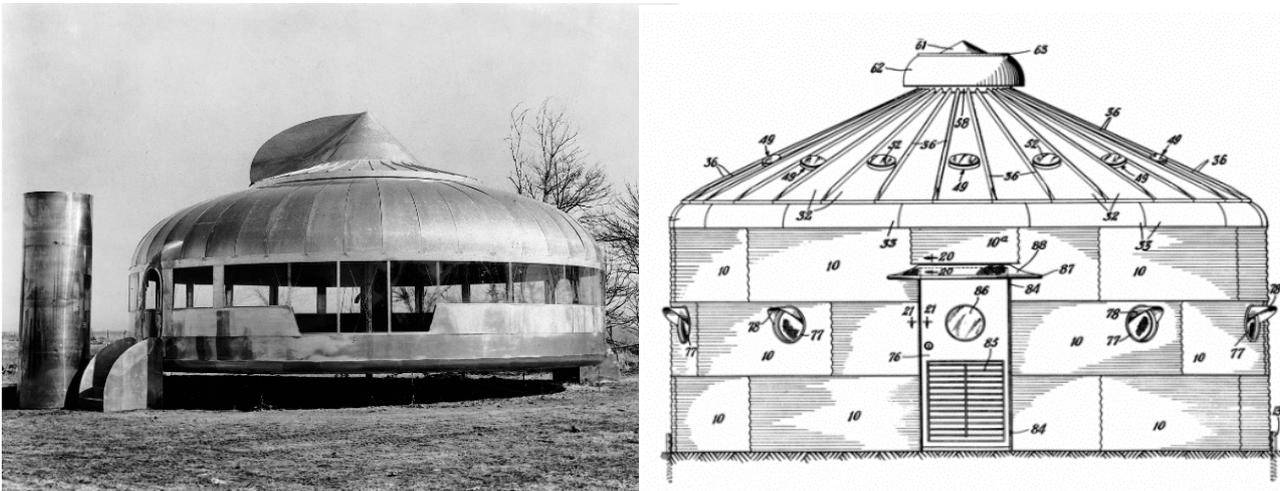


Figura 1-1 Dymaxion House, R. B. Fuller (<https://www.inverse.com/article/13715-forget-geodesic-domes-buckminster-fuller-s-dymaxion-house-was-his-masterpiece> - <http://www.archdaily.com/401528/ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller/51dedd14e8e44e6873000002-ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller-image>)

Un'altra importante figura dello scorso secolo che ha contribuito notevolmente alla sperimentazione su questi temi è stato Jean Prouvé<sup>9</sup>, un architetto e designer francese. A partire dagli anni '20 il suo nome è sinonimo dell'avanguardia nella ricerca sugli edifici prodotti industrialmente e nel 1936-38 egli realizza la *Maison du Peuple* di Clichy in Francia (Figura 1-2).



Figura 1-2 La Maison du Peuple, Clichy (au moment de son ouverture en 1939) Photo © Musée in Commune Roma

Questa diviene internazionalmente riconosciuta come il manifesto dell'edificio-macchina, interamente fabbricato in officina. Pur non trattandosi di un edificio residenziale è particolarmente

significativo. Per realizzarlo si fece ricorso alla prefabbricazione studiando approfonditamente le modalità di assemblaggio. L'inserimento di pareti-tenda non strutturali, inoltre, ben si innesta nel tema della flessibilità d'uso. L'edificio vede, infatti, la compresenza di una Casa del Popolo, con le peculiari funzioni di sala riunioni-feste, proiezioni cinematografiche, uffici per le rappresentanze sindacali e di un mercato di quartiere. La risposta progettuale ad un programma estremamente complesso è una macchina architettonica capace di rispondere, attraverso la variabilità della disposizione degli elementi, alle molteplici esigenze di funzionamento. Tetto, pavimento e componenti interne sono pensati come elementi mobili che articolano lo spazio utilizzando al massimo la superficie a disposizione. L'intero complesso è concepito sulla base dei principi di flessibilità, trasformabilità e intercambiabilità che si ripercuotono dall'impianto strutturale a telaio, all'impiego di materiali leggeri, fino al più piccolo dettaglio.

Si possono annoverare anche esperimenti più recenti, i quali sono sempre più numerosi, in alcune realizzazioni di strutture residenziali in cui si riscontra un possibile dialogo aperto sul tema e un tentativo condiviso di scoprire i nuovi modi di abitare la residenza e la città. Diverse sperimentazioni in questo senso sono state fatte da MVRDV<sup>10</sup>. Tra queste le due più significative sono il *Silodam* di Amsterdam (Figura 1-3) e il *Mirador* a Madrid del 2004 (Figura 1-4).



Figura 1-3 MVRDV, *Silodam*, Amsterdam. (1995-2003) (<https://www.mvrdiv.nl/en/projects/mirador>)

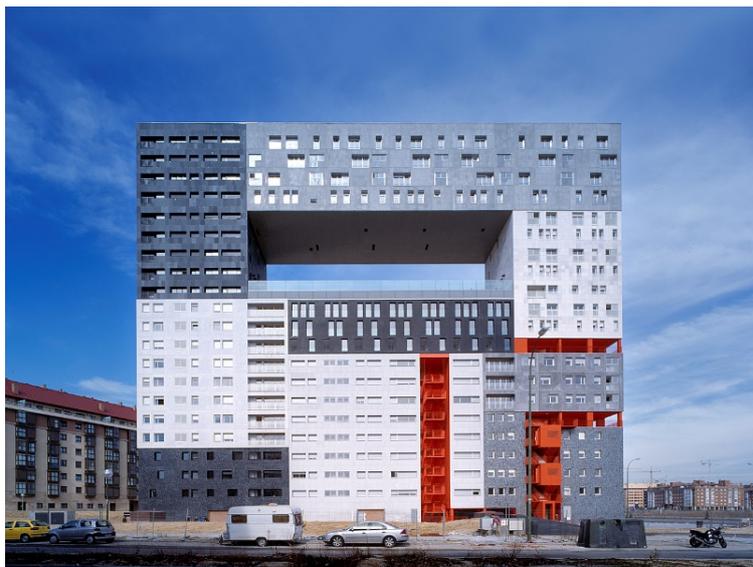


Figura 1-4 MVRDV, *Mirador*, Madrid. (2001-2002) (<https://www.mvrdv.nl/en/projects/mirador>)

I progettisti propongono soluzioni complesse e articolate dando vita a macro edifici costituiti da un alto grado di differenziazioni tipologiche, spaziali, variando l'uso dei materiali così da identificare e assecondare diversi tipi di utenze. L'obiettivo dichiarato è sostanzialmente quello di integrazione di diversi gruppi sociali rimanendo fedeli al rispetto della privacy e del comfort di ogni individuo.



Figura 1-5 Steven Holl - *Void space / Hinged space*, Housing in Fukuoka, Japan. (1991) - esterni (<http://www.stevenholl.com/projects/fukuoka-housing>)

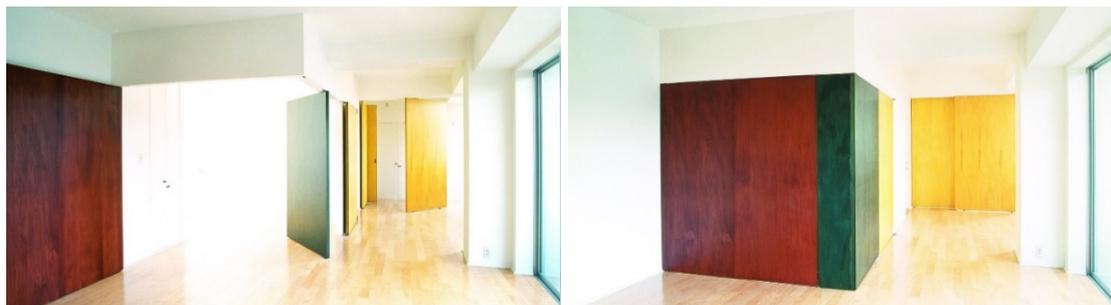


Figura 1-6 Steven Holl - Void space / Hinged space, Housing in Fukuoka, Japan. (1991) - interni (<http://www.stevenholl.com/projects/fukuoka-housing>)

Steven Holl<sup>11</sup> sperimenta le nuove forme dell'abitare negli interni del complesso residenziale a Fukuoka in Giappone, in cui realizza appartamenti dalla configurazione mutevole, con spazi indeterminati e non fissi. Gli interni cioè sono modificabili, interattivi, regolati da “*participating walls*” (o muri a cerniera) che si possono spostare a piacimento fino a scomparire completamente, per modificare le superfici degli ambienti interni in funzione delle attività svolte e allo scorrere del tempo nella giornata (Figura 1-5). Il complesso, con una forma a pettine distribuita su tre livelli di ballatoi, contiene 28 duplex ciascuno dei quali che si affaccia sul paesaggio a 360°.

Anche Shigeru Ban<sup>12</sup> realizza un'abitazione a Yamanashi in Giappone, detta “*Furniture House*” completamente flessibile, con la possibilità di inserimento di stanze mobili che riconfigurano continuamente l'ambiente. Gli elementi di suddivisione verticale sono formati da unità d'arredo prefabbricate, a tutta altezza e ulteriori ambienti si definiscono attraverso armadi e librerie (Figura 1-7 e Figura 1-8).



Figura 1-7 Shigeru Ban, FURNITURE HOUSE 1 - Yamanashi, Japan, 1995 - esterni ([http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995\\_furniture-house-1/index.html](http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html))



Figura 1-8 Shigeru Ban, FURNITURE HOUSE 1 - Yamanashi, Japan, 1995 - fasi di Costruzione  
[http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995\\_furniture-house-1/index.html](http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html)

Un altro esempio di architettura contemporanea che fa riflettere sui temi della flessibilità abitativa è la sperimentazione di Quinta Monroy realizzato ad Iquique, in Chile, dallo studio Elemental<sup>13</sup>. Il progetto nasce in un contesto in cui le risorse materiali sono esigue e prevede la collocazione di 100 famiglie in un'area occupata illegalmente da trent'anni, con particolare attenzione al rispetto dei modelli insediativi e alle modalità di vita dell'utenza. Il complesso è realizzato con un'unica tipologia, di 30mq di superficie, che alterna pieni e vuoti e permette un futuro ampliamento dell'abitazione fino a 72mq per unità (Figura 1-9).

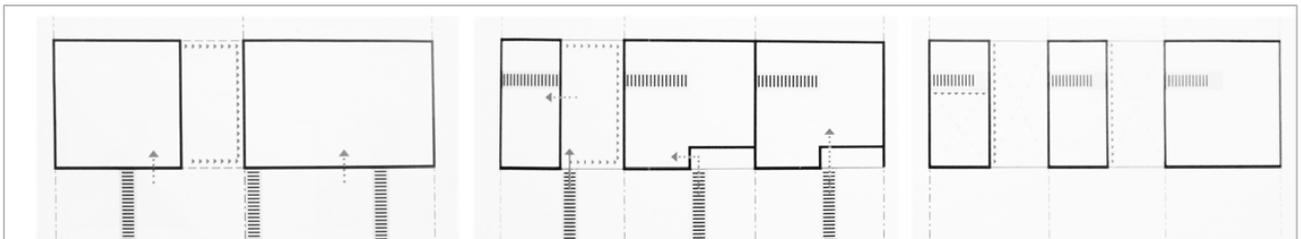


Figura 1-9 Quinta Monroy, social housing, Chile, Studio Elemental, 2003-2005 - Schema distributivo e possibili espansioni: piano terra, piano primo e secondo in duplex

La possibilità di estensione, progettata a priori, invita alla libertà di personalizzazione della propria abitazione, la quale può avvenire con una certa libertà stilistica, e permette all'utenza di "fare proprio" il progetto e di soddisfare le proprie esigenze (Figura 1-10).



Figura 1-10 Quinta Monroy, social housing, Chile, Studio Elemental, 2003-2005 – Variazioni volumetriche nel tempo  
[\(http://www.elementalchile.cl/en/projects/quinta-monroy/\)](http://www.elementalchile.cl/en/projects/quinta-monroy/)

Un altro genere di progetto prefabbricato a basso costo, che richiama il tema della flessibilità, è l'innovativo progetto realizzato da Ikea (avviato nel 1996) in collaborazione con Skanska, multinazionale svedese nel campo delle costruzioni, che prende il nome di BoKlok, che significa “vivere bene” in svedese. Si tratta di case prefabbricate, non troppo costose e con montaggio realizzabile in maniera semplice (Figura 1-11).



Figura 1-11 Ikea & Skanska, Boklok. Procedura di installazione. <https://medium.com/@bartholomewhearn/the-flat-pack-taken-to-the-next-level-the-boklok-concept-26078e433b3f>

Realizzati in legno, con un sistema costruttivo a sandwich, i pannelli che compongono la casa sono facilmente trasportabili, ed assemblabili in cantiere, con riduzione dei costi e salvaguardia della qualità e dell'ambiente. Il progetto prevede un layout comune di base, flessibile e differenziato in

relazione al numero di camere da letto presenti (una o due) e le finiture e gli spazi interni sono interamente personalizzabili, all'insegna del comfort domestico e delle inclinazioni individuali (Figura 1-12).



Figura 1-12 Ikea & Skanska, Boklok. Differenti declinazioni del sistema. (<https://www.boklok.com/about-the-BoKlok-concept/>)

I modelli di abitazione, appartamenti in palazzine fino a quattro piani, o villette, sono visionabili nel catalogo, ed hanno dei prezzi tra i 25.000 ed i 45.000 euro. Ogni appartamento comprende una o due camere da letto, cucina arredata, bagno con doccia e ripostiglio. Le stanze possono essere assemblate a piacimento e verniciate da operai specializzati in meno di un mese. Le abitazioni sono “smart” e cercano pertanto, nell’idea del progetto, di essere adatte e fatte su misura per i bisogni della famiglia moderna.

È opportuno riportare anche un esempio di edilizia prefabbricata in legno. Il legno è uno tra gli elementi più amati sia dai costruttori e professionisti del settore, sia dai clienti e proprietari di casa. Questo materiale è forse l’unico davvero rinnovabile, visto il suo ciclo produttivo oltre ad avere proprietà fisiche davvero interessanti. Il mercato dell’edilizia realizzata con elementi prefabbricati in legno si sta ampliando sempre più e una delle aziende leader in questo campo è la Rubner<sup>14</sup>. Gli stili adottati dal colosso altoatesino spaziano dal gusto locale tirolese al segno contemporaneo mentre la produzione combina tecniche costruttive tradizionali e i più moderni standard di efficienza energetica. Ecologici anche i materiali utilizzati per le finiture: intonaco minerale, sughero, fibra e assi di legno, cellulosa, canapa, cartongesso e fibrogesso e la garanzia CasaClima è assicurata in ogni modello abitativo. Personalizzazione e flessibilità sono le parole chiave declinando le realizzazioni con differenti stili, non necessariamente a richiamo della classicità altoatesina, e affidando realizzazioni ad architetti e designer di fama internazionale. Tra i progettisti che maggiormente collaborano con

l'azienda vi è l'architetto Matteo Thun<sup>15</sup>, un maestro del costruire ecosostenibile. Uno fra i suoi progetti più importanti realizzati da Rubner House è il modello abitativo a Heidis nel 1999 Prefab House (Figura 1-13).



Figura 1-13 Matteo Thun, Prefab Heidis House (1999) (<https://www.designboom.com/interviews/designboom-interview-matteo-thun/>)

Questo è un piccolo repertorio di “architetture flessibili” e le sperimentazioni in questo campo sono sempre più numerose. In tutti questi esempi si riscontra un filo conduttore osservando come *“nell’impianto interno il concetto moderno di pianta libera, applicato alla disposizione planimetrica dei diversi ambienti monofunzionali rispetto agli elementi fissi della struttura, è sostituito da quello di pianta libera di cambiare”*.<sup>16</sup>

---

### 1.3 TEMPORANEITA’

---

Negli ultimi anni si è verificata una progressiva affermazione della “*demolibilità*” degli edifici e la tradizionale idea dell’edificio “*imperituro*”, destinato a durare nel tempo il più a lungo possibile, sta decisamente evolvendo e si sta sovrapponendo alla nuova concezione secondo cui la sopravvivenza dei prodotti dell’attività edilizia debba essere circoscritta ad un determinato periodo.

In particolare la questione è incentrata sulla definizione del ciclo di vita utile di un edificio e sulla individuazione dei suoi limiti temporali. Il concetto di permanenza è associato alla visione “*tradizionale*” dell’architettura e si riferisce all’idea di durata, di conservazione e di manutenzione. Queste caratteristiche discendono dalla volontà di costruire edifici durevoli, che possano resistere alle insidie del tempo, mantenendo inalterate le proprie performances. Il carattere di permanenza manifesta anche l’esigenza dell’uomo di rappresentare con l’opera architettonica valori simbolici

trasmissibili nel tempo, portatori del patrimonio culturale e storico della società. In questo quadro, la eventuale demolizione non è mai stata premeditata o prevista, ma in realtà è sempre esistita ed anzi oggi è avvertita, in alcuni contesti, come necessaria.

Il nostro patrimonio edilizio è costituito in gran parte da case inerti e costose, oggetti che non è facile modificare, distruggere e ricostruire. Queste costruzioni sono diventate, col trascorrere del tempo, obsolete, per nulla efficienti, scomode e spesso inadatte allo svolgimento delle funzioni che ospitano. In questo quadro il tema del recupero edilizio di edifici, quand'anche privi di un particolare pregio storico-culturale, presenta un grande potenziale di rinnovamento, in quanto è più “comodo” recuperare che demolire. Assunta come dato di fatto questa situazione ci si chiede se non sia necessario adoperare un'inversione di rotta, per non continuare a commettere gli errori del passato. I paradigmi della demolibilità e della riciclabilità programmata diventano un connotato fondamentale per l'edilizia “nuova” e innovativa.

*“Un'architettura oggetto d'uso, 'simply tool', che vive quando serve per poi essere capace di dissolversi dopo aver reso il suo servizio”.<sup>17</sup>*

A questo punto è necessario precisare però, che temporaneità e transitorietà non devono essere intesi come sinonimo di scarsa qualità. Al contrario, un edificio dotato di queste caratteristiche sarà sempre “*al passo con i tempi*” e potenzialmente efficiente proprio perché sarà in grado di modificarsi e migliorarsi nel costantemente tempo. Si mira ad una “*temporaneità durevole*” in cui si può prolungare il ciclo di vita dell'edificio preservandone allo stesso tempo gli standard di qualità. Nell'eventualità o nel momento in cui questo non sarà più necessario, potrà essere dismesso con facilità e senza lasciare tracce indesiderate sull'ambiente e sul contesto circostante, preservando il valore del suolo su cui era stato edificato.

I caratteri di temporaneità nei modi di concepire il progetto e la costruzione dell'architettura sono riconducibili schematicamente a tre differenti aspetti:

- Temporaneità d'uso: questa è strettamente connessa alle attività che si svolgono in un ambito spaziale nel quale si possono succedere modalità di utilizzo diverse in sequenze temporali anche molto brevi. Nel medio-lungo periodo; dà luogo a sistemi, spaziali e tecnologici che subiscono trasformazioni di assetto attraverso interventi di differente livello di consistenza e complessità.

- Temporaneità di localizzazione: riguarda la variabilità del rapporto tra il contesto e l'organismo abitativo e si riferisce al carattere mobile o trasferibile dei manufatti in luoghi diversi.
- Temporaneità di costruzione: denota il carattere biunivoco tra il sistema edilizio e il suo uso e prefigura la possibilità di dismissione delle risorse materiali impiegate nell'opera.

Ovviamente questi tre aspetti della temporaneità possono anche sovrapporsi e le caratteristiche dell'uno si sommano e si integrano con quelle dell'altro.

---

### 1.3.1 MODELLI

L'abitare temporaneo costituisce attualmente una risposta a diverse condizioni abitative. Trova applicazione in situazioni di emergenza a seguito di eventi catastrofici (post-terremoto, post-inondazioni, post-eventi bellici) o nella realizzazione di alloggi temporanei per immigrati e richieste di collocazione nel territorio di popolazioni nomadi. Può dare risposta a richieste stagionali di ospitalità turistica e nella ricettività per manifestazioni o grandi eventi di carattere culturale o sportivo. Risponde in parte alle istanze del nomadismo forzato per necessità lavorative o alla domanda di residenze provvisorie per studenti fuorisede o pendolari.

In molti di questi casi, le costruzioni avviate con carattere transitorio diventano, in ragione di opportunità speculative, permanenti e definitive, creando notevoli problemi negli utenti che sono costretti a subire una dilatata situazione di incertezza. Non deve essere questo l'approccio da utilizzare. L'architettura temporanea, più in generale, deve essere vista come un nuovo approccio al progetto, fondamentale in una società che è costantemente in movimento. L'eventualità di poter spostare la propria abitazione sul territorio si configura quindi come un'opportunità innovativa, in parte utopistica, ma che ha già avuto e continua ad avere un notevole campo di sperimentazione. Ci si riferisce dunque ad un contesto più ampio, che supera il carattere particolare di un singolo evento, ma si tratta di un processo di trasformazione del concetto stesso di fare architettura. Già l'architetto americano R. B. Fuller negli anni '30 aveva chiaro questo concetto e sosteneva che l'architettura *“si dissolverà in un processo sinergico senza fine ed entrerà a far parte del continuo fluire delle trasformazioni, integrazioni, ibridazioni”*. Questo è il senso che si vuole dare alla nuova architettura *“temporanea e transitoria”*.

Si possono rintracciare, nella storia dell'architettura contemporanea, diverse ricerche su questo argomento. Negli anni '90 P. Spadolini<sup>18</sup> denunciava la carenza di soluzioni di carattere

innovativo e dinamico nel settore della tipologia abitativa e nel 1984 progetta il modulo MAPI, acronimo di Modulo Abitativo di Pronto Impiego (Figura 1-14).

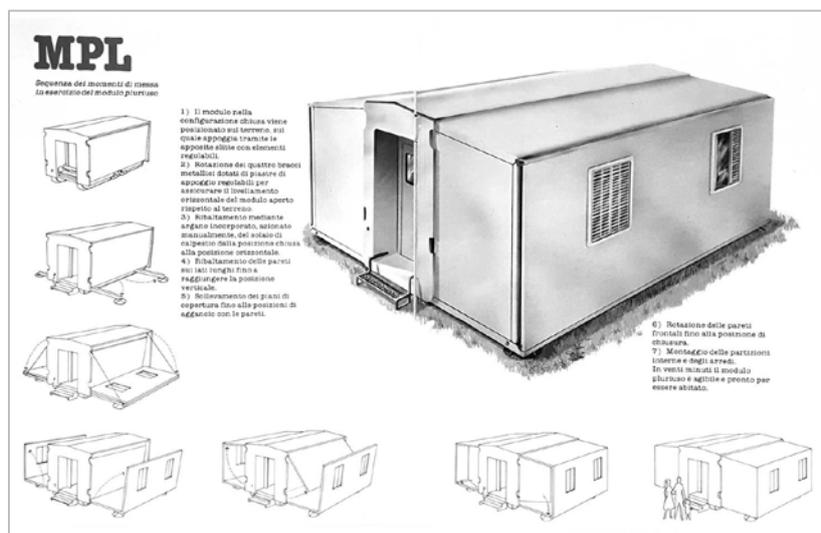


Figura 1-14 P. Spadolini, MAPI Modulo Abitativo di Pronto Impiego (1984). Meccanismo di trasformazione.

(<http://ordine.architettiliroma.it/archivio-50-anni/polidori-massimo/>)

Il progetto nasce per soddisfare un'esigenza del Ministero della Protezione Civile di disporre di un tipo di edilizia provvisoria, trasportabile e recuperabile, totalmente prefabbricata e dotata dei comfort e dell'immagine di una casa tradizionale. Il MAPI è a tutti gli effetti un'abitazione, dotata di uno spazio interno aperto e flessibile, completamente indipendente dal punto di vista impiantistico, posizionabile su qualsiasi tipo di terreno, che non necessita di alcun tipo di cantiere e dotata di un sistema meccanico che ne permette l'ampliabilità tramite rotazioni (si può aprire in circa 20 minuti senza dover ricorrere a personale specializzato). Il progetto si accompagna ad altri moduli plurifunzionali insieme ai quali è possibile allestire un intero insediamento completamente autonomo e dotato di tutti i servizi necessari (progetto SAPI). L'architetto era fermamente convinto delle possibilità di rinnovamento dell'architettura e parla, non solo in merito a questo progetto, di *“nuovi modelli abitativi caratterizzati da prestazioni d'uso innovative e rivolte a risolvere problemi di facile gestione e manutenzione di spazi residenziali concepiti anche con criteri di trasferibilità sul territorio per una popolazione sempre più nomade”*.

Un altro esperimento sul tema della trasformabilità e sui caratteri temporanei dell'edilizia residenziale, oltre che tra i più utopistici e provocatori, è il progetto MDU Harbors (Figura 1-15), realizzato nel 2003, dallo studio LOT-EK<sup>19</sup>. Gli architetti si soffermano spesso sull'utilizzo di sottoprodotti industriali modulari, sia in uso che dismessi come vagoni per il trasporto di merci, cisterne e betoniere. Per questo progetto utilizzano l'oggetto-container per fare architettura attraverso

un processo di ri-significazione di un oggetto banale e nel contempo affascinante. Questo viene manipolato per conferire ad esso una nuova funzione e qualità architettoniche.



Figura 1-15 LOT-EK, MDU Harbors (2003). Esterni. (<http://www.lot-ek.com/MDU-Mobile-Dwelling-Unit>)

Il container viene trasformato in una unità abitativa mobile che costituisce un grande mattone di un più grande complesso residenziale costituito da una semplice maglia metallica multipiano. All'interno di quest'ultima, dotata di appositi volumi di collegamento, i container possono essere collocati temporaneamente. La singola unità abitativa è ricavata a partire dall'oggetto di partenza, ritagliando le pareti metalliche laterali ed estrudendole, creando delle sporgenze aggettanti verso l'esterno del volume. Si ottiene così un ampliamento e una differenziazione dello spazio interno, in cui risultano riconoscibili degli spazi regolari, ciascuno dei quali assume una specifica funzione legata alle esigenze della residenza (cucina, zona notte, bagno) (Figura 1-16).



Figura 1-16 LOT-EK, MDU Harbors (2003). Interni. (<http://www.lot-ek.com/MDU-Mobile-Dwelling-Unit>)

Quando la casa “*viaggia*”, queste partizioni possono essere richiuse e il volume esterno ritorna ad essere quello iniziale, facilmente trasportabile. Gli architetti hanno pensato il progetto per “*quegli individui o quelle coppie che [...] gireranno il mondo per un certo numero di mesi o oppure vorranno una seconda casa che possa muoversi ovunque*”.

Tra le principali figure contemporanee che si sono dedicate all'architettura temporanea vi è poi anche l'architetto giapponese Shigeru Ban<sup>20</sup>. Durante la preparazione della scenografia per un'esposizione, è rimasto colpito dai mandrini cilindrici in cartone sui quali erano avvolti i pezzi di tessuto che aveva richiesto. Dopo una visita all'azienda produttrice dei tubi in cartone, l'architetto ha esplorato tutte le possibilità offerte da questo materiale a buon mercato elevando per la prima volta la carta al ruolo di materiale da costruzione.



Figura 1-17 Shigeru Ban, Paper Loghouse (1995) (<http://indayear2studio-1314s1.blogspot.it/2013/09/pins-case-study-shigeru-bans-paper-log.html#.WeR8CWi0OHs>)

Nel 1995, per aiutare le persone rimaste senza casa a causa del terremoto di Kobe, l'architetto ha ideato la Paper Loghouse (Figura 1-17), un'abitazione minima di 16 mq, la cui struttura portante, costituita da tubi in carta spessi 4 mm e larghi 10,8 cm, poggia su un quadrato di cassette di birra rinforzate da sacchi di sabbia, mentre il soffitto è coperto da un tetto di tela. Si è trattato di una risposta al bisogno essenziale di abitare, con un comfort ridotto al minimo. Le Paper Loghouses sono poi state installate nel parco Minamikomae a Kobe, poi in Ruanda, e in Turchia in seguito al terremoto di Ankara (1999-2000) ed hanno assunto anche un valore sociale.

La Paper tube structure, come è stato definito il sistema costruttivo in tubi di cartone, ha permesso a Ban di edificare anche altre tipologie di edifici tra cui lo spettacolare padiglione giapponese per l'esposizione universale di Hannover del 2000 (Figura 1-18) e la Cardboard Cathedral a Christchurch in Nuova Zelanda nel 2013 (Figura 1-19). L'architetto ha trovato con questa soluzione,

una risposta immediata all'esigenza imprescindibile dell'uomo di avere un tetto sulla testa, cioè una struttura che trae la sua forza da ciò che crediamo debole e troppo fragile, la carta.



Figura 1-18 Shigeru Ban, Padiglione per l'Expo, Hannover (2000) (<https://focusarchitettura.wordpress.com/2014/04/05/shigeru-ban-architettura-di-carta/>)

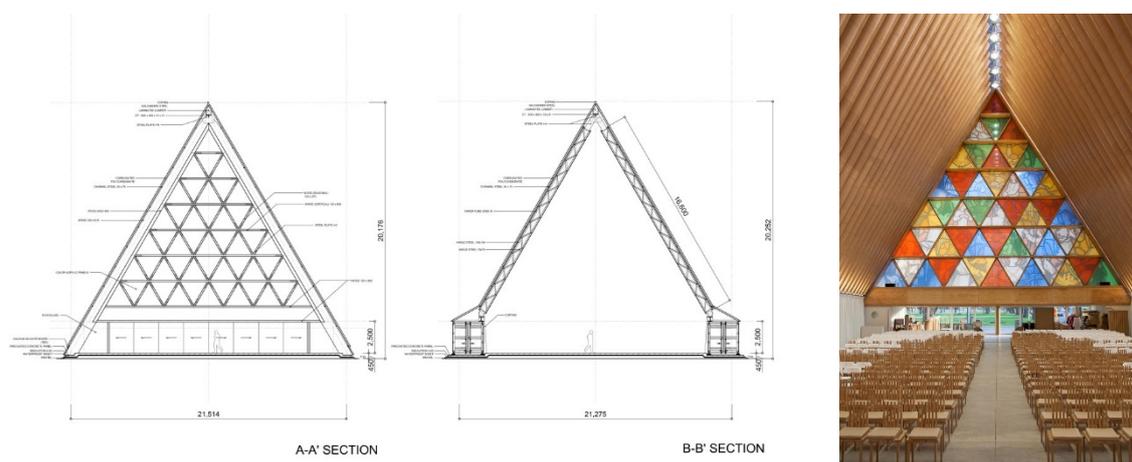


Figura 1-19 Shigeru Ban, Cardboard Cathedral, Christchurch, New Zealand (2013). (<http://www.archdaily.com/413224/shigeru-ban-completes-cardboard-cathedral-in-new-zealand>)

Riflessioni sul tema della temporaneità abitativa, unite all'attenzione per la sostenibilità, si ritrovano anche nel progetto Diogene (Figura 1-20). Si tratta di una micro-casa di 2,5 metri per 3 m, completamente green e autonoma energeticamente progettata da Renzo Piano<sup>21</sup>.

La piccola abitazione è stata battezzata Diogene proprio in omaggio al grande filosofo "cinico" greco che viveva in una botte per rifuggire dal superfluo. La cabina è trasportabile ovunque in quanto scollegata dalle reti locali e può contare su un impianto fotovoltaico, su un impianto solare termico e su un serbatoio per raccogliere l'acqua piovana.

Diogene è realizzata in legno di cedro e rivestita di alluminio. Celle e moduli fotovoltaici, un gabinetto biologico, ventilazione naturale, un serbatoio di acqua piovana e tripli vetri sono tra gli

elementi tecnologici che la rendono autosufficiente. All'interno la cabina offre tutti i comfort: un divano letto, una scrivania, una cucina, una doccia e un wc.

Diogene non è un capriccio d'architetto, come spiega lo stesso Piano, è un esperimento necessario che può essere utilizzato in molti modi. Quando smetterà i panni di prototipo in esposizione, la casa potrà essere usata come luogo di villeggiatura compatto e trasportabile oppure nelle situazioni di emergenza come i terremoti.

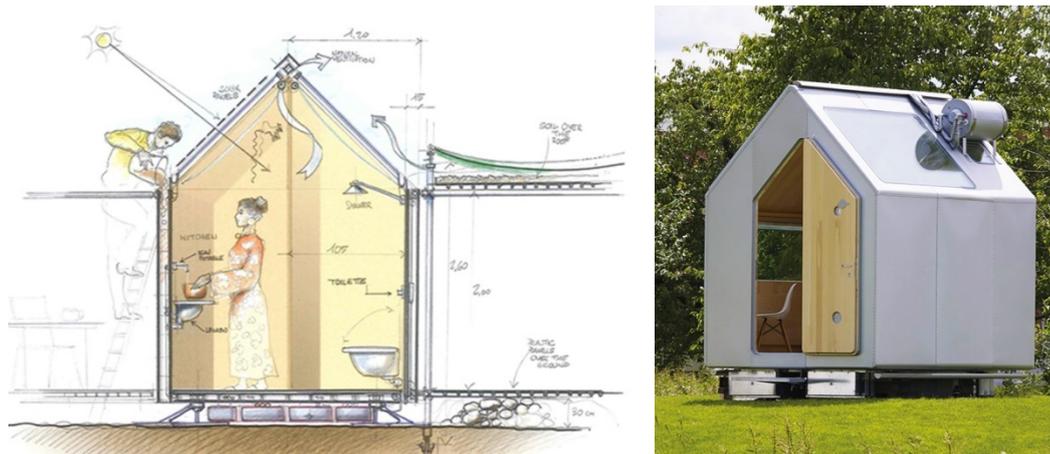


Figura 1-20 Renzo Piano, Diogene – Unità abitativa minima autosufficiente (2013). (<http://buromilan.com/project/diogene-unita-abitativa-minima-autosufficiente/>)

Un esempio di sistema costruttivo a secco interessante, anche se non direttamente riferito alla residenza, può essere quello utilizzato dall'architetto Peter Zumthor per la realizzazione del Padiglione svizzero ad Expo 2000 (Figura 1-21). Seppur non di carattere residenziale è sicuramente connotato dalla totale reversibilità del sistema. Alcune soluzioni adottate hanno fornito spunti operativi per la realizzazione di dettagli tecnici nello sviluppo della presente ricerca. Il “muro”, infatti, è realizzato per sovrapposizione di correnti di legno e reso stabile da tiranti in acciaio. I 3000 mc del piccolo edificio sono infatti costituiti da ben 45.000 assi di legno non stagionato, assemblate senza uso di collanti. Le pareti, alte 9 m, suddividono lo spazio interno secondo una logica labirintica e complessa, mentre i soffitti costituiti da travi di larice poggiano su travi verticali di pino scozzese. Ogni materiale assolve ad una funzione specifica l'acciaio è utilizzato con funzione di irrigidimento mentre il legno con funzione massiva.



Figura 1-21 Peter Zumthor, Padiglione Svizzero per Expo (2000). parete e sistema di post-compressione

Infine si può ricordare la soluzione innovativa utilizzata dagli architetti Herzog & De Meuron per realizzare il particolare muro esterno del progetto della Dominus Vinery, a Yountville (USA) nel 1998 (Figura 1-22). La parete è costituita dall'aggregazione di pietre irregolari contenute in gabbioni metallici. Anche in questo caso è possibile operare la disintegrabilità fisica del sistema, consentendo di restituire alle pietre il loro ruolo naturale e di riciclare l'acciaio.



Figura 1-22 Herzog & De Meuron, Dominus Vinery, Yountville (USA) (1998)

## 1.4 MODULARITA' E ASSEMBLABILITA'

I temi della modularità e dell'assemblabilità costituiscono un'ulteriore spunto interessante quando si parla di architettura innovativa. Il progetto modulare consente di ideare infinite variazioni e combinazioni utilizzando un numero limitato di elementi standardizzati che spesso sono prefabbricati e arrivano in cantiere già “*pronti all'uso*”. In questo modo il prodotto finito può risultare altamente complesso e variabile, ma sarà costituito da una serie di “*elementi standard*” che possono essere combinati e assemblati tra loro in molti modi.

Questo tipo di architettura accoglie i caratteri di flessibilità e trasformabilità sopra ampiamente discussi. In quanto costituita da elementi discreti, messi a sistema e resi solidali tra loro in un secondo momento, la si può considerare come un sistema aperto. La struttura edilizia modulare può essere divisa in sistemi e sub-sistemi di elementi coordinabili fra loro e regolati da un insieme di regole di tipo dimensionale e funzionale. Si può considerare quindi un edificio concepito in questo modo come “*mai finito*”, in cui le possibilità di addizione e sottrazione dell’elemento-modulo sono sempre consentite.

La modularità in un edificio può essere intesa in due modi:

- Modularità geometrica: aggregazione dell’unità in modalità geometrica ripetitiva, secondo un’idea meccanica di ripetibilità di un elemento perfettamente pensato e funzionante.
- Modularità funzionale: ripetizioni di unità elementari che insieme configurano un organismo completo con regole e variabili di relazione non esclusivamente geometriche.

In entrambi i casi ogni blocco fisico implementa una o uno specifico insieme di funzioni e ha relazioni ben definite con gli altri blocchi.

L’architettura modulare consente quindi di fare cambiamenti progettuali su un singolo blocco senza dover modificare gli altri per garantire il funzionamento corretto del prodotto e di progettare i diversi blocchi in modo indipendente gli uni dagli altri.

---

#### 1.4.1 MODELLI

Un primo esempio di architettura modulare può essere il TriPod Housing System (Figura 1-23), un prototipo di casa prefabbricata efficiente e sostenibile “*Plug and Play*” che è stato pensato per fornire una soluzione innovativa al problema della costruzione degli alloggi. Il progetto offre un interessante modello di adattabilità e modularità. Le varie possibilità combinatorie dei moduli consentono ai proprietari della casa di aggiungere o sottrarre camere o, al limite, di mutare solamente la disposizione delle camere esistenti per adattare gli spazi alle necessità di una famiglia che si modifica nel tempo. La casa è composta da un nucleo centrale che costituisce la spina dorsale del fabbricato e contiene tutta la dotazione impiantistica minima necessaria.



Figura 1-23 TriPod Housing System, progetto open source (2014). (<http://www.genitronsviluppo.com/2009/02/26/casa-prefabbricata-plug-and-play-tripod/>)

Attorno ad esso si possono facilmente dislocare nuove parti e ambienti secondo un'ottica di aggancio veloce. L'installazione del "core" può avvenire in un'ora ed è realizzato con una struttura portante in acciaio alla quale si connettono le strutture dei moduli "aggiunti". Gli ancoraggi sono pensati in modo da permettere un facile smontaggio e un successivo riutilizzo senza danneggiare i vari moduli.

Esistono numerosi esempi di edilizia a basso costo, sostenibile, realizzata in tempi brevissimi e con grande semplicità. In Australia, ad esempio, la società di Hickory Group<sup>22</sup> ha realizzato a Melbourne in soli cinque giorni un complesso edilizio residenziale di 9 piani, da cui il nome One9 (Figura 1-24). La struttura si compone di 36 moduli per un totale di 34 appartamenti dalla metratura ridotta (mono o bilocali) ma con finiture di pregio.



Figura 1-24 Hickory Group, One9, Melbourne (2013). (<https://inhabitat.com/one9-nine-story-prefab-apartment-tower-was-installed-in-just-five-days/one9-by-hickory-group-3>)

Un altro esempio può essere il nuovo blocco di Atlantic Yards (Figura 1-25) a Brooklyn, un imponente edificio residenziale concepito dal gruppo ShoP Architects<sup>23</sup> attraverso una serie di elementi modulari e realizzati in fabbrica ed assemblati in loco. Destinato per il 50% ad alloggi per l'edilizia a prezzi convenzionati, resi disponibili grazie alla riduzione notevole dei costi di produzione.

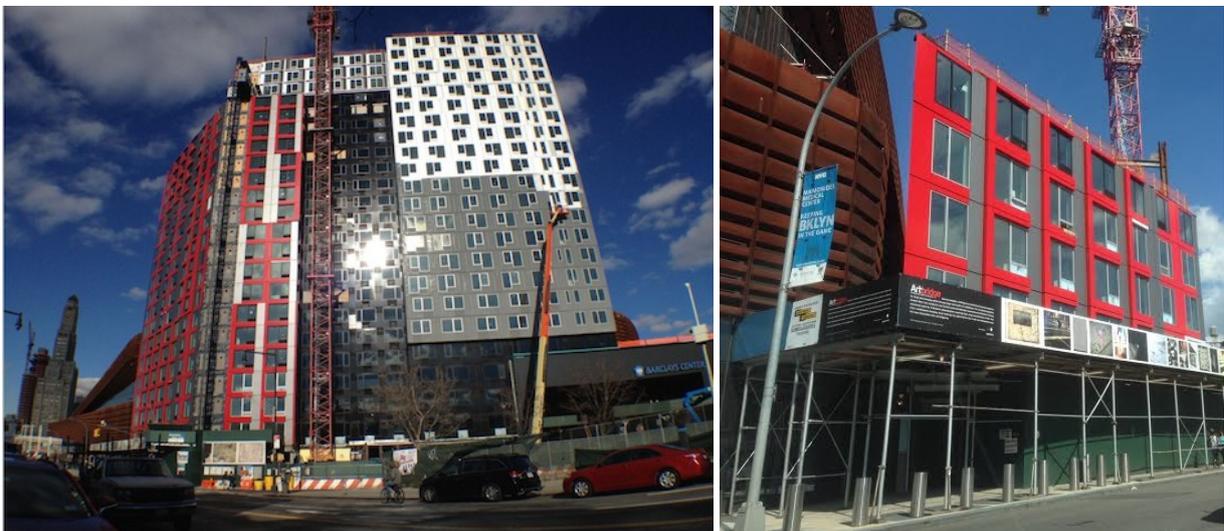


Figura 1-25 ShoP Architects, Atlantic Yards Modular Tower, Brooklyn (NY, 2014). (<http://www.brownstoner.com/brooklyn-life/atlantic-yards-modular-tower-could-leak-say-documents-court-hearing-tomorrow/>)

Un altro esempio di architettura modulare è sicuramente quello che vede l'utilizzo dei containers di recupero. Il riuso di vecchie attrezzature industriali trova oggi largo spazio nel campo delle costruzioni e la "architettura del container" è declinata al giorno d'oggi con creatività in

numerose tipologie. Principalmente spazi espositivi, edifici temporanei, bar, ristoranti e negozi ma anche veri e propri edifici residenziali prendono forma dalla composizione di più unità.

La struttura del singolo elemento è progettata per sopportare carichi considerevoli e la riconversione a moduli abitativi è relativamente facile, con un approccio sul singolo container che può considerarsi simile a quello utilizzato nel mondo dell'Interior Design. Prendendo spunto, per esempio, dalla nautica è facile capire quelli che possono essere i presupposti che stanno favorendo le varie ipotesi di riuso dei container per l'edilizia. Significativo è il nuovo studentato Frankie & Johnny di Berlino, progettato dallo studio Holzer Kobler Architekturen<sup>24</sup> (Figura 1-26).

L'edificio è organizzato su due lunghi blocchi affiancati ed è costituito da 400 moduli-container. Attraverso l'alternanza di superfici opache e trasparenti e alla diversa disposizione dei moduli, in alcuni casi ruotati di 90°, si ottiene uno spazio architettonico variabile ed affascinante, creando un ambiente estremamente vivibile e mutevole per una nuova forma di residenza collettiva. Ogni elemento ha una profondità di circa 12m e una larghezza di 2,9m e le unità abitative sono costituite da un singolo modulo oppure da due o tre moduli affiancati e connessi.



Figura 1-26 Holzer Kobler Architekturen, Studentato “Frankie & Johnny”, Berlino (2014). (<https://www.detail.de/artikel/spielerisch-und-praegnant-studentendorf-von-holzer-kobler-architekturen-13253/>)

Altri esempi analoghi possono essere lo studentato temporaneo Keetwonen ad Amsterdam di Tempohousing<sup>25</sup> oppure il progetto “Cité à Docks” di cittadella universitaria realizzata nel 2014 nel porto di Le Havre, in Francia (Figura 1-28). Il progetto porta la firma dello studio Atelier Cattani Architectes<sup>26</sup> con sede a Parigi. La nuova cittadella è frutto della trasformazione di vecchi container in unità abitative modulari dotate di ogni comfort. Assemblati su una griglia metallica, i container hanno dato forma ad un edificio di quattro piani che ospita 100 monolocali di 24 metri quadrati ciascuno.



Figura 1-27 Tempohousing, Studentato Keetwonen, Amsterdam (2006). (<http://www.tempohousing.com/projects/keetwonen/>)



Figura 1-28 Atelier Cattani Architectes, Cité a Docks, Le Havre, in Francia (2014). (<http://www.contemporist.com/cite-a-docks-student-housing-by-cattani-architects/>)

Gli obiettivi alla base brevetto Nomadhome, dell'architetto austriaco Gerold Peham<sup>27</sup> (Figura 1-30), sono, invece, quelli di ottenere un uso più efficiente degli spazi interni e di raggiungere una flessibilità pressoché totale per quanto riguarda la localizzazione geografica e la modificabilità.

Partendo da questi presupposti il risultato finale trova una naturale collocazione in svariati ambiti, quali quello dei lavoratori pendolari, quello delle residenze per le vacanze, quello dei campus universitari e anche quello degli stand temporanei e non per eventi come le fiere, sia permanenti che itineranti. Si tratta di un sistema brevettato basato sull'accostamento di moduli base che si assemblano a secco, in due o tre giorni, fino al raggiungimento delle dimensioni desiderate; l'intervento realizzativo non è invasivo. Le fondazioni sono integrate nei moduli e non hanno bisogno di scavi, quindi in caso di smantellamento non rimane alcuna traccia sul terreno.

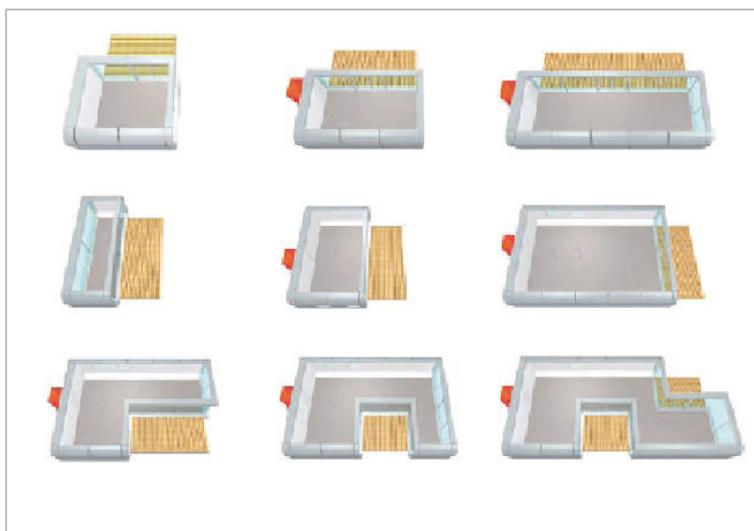


Figura 1-29 Il sistema brevettato Nomadhome, Gerold Peham - schemi aggregativi modulari. (<http://loft-factory.at/Lofts/Nomadhome/>)

Nell'ambito residenziale il modello base è formato da quattro moduli di 11 m<sup>2</sup> l'uno: l'insieme non supera i 50 m<sup>2</sup> tuttavia l'assenza di partizioni interne porta a una percezione più aperta dello spazio (Figura 1-30). La modificabilità è forse l'aspetto che più permea Nomadhome. L'impianto elettrico e il sistema di riscaldamento sono modulari e facilmente estendibili in caso di ampliamento, l'involucro esterno è facilmente sostituibile grazie a un semplice sistema di pannelli modulari e presenta un carattere camaleontico con ampie possibilità di personalizzazione.

Interessante è anche la strategia comunicativa adottata dall'azienda produttrice: viene posta enfasi sulla potenzialità di espansione e sull'innovazione di tale sistema, rifacendosi a schemi e linguaggi tipici dei manuali di montaggio e delle istruzioni per l'uso, cercando di avvicinare il cliente a questa nuova concezione di vivere.

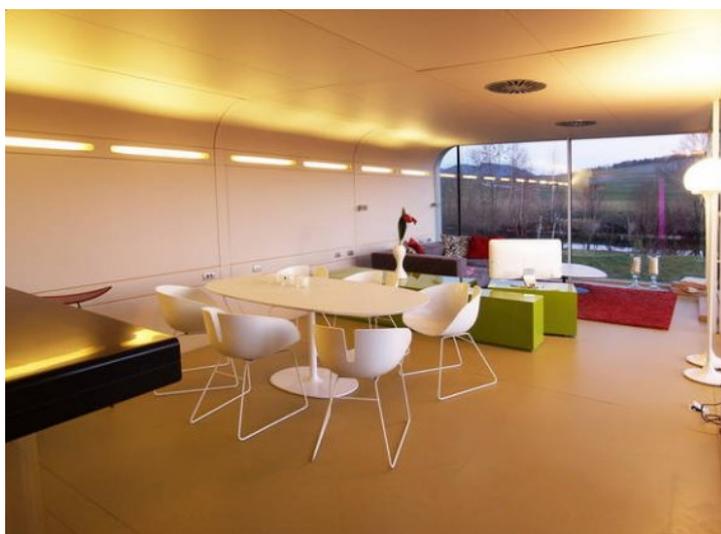


Figura 1-30 Il sistema brevettato Nomadhome, Gerold Peham - spazi interni. (<http://loft-factory.at/Lofts/Nomadhome/>)

La zeroHouse (Figura 1-31) è un piccolo organismo totalmente prefabbricato e completamente modulare, costituito da due unità rettangolari montate perpendicolarmente una sull'altra, che può essere facilmente spedito ovunque con due camion e eretto in meno di un giorno. Poiché il suo sistema d'appoggio su quattro punti non richiede lo scavo di fondamenta, il sistema di ancore elicoidali è minimamente impattante e si adatta a molti terreni.

Può trovare impiego in innumerevoli campi, quali il residenziale in zone non facilmente raggiungibili o ecologicamente sensibili o nella realizzazione di unità abitative temporanee per lavoratori in prossimità di luoghi di lavoro particolari. Nei cantieri, ad esempio, può essere utilizzato come opera provvisoria per la direzione lavori e l'infermeria potendo personalizzare l'interno di ogni fabbricato attraverso un'ampia gamma di soluzioni a seconda delle necessità.

Zero House è un ottimo esempio di organismo sostenibile; possiede un sistema di pannelli solari autonomo per la produzione d'energia che una volta caricato può reggere fino a una settimana in assenza di luce solare. Il sistema di illuminazione è costituito da una base di luci LED che possono funzionare 100.000 ore ininterrottamente. Tutte le funzioni della casa, tra cui la raccolta dell'acqua piovana e dei rifiuti organici, sono monitorate da una serie di sensori i cui dati sono visualizzabili mediante qualsiasi computer. È anche possibile "ibernare la casa" nei periodi di non utilizzo, il consumo di energia viene limitato pur mantenendo attive le funzioni base per la manutenzione.

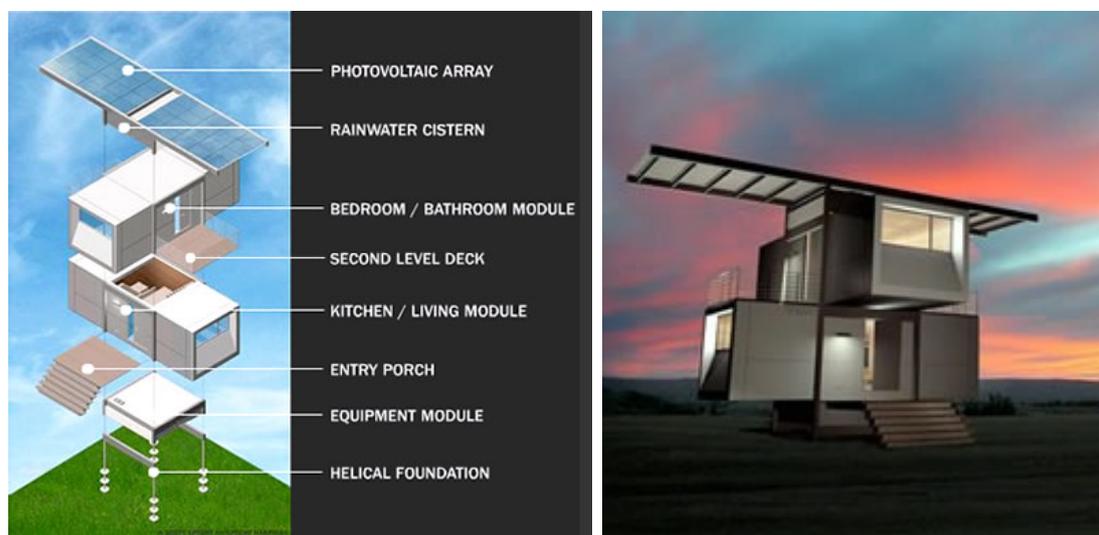


Figura 1-31 La zeroHouse, Specht Architects.

---

<sup>1</sup> Alessandro Trivelli, *Edilizia residenziale innovativa. Progettare l'housing contemporaneo. Con CD-ROM* (Maggioli Editore, 2011).

<sup>2</sup> Andrea Iacomoni, «Abitare lo spazio flessibile», *Macramè* 2, n. 1 (1 gennaio 2008): 53–61, <https://doi.org/10.13128/1971-6249/2287>.

<sup>3</sup> M Ruffilli, «L'abitazione transitoria per il nuovo nomadismo», in *La reversibilità del costruire. L'abitazione transitoria in una prospettiva sostenibile*, a c. di Roberto Bologna e Giampietro Alfarano (Maggioli Editore, 2002).

<sup>4</sup> Istat, «Gli spostamenti quotidiani per motivi di studio o lavoro», 30 novembre 2013, <http://www.istat.it>.

<sup>5</sup> Istat.

<sup>6</sup> Maria Teresa Granato, «Lo spazio della casa - La casa INDIVIDUALE come risposta dell'ABITARE» (Università di Camerino, 2007), <http://ecum.unicam.it/29/>.

<sup>7</sup> Daniele Pichi, «PREFABBRICAZIONE», in *QUADERNO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA EDILE/ARCHITETTURA - volume 3* (Pavia: Università di Pavia, 2006).

<sup>8</sup> Richard Buckminster Fuller (Milton, 12 luglio 1895 – Los Angeles, 1° luglio 1983) è stato un inventore, architetto, designer, filosofo, scrittore e conduttore televisivo statunitense.

<sup>9</sup> Jean Prouvé (Parigi, 8 aprile 1901 – Nancy, 23 marzo 1984) è stato un architetto e designer francese.

<sup>10</sup> MVRDV è uno studio di architettura e progettazione urbana di Rotterdam (Paesi Bassi) fondato nel 1993. Il nome è l'acronimo dei nomi dei fondatori: Winy Maas, Jacob Van Rijs e Nathalie De Vries. Prima della fondazione di MVRDV Maas e Van Rijs lavoravano all'Office for Metropolitan Architecture (OMA), mentre De Vries alla Mecanoo

<sup>11</sup> Steven Holl (Bremerton, 9 dicembre 1947) è un architetto statunitense.

<sup>12</sup> Shigeru Ban (Tokyo, 5 agosto 1957) è un architetto giapponese, vincitore del Premio Pritzker nel 2014[

<sup>13</sup>, Studio Elemental fondato da Alejandro Aravena in partnership con la compagnia petrolifera cilena e la Pontificia Universidad Católica de Chile per affrontare questioni sociali in Sud e Centro America.

<sup>14</sup> La Rubner Holding S.p.A. è un'azienda Italiana fondata nel 1926 con sede a Chienes in Alto Adige che opera nei settori del legno, ingegneria edile del legno realizzando, tra le altre attività, grandi progetti chiavi in mano di case in legno.

<sup>15</sup> Matteo Thun (Bolzano, 17 giugno 1952) è un architetto e designer italiano tre volte vincitore del Compasso d'Oro e inserito nella Interior Hall of Fame di New York nel 2004.

<sup>16</sup> Maria Argenti e Maura Percoco, «Innovazione e Tecnica Nel Progetto Della Residenza», *MATERIA* 47 (2005): 100–107.

<sup>17</sup> Ruffilli, «L'abitazione transitoria per il nuovo nomadismo».

<sup>18</sup> Pierluigi Spadolini (Firenze, 5 aprile 1922 – Firenze, 8 giugno 2000) è stato un architetto e designer italiano.

<sup>19</sup> LOT-EK è uno studio di architettura con sede in New York and Napoli. È stato fondato nel 1993 dagli architetti Ada Tolla e Giuseppe Lignano.

<sup>20</sup> Vedere nota 12

<sup>21</sup> Renzo Piano (Genova, 14 settembre 1937) è un architetto e senatore a vita italiano. È tra i più noti, prolifici e attivi architetti a livello internazionale, vincitore del Premio Pritzker consegnatogli dal Presidente degli Stati Uniti Bill Clinton alla Casa Bianca nel 1998

<sup>22</sup> Hickory Group è una società di costruzioni integrata fondata nel 1991 da Michael e George Argyrou ed è evoluta nel tempo diventando uno delle maggiori imprese di costruzioni australiane.

<sup>23</sup> ShoP Architects è uno studio associato di architettura fondato nel 1996 a Lower Manhattan, New York da cinque soci fondatori: Christopher Sharples, Coren Sharples, Gregg Pasquarelli, Kimberly Holden, William Sharples.

<sup>24</sup> Holzer Kobler Architekturen è uno studio di architettura fondato a Zurigo nel 2004 da Barbara Holzer e Tristan Kobler. Nel 2012 è stato aperto un ulteriore studio a Berlino.

<sup>25</sup> Tempohousing progetta, costruisce e consegna case prefabbricate dal 2004. La compagnia ha sede ad Amsterdam ma si sta rapidamente espandendo in tutto il mondo a seguito del successo commerciale dei propri prodotti.

<sup>26</sup> Lo studio, con sede a Parigi, è stato fondato e guidato dall'architetto italo-francese Alberto Cattani in collaborazione con la figlia Charlotte.

<sup>27</sup> Gerold Peham, architetto austriaco nato nel 1965. Ha sviluppato il marchio "loftfactory" all'interno del quale ha sviluppato e realizzato diverse tipologie di moduli abitativi.



## 2 REQUISITI

Le rinnovate esigenze sociali possono quindi trovare adeguata soluzione nell'architettura reversibile, adattabile, trasformabile, che deve però essere anche sostenibile ed ecologica. Abitazioni dunque, per il turismo, per la mobilità del lavoro e di studio, per l'emergenza, ma pensate anche per il nomadismo delle popolazioni di passaggio sul territorio. Da un punto di vista tipologico e morfologico la ricerca si deve orientare verso soluzioni di design di qualità per questi nuovi spazi abitativi.

*“Qualcosa si farà, prima o poi, per mettersi addosso una casa quasi come ci si mette un vestito, ogni giorno come ci si sceglie un libro da leggere oppure un teatro dove andare. Qualcosa si farà, prima o poi, perché si possa scegliere una casa, come si sceglie una giornata da vivere.”* (Ettore Sottsass junior)

L'abitare temporaneo rappresenta un'importante sfida tecnologica per il futuro e un campo di sperimentazione e di innovazione ancora in gran parte da esplorare. Più che di un'innovazione di prodotto è ancora più forte la necessità di un'innovazione di processo che stabilisca nuove modalità di impiego di tutte le risorse tecnologiche correnti in termini di flessibilità, assemblabilità e modularità. Bisogna superare il gap esistente tra le possibilità progettuali e tecnologiche oggi disponibili e la capacità di recepimento e applicazione da parte dei soggetti coinvolti, progettisti e utenti.

Definite le caratteristiche essenziali che meglio rispondono alle istanze di flessibilità, temporaneità, modularità e assemblabilità dell'organismo edilizio in questa nuova cultura dell'abitare, si vogliono ora individuare quali siano le modalità progettuali e costruttive che meglio le possano soddisfare.

Alla luce di quanto esposto precedentemente, la *“nuova costruzione”* sarà il meno possibile improntata alla artigianalità che ha contraddistinto il settore e sempre più rivolta a tecniche e sistemi industrializzati. Grande attenzione sarà quindi dedicata a tutte quelle tecniche a secco che prevedono quasi esclusivamente operazioni di montaggio in cantiere. Tutto questo volto ad una sempre maggiore sostenibilità di prodotti e processi nell'ottica complessiva del ciclo di vita dell'organismo edilizio.

## 2.1 COSTRUZIONE SOSTENIBILE

La necessità di dare risposte concrete ai rinnovati bisogni collettivi, discussa nei paragrafi precedenti, si affianca a un altro tipo di necessità che riguarda il tema della sostenibilità ambientale. Oggigiorno, quando ci si confronta con la progettazione di edilizia urbana è ormai ampiamente diffuso e necessario considerare l'istanza di realizzare veri e propri quartieri ad alta sostenibilità ambientale, adottata come mezzo di sintesi tra la creazione o il rinnovamento di agglomerati residenziali e il rispetto dell'ambiente, per garantire una qualità non solo prestazionale ma della vita, all'interno di un processo di sviluppo urbano armonico e compatibile, con lo sguardo rivolto alle generazioni future. Con questo approccio, il progetto diventa frutto dell'intelligenza, della conoscenza, della sensibilità e della responsabilità, in quanto costituisce l'elemento fondamentale, artefice del cambiamento e deve avere come centro d'interesse l'utente ma anche l'ambiente, naturale o antropizzato e l'equilibrio con esso.

La residenza sostenibile è la costruzione che risponde ai requisiti dell'ecocompatibilità, ma l'approccio alla sostenibilità può essere visto da diversi punti di vista e sicuramente quello più interessante nasce all'interno di un più ampio sistema di relazioni residenziali, orientate ad obiettivi di sostenibilità insediativa, di quartiere, di relazioni fra i diversi "elementi" urbani, piuttosto che di un edificio singolo. Il cambiamento può essere realmente significativo se riguarda l'assetto urbano più che la singola unità; il recupero di importanti aree post industriali, aree periferiche, aree portuali come la realizzazione di nuovi quartieri urbani sono stati negli ultimi anni al centro delle politiche di sviluppo di molte città europee. La progettazione sostenibile deve ovviamente partire dalla scala urbana, perché il tipo di tessuto determina pesantemente la forma e l'orientamento dei corpi di fabbrica.

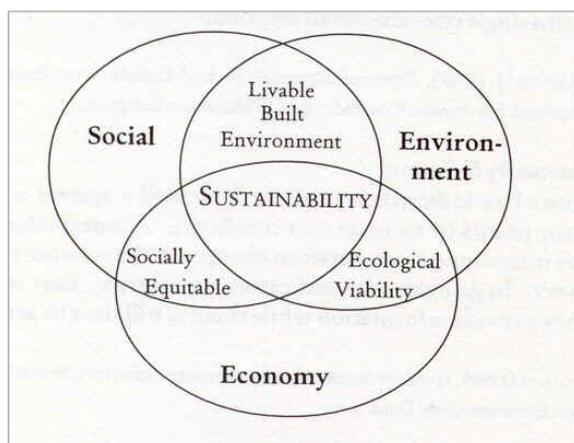


Figura 2-1: Rappresentazione concettuale dello sviluppo sostenibile (Hancock T., Madrid, 1995). "urban planning, sustainability and health"

In termini generali lo sviluppo sostenibile possiede la valenza e le caratteristiche di concetto integrato, per via dell'esigenza di combinare in maniera equilibrata tre aspetti vitali ed inscindibili. In primo luogo l'ambiente nei confronti del quale le maggiori criticità sono lo spreco materie prime, la produzione incontrollata di rifiuti e il degrado di aria, acqua e suolo. In seconda istanza l'economia, legata al prezzo delle risorse ambientali ed infine la società, ovvero la necessità di soddisfare i bisogni e le aspirazioni umane in maniera equa. (Figura 2-1)

Il settore delle costruzioni è altamente energivoro e proprio per questo è anche quello su cui è possibile apportare maggiori miglioramenti. Le scelte tipologiche e l'adozione di determinate soluzioni tecnologiche devono essere sempre calati nell'ottica di riduzione dell'inquinamento ambientale e del fabbisogno energetico, senza tuttavia rinunciare drasticamente alla qualità prestazionale ed architettonica del prodotto finale.

*"L'architettura sostenibile è lo spazio di equilibrio fra le necessità umane attuali e future".<sup>1</sup>*

La ricerca tecnologica si è prevalentemente focalizzata sulla definizione di sistemi impiantistici sempre più efficienti e sullo sfruttamento di fonti di energia rinnovabili quali eolico, biomasse e geotermia cercando di migliorare il grado di benessere raggiungibile.

L'introduzione di nuovi sistemi ha aperto ai progettisti un mondo nuovo di soluzioni per far fronte alla complessità dell'edilizia ma al tempo stesso ha generato problematiche nella valutazione e nel controllo degli aspetti prestazionali della soluzione ipotizzata in fase progettuale. Il parco edilizio realizzato dalla seconda guerra mondiale al boom degli anni Ottanta, nonostante la larga diffusione di sistemi ritenuti innovativi e performanti, mostra oggi il maggior grado di criticità energetica, questo perché all'epoca si puntava a una vasta produzione di beni, limitando in ogni intervento i costi iniziali, senza valutare i tempi di ammortamento degli investimenti in funzione dei costi di gestione, di manutenzione ed eventuale smaltimento.

Appare evidente la necessità di focalizzare l'attenzione non più e non solo su soluzioni straordinarie ed eclatanti, ma su l'estensione e la diffusione dei caratteri e delle tecniche facilmente ripetibili del costruire sostenibile. La ricerca nel settore delle costruzioni deve avere come obiettivo la formulazione di proposte attuabili su larga scala ed economicamente appetibili.

Il concetto di sostenibilità all'interno del mondo dell'edilizia non può più essere visto come una scelta, o un surplus rispetto alle classiche caratteristiche "standard". Occorre, invece, una sua sistematica introduzione in ogni progetto di nuova realizzazione e non, per migliorare la vita dei cittadini, aumentare il valore degli immobili, ridurre le emissioni, proseguire il processo di indipendenza energetica del paese e limitare l'utilizzo di risorse nel corso dell'intera vita utile del

costruito. Operare quindi in un'ottica più lungimirante che tenga conto di tutte le fasi della costruzione, dalla realizzazione alla demolizione, programmando in anticipo il destino di ogni componente, dal reperimento allo smaltimento, esercitando quindi un miglior controllo e potendo effettuare scelte iniziali ottimali per il futuro.

*"Il comparto residenziale...proprio per il suo carattere di larga diffusione sul territorio, costituisce a livello nazionale il maggiore fattore di influenza sulle condizioni di disagio energetico-ambientale e quindi, proprio per questo motivo, necessita di nuove ipotesi di sviluppo. Attualmente la maggior parte dei caratteri che costituiscono le fondamenta del nuovo tipo di approccio alla progettazione di edifici residenziali, sono da riferire ai principi dell'edilizia sostenibile in ottica di tutela ambientale e conservazione delle risorse non rinnovabili, unitamente all'aumento del comfort abitativo e al controllo degli aspetti economici che caratterizzano l'intervento. La presente richiesta di edifici flessibili ed energeticamente performanti induce i progettisti a formulare nuove ipotesi progettuali con il conseguente aumento del livello di complessità delle soluzioni tecnologiche, dei componenti e dei materiali adottati per rispondere a tali evoluzioni".<sup>2</sup>*

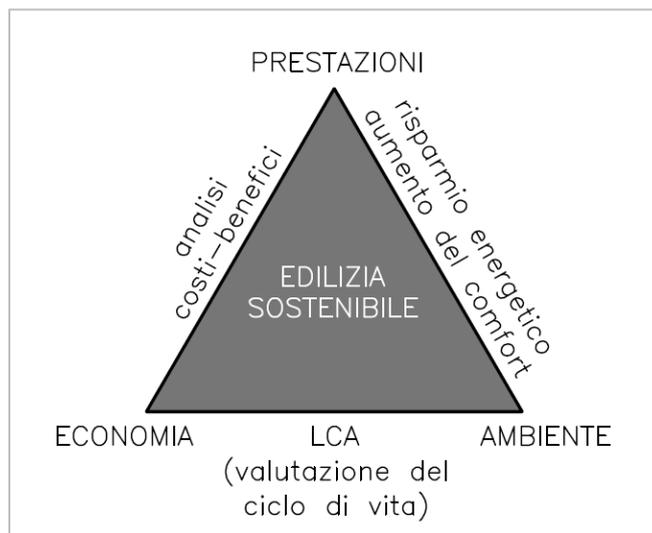


Figura 2-2 Rappresentazione concettuale dello sviluppo sostenibile applicato all'edilizia.

Quindi per coniugare le esigenze e l'evoluzione dell'edilizia con il rispetto dell'ambiente, del territorio e delle generazioni future non occorre solo progettare un edificio altamente performante, aspetto che rimane comunque sia fondamentale, ma vi è anche la necessità di pensare al cantiere non più come unico luogo del processo edilizio ma come punto di arrivo di un percorso ben più lungo, in un ragionamento di Life Cycle Assessment (LCA), il quale necessita anch'esso di un attento studio.

---

## 2.1.1 STRATEGIE

---

La casa dovrebbe essere concepita come un'entità biologica e per essere considerata davvero sostenibile dovrebbe soddisfare determinati requisiti: per la sua realizzazione deve essere consumata la minor quantità possibile di energia con il minimo dei rifiuti; così come per il suo mantenimento e per le manutenzioni; alla fine della sua vita, tutti i materiali serviti alla sua costruzione devono essere rigenerati e inseriti in un nuovo ciclo produttivo.

L'edilizia sostenibile si basa proprio sui principi di decrescita e di limite, intesi come risparmio di risorse e minima produzione di inquinamento in tutte le fasi del suo ciclo di vita. Il termine "sostenibile" applicato all'architettura si riferisce alla ricerca delle soluzioni costruttive che massimizzano il benessere dei fruitori garantendo contemporaneamente alle generazioni future la possibilità di conseguire lo stesso risultato, nella consapevolezza che le risorse sono limitate e che lo sperpero e l'inquinamento possono diventare insostenibili per le popolazioni future.

Le strategie che devono essere quindi adottate per la realizzazione di edilizia sostenibile devono riguardare alcune caratteristiche-chiave costituenti l'unità immobiliare, quali la sua forma (compattezza), la sua pelle (isolamento termico), la dimensione e la posizione (irraggiamento), l'inerzia termica (masse termiche), il calore interno (apporti interni), le dotazioni impiantistiche (riscaldamento), la ventilazione naturale e l'illuminazione naturale e artificiale. L'edificio sostenibile deve essere in grado di stabilire un rapporto con l'ambiente esterno tale da produrre le necessarie condizioni ambientali in virtù delle sue caratteristiche morfologiche, dimensionali e termofisiche, assicurando condizioni di comfort con un uso limitato di impianti meccanici alimentati da risorse energetiche esauribili.

Dei criteri progettuali evidenziati precedentemente si vogliono brevemente approfondire alcuni aspetti, soprattutto quelli che maggiormente hanno connotato il presente progetto di ricerca.

### 2.1.1.1 *GESTIONE DEI PROCESSI*

L'obiettivo dell'economicità della costruzione è oggi posto alla base di molte sperimentazioni progettuali. Alcune si basano sull'impiego originale di materiali "*poor & cheap*" di provenienza industriale e sulla definizione di nuove modalità di utilizzo e di assemblaggio di prodotti e sistemi tecnologici; alcune invece si concentrano sulla messa a punto di dispositivi in grado di ridurre i consumi energetici e di ottimizzare lo sfruttamento delle forme di energia rinnovabile; altre si concentrano sulla semplificazione e ottimizzazione del progetto e del processo. Si possono delineare quindi diverse strategie:

- Utilizzo di materiali di recupero, i quali sono a costo zero e il cui riutilizzo può costituire carattere di originalità e novità.
- Tecnologie attive o passive per il risparmio energetico ed economico a lungo termine. Queste soluzioni richiedono però solitamente un investimento iniziale piuttosto alto per avere un ritorno dilazionato nel tempo
- Gestione dei processi di cantiere.

Il terzo punto è quello che si ritiene più interessante, ciò che è fondamentale e che cambia completamente il modo di gestire il fattore economico del progetto è l'approccio utilizzato in relazione all'intero iter processuale. Nella prospettiva del contenimento del costo complessivo è oggi opportuno considerare come fattori determinanti, oltre al costo di costruzione, anche i costi di gestione, di manutenzione, di consumo energetico e di futuro smantellamento. L'istituto Fraunhofer IEC, ad esempio, fa ricerca da tempo su questo tema nel reparto "Gestione Industriale del Cantiere", con la convinzione che nei processi di costruzione tradizionali si trovi un elevato potenziale di risparmio.

In particolare il progetto di ricerca "Build4Future<sup>3</sup>", in cui l'Istituto collabora con dodici piccole e medie imprese PMI del settore edile per strutturare e razionalizzare processi di costruzione, ha fornito interessanti risultati sull'argomento: attraverso l'ottimizzazione dei processi aziendali di ogni impresa coinvolta in cantiere si può raggiungere un allineamento efficace delle interfacce tra i diversi partecipanti.

Spesso in edilizia la pianificazione dei lavori da svolgere in cantiere è fatta in modo superficiale. La programmazione delle lavorazioni a volte è fatta solamente in funzione dei bandi di gara e per questo motivo non contiene informazioni sufficientemente dettagliate per una coordinazione efficace. La programmazione temporale convenzionale rimane statica, o meglio non contiene una strutturata attualizzazione del grado di avanzamento del cantiere e per poter evitare giacenze intermedie nella catena delle forniture e conseguenti ripercussioni negative sui costi di gestione, le aziende che producono e forniscono componenti in cantiere necessitano di un'affidabile e dettagliata informazione sull'avanzamento dei lavori. Bisogna tenere conto che il campo dell'edilizia si distingue particolarmente da altri settori per l'elevato numero di eventi non prevedibili.

Qui entra in gioco il miglioramento della pianificazione e della gestione dell'esecuzione in cantiere attraverso una corretta strutturazione del processo esecutivo:

- Le attività che non creano valore possono essere individuate e di conseguenza eliminate. Con una razionalizzazione del processo il focus si sposta sulle attività che creano valore assicurando un collocamento ottimale delle risorse impiegate.
- Attraverso la standardizzazione dei processi è possibile ottenere una routine aziendale e quindi stabilizzare il processo. Alla base del concetto della pianificazione a rotazione (rolling planning) eventi non prevedibili in cantiere possono essere gestiti in maniera efficace.
- Grazie ad una pianificazione dettagliata del processo di lavoro e con l'ausilio di parametri di pianificazione, le risorse impiegate (personale, attrezzature) possono essere utilizzate in modo efficiente.
- Introducendo brevi cicli di attualizzazione delle attività eseguite si possono estrapolare informazioni affidabili sull'avanzamento del cantiere. Di conseguenza, l'interfaccia tra fornitura, produzione e cantiere può essere allineata al meglio e il materiale può essere fornito in cantiere Just-in-Time.
- Una misurazione dettagliata dell'avanzamento dei lavori permette inoltre un efficace controllo del budget. Questo facilita l'individuazione di discostamenti dalla pianificazione, in modo da poter prendere tempestivamente le necessarie contromisure e rientrare sia nel budget di spesa che nei tempi di consegna.

Tuttavia non basta una “buona organizzazione” del cantiere per costruire edifici a basso costo. Ciò che è fondamentale è il progetto in sé. Si deve quindi tenere conto di ogni singolo aspetto, a partire dalla considerazione del singolo elemento costruttivo, per arrivare alla composizione generale dell'edificio.

La progettazione dell'edificio deve essere incentrata anche sulla semplicità costruttiva intrinseca di questo. Per raggiungere l'obiettivo del basso costo, gli elementi che compongono l'edificio devono essere il più possibile standardizzati e il sistema costruttivo o il processo di costruzione, devono essere semplici, di immediata comprensione e soprattutto efficienti.

Un primo esempio in cui nella realizzazione di un edificio progetto e gestione del cantiere si sono influenzati a vicenda è descritto nel libro di C. Willis "Empire State Building, 21 mesi per costruire il grattacielo più alto del mondo".<sup>4</sup> Nel testo si raccontano le scelte progettuali volte all'ingegnerizzazione del progetto da un punto di vista tecnologico e di come il cantiere, inteso come organizzazione e gestione, abbia influenzato le scelte progettuali, dei materiali e dei modelli di gestione delle forniture. Si prendano come esempio il pilastro in acciaio alto due piani e il doppio fornitore delle strutture per piani alternati due a due, scelta operata per avere un margine di quattro

giorni tra la fornitura e la posa in opera, in modo da ridurre al minimo i disagi derivanti il mancato arrivo delle forniture dovuto alle difficoltà dell'approvvigionamento nel cuore di New York.

Questo esempio mostra in maniera chiara come il cantiere non potesse e non può a maggior ragione oggi essere improvvisato. La sua gestione industriale presuppone un lavoro di progettazione di ottimizzazione tipico di qualsiasi altro settore industriale affinché possa garantire gli stessi risultati.

### 2.1.1.2 IMPATTO SUL SUOLO

L'innovativo concetto di temporaneità in architettura, discusso in precedenza, invita ad una riflessione sul ruolo e sul significato dell'architettura in rapporto ai temi della sostenibilità delle risorse. In particolar modo, in un panorama sempre più antropizzato, lo sfruttamento del suolo emerge come una importante criticità sia in termini di impoverimento di risorse sia in termini di valore economico intrinseco del terreno rispetto a qualunque cosa vi stia "sopra".

Secondo la concezione tradizionale, è opportuno costruire edifici che durino il più a lungo possibile, con materiali ecocompatibili di alta affidabilità, intervenendo con metodicità e costanza con soluzioni volte al massimo prolungamento della sopravvivenza dell'edificio. All'opposto invece, la concezione innovativa che sta pian piano prendendo piede, prevede la demolizione dell'edificio e il riciclaggio dei prodotti residui una volta che questo si dimostri non più idoneo all'uso. Questa tendenza è enfatizzata dal fatto che oggi lo sviluppo di soluzioni tecnologiche per l'edilizia è talmente fervido e veloce, che i processi di obsolescenza fisica, funzionale e tecnologica sono molto più rapidi rispetto al passato. Un edificio relativamente giovane, può risultare obsoleto, anche se ben progettato, già dopo pochi anni, poiché lo sviluppo delle soluzioni tecnologiche corre molto più in fretta rispetto a solo pochi decenni fa. In quest'ottica, applicando il principio della demolizione-ricostruzione, si potranno ipoteticamente avere edifici costantemente all'avanguardia dal punto di vista tecnologico e formale, e il più possibile efficienti dal punto di vista energetico.

Quindi decostruire dopo aver costruito non significa demolire, ma considerare la disintegrabilità dell'edificio preventivamente, in fase di progettazione. Viene così semplificata la fase di dismissione dopo l'uso, che sia a durata programmata o meno, possibilmente senza lasciare conseguenze incontrollabili o non smaltibili. La sostenibilità, per definizione, costituisce la caratteristica di un processo o di uno stato che può essere mantenuto ad un certo livello indefinitamente. Con riferimento alla società tale termine indica un "*equilibrio fra il soddisfacimento delle esigenze presenti senza compromettere la possibilità delle future generazioni di sopperire alle proprie*".<sup>5</sup> Pertanto, dal punto di vista della sostenibilità, la reversibilità totale di un manufatto costituisce la massima aspirazione possibile. Prevedere la cancellazione e l'eliminazione di ciò che si

produce significa avere la possibilità di riparare preventivamente ad “*errori eventuali*” che ancora non sono stati commessi, con l’obiettivo di consegnare alle generazioni future un patrimonio ambientale e antropico qualitativamente invariato o migliore.

### 2.1.1.3 MASSIVITA’

In un’ottica di sostenibilità energetica, la costruzione massiva, combinazione di isolamento e inerzia termica tipica del linguaggio architettonico vernacolare, si propone come valida alternativa, soprattutto nei climi mediterranei, alle soluzioni leggere e adiabatiche, per il controllo dei consumi di energia e per il condizionamento degli ambienti in regime invernale ed estivo.

Di fatto, il modello di riferimento per lo sviluppo dell’edilizia sostenibile è stato generalmente quello sviluppato e adottato da tempo nei Paesi nordici. Il modello CasaKlima, ad esempio, concentra l’attenzione sull’isolamento termico dell’involucro quale prestazione essenziale per il raggiungimento dei livelli di efficienza. Prestazioni che, in clima mediterraneo, da un lato possono attestarsi su valori più alti, in termini di trasmittanza degli elementi verticali opachi; mentre dall’altro risultano non sufficienti, non solo a garantire il comfort dell’ambiente interno, ma soprattutto a rappresentare l’effettivo consumo stagionale dell’edificio. Il concetto di casa iperisolata, ermetica e adiabatica, e le tecnologie ad esso correlate non sembrano, infatti, particolarmente idonei ad essere trasferiti tout-court in un clima mediterraneo, in cui le abitudini e le estati calde richiedono involucri molto più permeabili e attivi. Il fabbisogno di raffrescamento, anche durante le medie stagioni, è un’esigenza prioritaria in questi ambiti climatici, così come testimoniato da una architettura tradizionale che da sempre si esprime attraverso strutture dinamiche, in grado cioè di scambiare calore con l’ambiente esterno in base alle condizioni di temperatura e ventilazione. Questa dinamicità è tecnologicamente tradotta nella capacità termica delle superfici esterne: ossia nella loro attitudine ad accumulare calore per poi cederlo all’ambiente al variare delle condizioni al contorno. Un elemento dotato di una grande massa, e conseguentemente di una elevata capacità termica, attenuerà il propagarsi delle onde termiche esterne fungendo da volano, contrariamente, invece, ad una parete a bassa capacità termica che non potrà svolgere un altrettanto efficace azione smorzatrice.

Smorzamento e sfasamento sono, infatti, i parametri di misura di questa dinamicità, della capacità, cioè, di abbattere la temperatura del flusso di calore entrante dall’esterno e ritardarne temporalmente il passaggio all’interno in modo che la consegna d’energia verso gli spazi abitati avvenga soltanto durante le ore fresche notturne. Un elemento massivo, grazie alla sua capacità di accumulo, quando investito dalla radiazione solare si riscalderà lentamente e altrettanto lentamente si raffredderà una volta in ombra. La misura di questa lentezza, ossia l’inerzia termica, costituisce

allora, assieme alla trasmittanza, la qualità energetica dell'involucro della casa mediterranea. In definitiva è importante associare alle tecniche di stratificazione a secco la componente di massività per poter garantire un adeguato confort interno alle architetture che sorgono all'interno della fascia climatica mediterranea.

## 2.2 INDUSTRIALIZZAZIONE E PREFABBRICAZIONE

Nel secondo dopoguerra, con la ripresa del settore edilizio a seguito della forte emergenza abitativa, vi è stata una forte spinta verso l'industrializzazione del cantiere, la meccanizzazione e la razionalizzazione dei sistemi costruttivi. Negli anni '50 e '60 l'edilizia industrializzata veniva internazionalmente suddivisa in due grandi categorie:

- Edilizia a ciclo chiuso
- Edilizia a ciclo aperto

L'edilizia a ciclo chiuso prevede che un elemento costruttivo di qualunque complessità possa essere prodotto serialmente in officina da un solo produttore e montato in cantiere da una singola impresa all'interno di un processo costruttivo completo e chiuso. Si procede così alla realizzazione di un solo tipo di edificio. Le singole parti, dette componenti industrializzate, sono coordinate dimensionalmente e capaci di connessioni solo per quel determinato tipo edilizio. Si tratta di un'estensione del modello del pre-assemblaggio proprio dell'ossatura metallica a tutto l'organismo edilizio, che produce un oggetto smontato in tutte le sue parti, da ricomporre in sito con semplici operazioni meccaniche. I procedimenti di edilizia industrializzata a ciclo chiuso comportano principalmente il trasferimento in officina dei cicli di lavorazione e, contemporaneamente l'introduzione nella produzione edilizia dei criteri dell'industria meccanica.

In questa visione si è cercato di applicare alla produzione edilizia la stringente logica di standardizzazione propria della produzione di automobili. L'obiettivo era quello di emulare le produzioni a catena di montaggio introdotte da Henry Ford con la produzione in serie della "Model T". La scarsa dimestichezza con i criteri e le tolleranze dovute alla standardizzazione e la paura che il ruolo del progettista architettonico venisse perso all'interno di questo processo non hanno favorito lo sviluppo di questi sistemi.<sup>6</sup>

L'edilizia a ciclo aperto, invece, anche detta fabbricazione per componenti, segue temporalmente nell'ideazione quella a ciclo chiuso. Si basa sul principio di produrre elementi

costruttivi funzionali industrializzati polivalenti, prodotti da più aziende, che possono essere agevolmente, al massimo attraverso semplici lavorazioni, integrati e/o sostituiti da altri dello stesso tipo prodotti da produttori diversi. Anche in questo caso vi è la realizzazione di parti di oggetti edilizi serialmente in officina, ma nell'ottica di poter impiegare tali prodotti nella più ampia casistica possibile. L'integrazione dei diversi componenti industrializzati risulta possibile grazie al concetto di coordinamento dimensionale modulare in cui tutto l'organismo è impostato su un modulo misura.<sup>7</sup>

La modularità, inserita nel contesto della prefabbricazione industrializzata, ha generato numerosi studi e riflessioni. L'esperienza ha però mostrato che si è andati nella direzione sbagliata declinando la modularità, da parte dei progettisti, come un pezzo di astrattismo concettuale architettonico, e come molta architettura ha finito per includere al suo interno elementi di finzione. Sembrava essere una storia di produzione e costruzione, ma il mondo rappresentato non era quello effettivamente esistente.<sup>8</sup>

Molti nuovi sistemi vennero importati dalla Francia e dall'Inghilterra, per essere applicati in Italia. Nonostante queste spinte verso l'industrializzazione, che si protrassero fino agli anni '80, e la contenuta applicazione di sistemi costruttivi avanzati, continuò a prevalere in Italia un'edilizia di stampo tradizionale ancorata ai formalismi architettonici e al paradigma del "*Genius loci*". Successivamente si registrò un calo di interesse verso i processi industrializzati veri e propri, che vennero relegati alle opere civili e all'edilizia per il terziario.

Il termine industrializzazione, in riferimento al cantiere, iniziò ad essere usato come sinonimo di meccanizzazione e di prefabbricazione, legato quindi più agli aspetti tecnico costruttivi che non a quelli economico gestionali tipici dei processi industriali. D'altra parte l'industrializzazione del comparto edilizio inteso come produzione di materiali e componenti edili ha conosciuto uno sviluppo significativo quasi esclusivamente legato alla ricerca e all'innovazione di prodotto. Questo sviluppo ha comunque generato un riassetto tale da modificare la dimensione e la tipologia delle imprese esecutrici, portandole ad una specializzazione e settorializzazione prima non riscontrabili nell'ambito edile, accentuando ancora di più la differenza tra industrializzazione di prodotto e industrializzazione di processo.

Con l'introduzione sempre più massiccia di sistemi derivanti dai processi di industrializzazione dei componenti edili e di tecniche costruttive alternative a quelle tradizionali, il cantiere sta vivendo una migrazione da luogo di produzione in situ a luogo di montaggio, risultando di fatto il terminale del sistema produttivo industrializzato dei componenti prodotti dall'industria edilizia. Gli esempi più evidenti sono le tecnologie stratificate a secco, i sistemi costruttivi in acciaio, quelli interamente in legno, dove le parti legate all'organizzazione tradizionale dei modelli produttivi in cantiere è legata solo ai sistemi di fondazione, alla parte impiantistica e alle opere di finitura.

Dal 1990 al 2015 la produttività per addetto nel settore delle costruzioni, ovvero il tempo che si traduce in valore nel prodotto finito, è cresciuta meno dello 0,5% l'anno, contro il 2% del settore manifatturiero, di conseguenza nella manifattura la produttività è all'88% mentre nell'edilizia non supera il 43%. Un dato che riflette la necessità di ripensare la filiera edilizia attraverso un processo di convergenza, sia sul piano tecnologico che sul piano organizzativo. È quindi necessaria una vera e propria industrializzazione delle costruzioni e che questa non sia legata esclusivamente alle grandi opere e al settore terziario (Figura 2-3).

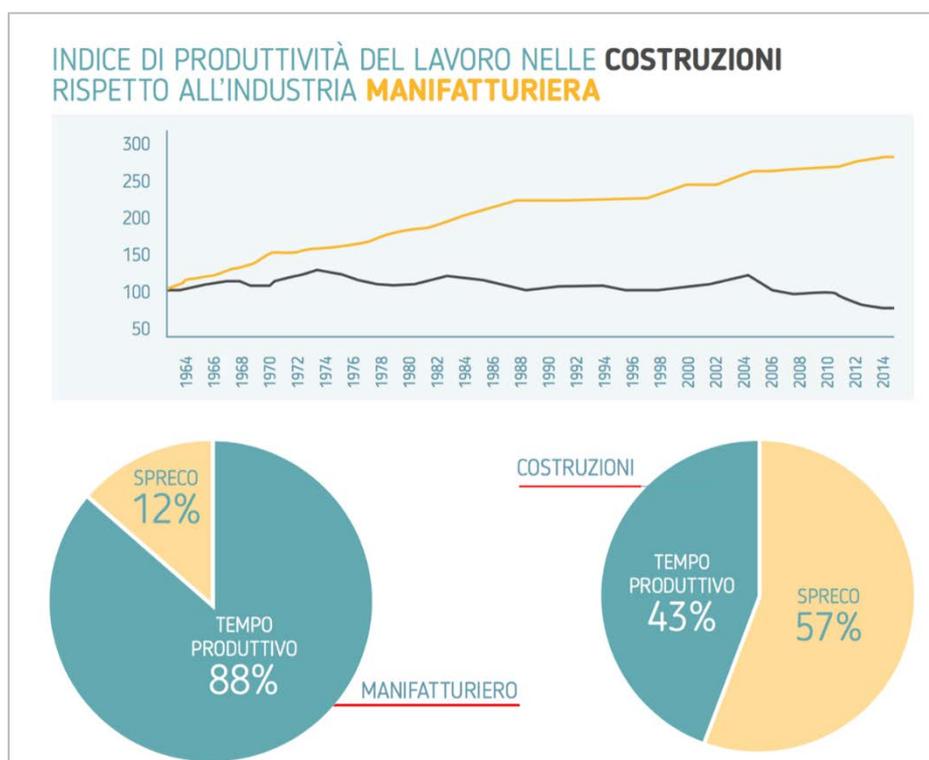


Figura 2-3 Confronto fra la produttività nel settore manifatturiero e settore delle Costruzioni negli ultimi 50 anni.

(<http://www.linkiesta.it/it/article/2017/10/09/ledilizia-e-un-disastro-di-produttivita-ecco-come-costi-e-tempi-posson/35764/>)

Facendo riferimento esclusivamente ai dati statistici relativi la realizzazione delle opere pubbliche, in quanto di quelle private non è possibile avere una base di dati esaustiva, le condizioni necessarie per poter parlare di industrializzazione del settore edilizio sono praticamente assenti. Ciò è parimenti evidente prendendo come riferimenti il rispetto delle tempistiche e dei costi preventivati in fase progettuale. Relativamente ai tempi di realizzazione delle opere, nel 70% dei casi, la durata dei lavori è superiore a quella programmata e in circa un terzo di questi casi si arriva oltre il doppio del tempo preventivato. Per quanto riguarda i costi, la realizzazione nel 78% dei casi assorbe tutto il ribasso d'asta, nel 15% dei casi arriva fino al doppio del ribasso d'asta mentre per la restante parte si va oltre il doppio del ribasso d'asta.<sup>9</sup>

I dati relativi alle imprese nel settore delle costruzioni denunciano un'eccessiva parcellizzazione che ovviamente non permette modelli organizzativi di tipo industriale. Uno dei problemi da superare sta nella definizione di bene edilizio e della sua realizzazione, ove si è sempre posto l'accento sull'unicità e su come sia il contesto che le condizioni economico giuridiche lo rendano un prototipo unico. Tale definizione nega di fatto la possibilità di inserire molti aspetti legati alla produzione industriale all'interno dell'ambito del processo edilizio. Il processo di industrializzazione della produzione si basa fundamentalmente sul concetto di ottimizzazione del processo produttivo dove la linea di produzione viene progettata al fine di ridurre le stazioni di produzione che costituiscono l'intera filiera. Questo processo necessita di una prototipizzazione del bene al fine di ottimizzare l'impiego di risorse chiamate in causa con lo scopo di definire puntualmente, per successive approssimazioni, tutte le caratteristiche che i materiali, le attrezzature e le lavorazioni devono avere affinché il prodotto finale risponda alle prestazioni assegnate e alle richieste effettuate all'atto della progettazione.

Tutti questi dati sono sintomatici sia di come molti fattori non siano tenuti in considerazione all'atto del progetto, sia di come il cantiere sia fortemente influenzato da fattori esterni e interni non prevedibili. Attraverso l'industrializzazione del processo si vuole diminuire l'aleatorietà che aleggia attorno a tempi e costi mediante:

- una progettazione più accurata e lungimirante, facilitata dalla presenza di elementi costitutivi predefiniti;
- una migrazione delle lavorazioni in officina, ove queste risultano sottoposte a maggiori controlli, riducendo il numero di problemi da risolvere all'ultimo minuto in cantiere;
- l'esperienza dei cantieri passati, che risulta un feedback utile alla conoscenza di tempi e costi essendo chiamati in causa sempre gli stessi elementi, ma in quantità e configurazioni differenti.

Se si vuole capire quanto sia rivoluzionaria la cosiddetta "*edilizia industriale*", un nuovo sistema di progettazione che si prefigge di abbattere drasticamente tempi e costi di produzione, bisogna partire dall'Ikea. La società svedese ha intenzione di costruire 50 alberghi smart (bassi prezzi ma con servizi da categoria superiore) in Europa, in collaborazione con la catena alberghiera Marriott. Stiamo parlando di 10mila camere da costruire in dieci anni, con un investimento da un miliardo di euro. Per riuscire a stare nei tempi e nei costi la strada scelta è stata quella dell'edilizia "off-site", la quale prevede che gran parte dei componenti siano prodotti in fabbrica e poi trasportati sul posto.

Si potrebbe obiettare che gli edifici prefabbricati hanno il difetto di essere anonimi. Anche questa, tuttavia, è un'immagine legata al passato, *“la novità è che ora è possibile la varietà senza un incremento dei costi”* e *“l’edilizia industriale esiste già, ma non ha una bandiera, non ha un nome”*. Secondo le parole di Thomas Miorin<sup>10</sup> le nuove frontiere dell’edilizia industrializzata sarebbero attualmente esplorabili grazie ai sistemi di progettazione BIM e ai macchinari flessibili tipici dell’Industria 4.0, fenomeno dentro il quale l’edilizia industriale si inserisce.

La produzione assistita ha ora rimpiazzato la produzione di massa come nuovo concetto dominante nel mondo dell’industria. Nel mondo delle costruzioni, o almeno in quello dove sono coinvolti i progettisti, la produzione assistita non ha mai avuto un grande impatto. I progettisti si sono preoccupati più di evidenziare i motivi per cui il sistema industriale non fosse compatibile con quello edilizio, più che cercare un punto d’incontro. Qui di seguito vi sono alcuni esempi:

*“È economicamente fuori da ogni dubbio (emulare la produzione di automobili) a meno che non si producano migliaia di edifici identici.... La necessità di un continuo adattamento alle problematiche del sito e dei diversi usi, fa sì, infine, che gli edifici costruiti in mattoni siano più economici.”*<sup>11</sup>

E ancora:

*“(Prefabbricazione) solo salvando denaro con unità prodotte identicamente, una fabbrica può entrare nel mercato. Cambiare le specifiche, o pagare dei lavoratori per assemblare mentre la catena di montaggio non va a regime porta l’equazione necessariamente al collasso.”*<sup>12</sup>

Questa è una visione antica ora che i principi della produzione assistita sono generalmente accettati. Flessibilità, prodotti rispondenti al mercato nella piccola scala, sono tutti pregi che rendono applicabile il sistema sia alla produzione di componenti per edifici, che di interi edifici. La standardizzazione e la modularità così zelantemente studiate e promulgate dai progettisti degli anni '50 e '60 fallirono perché erano basate su una visione irrealistica della posizione dell’industria nell’insieme architettura.

Attualmente le limitazioni sono umane e non tecnologiche. I consumatori non sono dei progettisti o degli inventori, e i prodotti vanno sviluppati e testati, specialmente se traggono origine da una forma tradizionale. In pratica la scelta ricadrebbe all’interno di un insieme di prodotti semi-standard, o all’interno di una combinazione di componenti semi-standard. In altre parole il prodotto

sarebbe al tempo stesso prodotto in massa e personalizzato. Si potrebbe parlare anche nel settore edilizio di “*Personalizzazione di Massa*” in analogia al comparto dell’automotive o dell’elettronica.

---

## 2.3 COSTRUZIONE A SECCO

---

L’industrializzazione del processo, declinata nell’ottica sopra esposta, incentiva l’adozione di tecniche costruttive a secco, che permettono di sopperire a richieste sempre più esigenti dell’utenza per quanto riguarda la qualità e le performance, il contenimento dei costi e la parallela riduzione dei tempi di consegna. Adottando queste tecniche si può anche tenere conto della necessità di continuo ammodernamento degli impianti che hanno spesso una vita utile inferiore alle strutture principali e alle finiture. Alla base di questo modo di costruire c’è l’accostamento e l’integrazione di diversi strati ed elementi, scelti e accoppiati in base alle prestazioni che si desiderano ottenere. La realizzazione di elementi complessi è vincolata alla corretta individuazione e risoluzione delle interazioni reciproche relative alla messa in opera.

La tecnica della stratificazione a secco è innovativa, perché permette di realizzare prodotti o componenti complessi che sono specifici per le diverse situazioni. La tecnologia permette cioè di scegliere i pacchetti e i dettagli architettonici in modo che questi non siano semplicemente “adottati”, ma che siano specificamente e competentemente progettati. Ciò è possibile, perché la tecnica della stratificazione a secco permette di ricorrere a materiali o tecnologie appropriati, ciascuno di diverso tipo e con funzioni specifiche elementari e mirate, per la realizzazione i pacchetti tecnologici prestazionali. In altre parole il pacchetto architettonico diventa un vero e proprio “*dispositivo*” dotato di una gamma differenziata di strati, ciascuno portatore di uno specifico contributo prestazionale.

In questo modo si ottiene una complessificazione delle prestazioni e una sempre maggiore specificità dei dispositivi architettonici, assieme ad un sempre maggiore controllo dei risultati. Tutti questi aspetti concorrono al preciso raggiungimento delle qualità architettoniche desiderate.

Ogni pacchetto tecnologico è determinato quindi dalla giustapposizione di strati con alte prestazioni e con la possibilità di agevole sostituzione o rimozione, in caso di intervento manutentivo. La possibilità, intrinseca al sistema di disassemblaggio dei materiali, consente di ipotizzare cicli di riuso degli stessi. Ogni strato, essendo “isolato” nella sua gestibilità operativa (montabilità) e nella sua gestibilità nel tempo (manutenibilità e sostituibilità), costituisce un’entità a sé stante. Costruire a secco significa quindi gestire ed organizzare un certo numero di elementi disaccoppiati tra loro, a formare superfici variamente stratificate e dotate di integrazioni impiantistiche. L’edificio diviene

così una sorta di macchina attiva capace di garantire sempre le massime prestazioni richieste dall'utente attraverso un processo di miglioramento continuo e progressivo dei componenti.

In quest'ottica il cantiere diventa una fase di assemblaggio e finitura di componenti o interi sistemi realizzati industrialmente, sottoposti ad accurati controlli e test.

I vantaggi di tale tecnologia possono essere molteplici:

- i tempi di realizzazione sono minori anche per via del fatto che ogni componente presenta un peso limitato che ne agevola la messa a sistema senza richiedere mezzi di sollevamento;
- l'elevata precisione dei componenti si traduce in un superamento del problema della definizione esatta delle tempistiche poiché si limitano le situazioni non previste all'atto della progettazione e la loro influenza negativa sui tempi di realizzazione;
- non sono necessarie verifiche in cantiere poiché i componenti presentano già certificazioni di qualità;
- riduzione dei rifiuti e dei problemi collegati al loro smaltimento.

Le tecniche edilizie a secco, ampiamente diffuse in Europa, hanno avuto in Italia una scarsa utilizzazione. Solamente negli ultimi anni si è verificato un particolare interesse per questi sistemi e i motivi di tale nuova attenzione sono molteplici e si possono riassumere in alcuni punti:

- Richiesta di una più alta qualità da parte dell'utente.
- Realizzazione a costi accettabili.
- Sempre maggiore necessità di riduzione dei tempi di consegna.
- Il continuo aumento delle installazioni impiantistiche.

Si intersecano quindi due necessità fondamentali, da un lato una forte richiesta di incremento delle prestazioni e dall'altro la sempre più elevata necessità di comprimere costi e tempi. Queste rinnovate aspettative dell'utenza hanno generato dunque stimoli innovativi che hanno imposto una reazione da parte dell'industria edilizia, la quale, spinta sia da un sempre più ingente apparato normativo sia da una sempre maggiore competizione, sta sviluppando soluzioni innovative da immettere nel mercato delle costruzioni, che si pongono oggi come valida alternativa alle tecniche costruttive tradizionali.<sup>13</sup>

Le rinnovate qualità richieste dalla nuova domanda dell'utenza si possono ottenere più facilmente, non con le tecniche costruttive tradizionali (che implicano costi notevoli per le esecuzioni con pesi e consumi di spazio elevati), ma con le tecniche di stratificazione a secco, per diversi motivi.

La tecnica della stratificazione si configura quindi come un paradigma nuovo che segna la crisi del sistema tradizionale e manifesta la continua evoluzione della tecnologia. Diverse istanze contribuiscono a rendere tale sistema il più adatto al soddisfacimento dei nuovi requisiti imposti.

In primo luogo il sempre più forte interesse da parte dell'utenza della "*qualità abitativa*". Anche in un recente passato la qualità abitativa non era una condivisione ricercata in fase di costruzione della casa. Il pensiero primario era assicurarsi un luogo in cui poter vivere riparati dalle intemperie e procurarsi una base per formare una famiglia. Considerati invece i ritmi frenetici della vita quotidiana, la propria casa è diventata un luogo di "*culto spirituale*" dove si spera di poter passare del tempo in tranquillità e nel benessere. La qualità abitativa è quindi ad oggi un fattore molto importante da valutare in fase di realizzazione di una nuova casa e i requisiti di qualità sono sempre più richiesti dalla domanda.

Come si è detto, il fenomeno della sempre più estesa diffusione dei sistemi a secco, scaturisce dalla ricerca della qualità, il che induce innanzi tutto ad un'accurata riflessione sulle performance da soddisfare. La qualità edilizia, riferita ad un edificio nel suo complesso, è presente se sono garantite determinate prestazioni. La Normativa italiana, nella norma UNI 8289 definisce nel dettaglio questi aspetti e redige una classificazione dei tipi di esigenze:

- Sicurezza: insieme delle condizioni relative alla incolumità degli utenti, nonché alla difesa di danni in dipendenza da fattori accidentali, nell'esercizio del sistema edilizio.
- Benessere: insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguate alla vita, alla salute e allo svolgimento delle attività degli utenti.
- Fruibilità: insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività.
- Aspetto: insieme delle condizioni relative alla fruizione percettiva del sistema edilizio da parte degli utenti.
- Gestione: insieme delle condizioni relative all'economia in esercizio del sistema edilizio
- Integrabilità: insieme delle condizioni relative alla fruizione percettiva del sistema edilizio da parte degli utenti.
- Salvaguardia dell'ambiente: insieme delle condizioni relative al mantenimento e miglioramento dello stato dei sovra-sistemi di cui il sistema edilizio fa parte.

Soddisfare quindi questo tipo di esigenze è ormai d'obbligo, ma la qualità di un manufatto architettonico oggi è considerata come qualcosa di più, un valore aggiunto alla fattibilità, alla coerenza, al controllo e al coordinamento, sia del processo ideativo progettuale che dell'opera

compiuta. La verifica della qualità non si limita unicamente alla verifica dell'oggetto edilizio finale, ma investe ogni fase del processo ideativo, produttivo e costruttivo. Il concetto di qualità nasce infatti in ambito industriale con l'avvento della produzione seriale. Tale nozione in un primo momento era legata alla verifica di conformità del prodotto al tipo e infatti oggi la ricerca del miglioramento della qualità è accompagnata e spinta dalla sempre più ingente produzione normativa di controllo dei processi industriali e della produzione. Si parla oggi quindi in primo luogo di qualità del prodotto. La Direttiva CEE 89/106 sui prodotti da costruzione, recepita con il DPR 246/93, regola la fornitura di materiali e prodotti che entrano in modo stabile nelle opere edilizie, definendo i criteri su cui si basa il controllo della qualità in edilizia, gli operatori del controllo, specificando ruoli e responsabilità dei vari attori, i requisiti essenziali e, i sistemi di certificazione dei prodotti. Le diverse modalità di certificazione dei prodotti da costruzione sono definite in base all'ordine decrescente rispetto al livello di qualità che rappresentano:

- Omologazione: il prodotto è sottoposto ad una serie di controlli, obbligatori per legge, effettuati da un ente o istituto accreditato dagli Organi Statali. Questo rappresenta il massimo livello di garanzia di qualità ed è richiesta necessariamente per tutti i componenti impiantistici.
- Certificazione di Conformità: certificazione di tipo consensuale con riferimento alle specifiche tecniche capitolari. I laboratori di prova eseguono un controllo a campione seguendo norme e procedure predefinite (eseguita ad esempio su laterizi, calcestruzzi e quanto altro arrivi in cantiere senza certificato di omologazione).
- Certificato d'idoneità tecnica: è un giudizio tecnico sull'idoneità d'impiego di un determinato materiale a seguito di specifiche prove.
- Marcatura CE: nato con lo spirito di definire livelli di qualità minimi comuni per favorire la libera circolazione di prodotti e merci, il marchio di qualità è un contrassegno rilasciato a seguito di una serie di attestazioni sul prodotto, non sempre significative, nel dimostrare un determinato livello di qualità.
- Autocertificazione: certificato rilasciato dallo stesso produttore a seguito di una serie di controlli.
- Accredimento: certificato con validità Europea rilasciato da un ente accreditato.

L'aumento del livello di qualità è quindi in parte il risultato di un maggiore controllo dei prodotti industriali. Questo non sempre è possibile e non sempre accade con capillarità nell'edilizia tradizionale, in quanto il prodotto è materialmente realizzato in cantiere. Per quanto riguarda le tecniche costruttive di stratificazione a secco, dove ogni singolo materiale e componente viene scelta

singolarmente, a partire dalla vastissima gamma di prodotti presenti sul mercato, la qualità del prodotto diventa un requisito fondamentale.<sup>14</sup>

Il fine è ovviamente quello di poter offrire, costante nel tempo, il massimo del comfort abitativo e per fare ciò ovviamente non ci si può limitare alla rispondenza della qualità dei singoli prodotti, comunque necessaria, ma bisogna tenere in considerazione anche fattori esterni e soggettivi che influiranno in maniera combinata tra di loro.

I sistemi costruttivi a secco sono inoltre particolarmente adatti a permettere un certo livello di autocostruzione. I vari componenti della struttura sono potenzialmente smontabili con facilità, seguendo un criterio di disassemblaggio inverso a quello dell'assemblaggio. È facilmente immaginabile un quadro in cui l'utenza stessa possa intervenire direttamente sulla propria abitazione attraverso la manutenzione, la modifica e la sostituzione dei vari elementi.

Anche al fine di stimolare il coinvolgimento consapevole di coloro che abiteranno la casa, e di promuovere un sentimento di appropriazione dei luoghi, può risultare vantaggioso che la costruzione possa essere eseguita con un certo grado di autocostruibilità assistita, consentendo ai fruitori anche di completare e personalizzare la propria dimora (temporanea, flessibile o meno) con le proprie risorse materiali.

Date queste caratteristiche a fase di cantiere subisce una significativa trasformazione e diventa una fase prettamente di assemblaggio e finitura di componenti provenienti dall'industria, i quali sono controllati e testati. La fase di montaggio diventa quindi il punto cruciale dell'intera fase di costruzione e deve essere realizzata secondo definite procedure. Questo aspetto implica l'adozione di un nuovo approccio anche e soprattutto nella fase progettuale. Il progettista nella fase di sintesi architettonica del progetto dovrà definire correttamente le caratteristiche di tutti i componenti e le corrette sequenze delle fasi di assemblaggio e montaggio fin quasi a realizzare una sorta di "manuale di istruzioni". I vantaggi in cantiere possono essere molteplici:

- Velocità esecutiva;
- Limitato peso dei singoli componenti;
- Trasporto manuale o meccanico, senza l'obbligo di utilizzo di particolari attrezzature;
- Elevato grado di precisione e organizzazione dovuto all'utilizzo di prodotti realizzati industrialmente e che giungono in cantiere finiti;
- Superata l'incertezza dei tempi di realizzazione dell'opera;
- Non sono più necessarie ulteriori verifiche in cantiere sui materiali da costruzione, in quanto arrivano già con certificazione di qualità;
- Evidenti benefici dovuti all'eliminazione degli sprechi e alla riduzione degli elementi di scarto

Il prodotto vero e proprio non è più realizzato in cantiere, ma viene prodotto in fabbrica. In questo modo si garantisce un maggiore controllo del processo e si ha la sicurezza del controllo di qualità. Gli operatori diventano, in sostanza degli assemblatori o “esperti meccanici” dotati di specifiche competenze tecniche fornite direttamente dall’industria produttrice e il cantiere diventa il luogo dell’assemblaggio e della finitura di prodotti e componenti di alta qualità.

---

<sup>1</sup> Trivelli, *Edilizia residenziale innovativa. Progettare l’housing contemporaneo. Con CD-ROM*.

<sup>2</sup> Luca Beraghi, «EDILIZIA SOSTENIBILE: MODELLI PROGETTUALI E TECNICHE COSTRUTTIVE», in *QUADERNO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA EDILE/ARCHITETTURA - volume 3* (Pavia: Università di Pavia, 2006).

<sup>3</sup> Il progetto Build4Future è supportato scientificamente dalla Libera Università di Bolzano, dall’agenzia CasaClima e dal TIS Innovation Park e promosso dalla Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige. Fraunhofer Italia con questo progetto persegue lo sviluppo di metodi innovativi, orientati al futuro nonché di strumenti e di strategie per una industrializzazione dei processi nelle costruzioni. Costruire in modo economico e sostenibile è possibile solo tramite innovazioni tecniche e organizzative, sia nella progettazione che nell’intero processo di costruzione e la strutturazione del processo di costruzione in cantiere. (<https://www.fraunhofer.it/it/i-nostri-servizi/projekte/build4future.html>)

<sup>4</sup> C. Willis, *Empire State Building. 21 mesi per costruire il grattacielo più alto del mondo*, trad. da D. Biasi (Milano: Mondadori Electa, 2004).

<sup>5</sup> World Commission on Environment and Development, a c. di, *Our common future*, Oxford paperbacks (Oxford; New York: Oxford University Press, 1987).

<sup>6</sup> Pichi, «PREFABBRICAZIONE».

<sup>7</sup> Lorenzo Aiello e Ettore Zambelli, a c. di, *Il sistema edilizio aperto* (Mariotti 1820, 2017).

<sup>8</sup> Pichi, «PREFABBRICAZIONE».

<sup>9</sup> Fabrizio Patti, «L’edilizia è un disastro di produttività, ecco come costi e tempi possono dimezzarsi», 9 ottobre 2017, <http://www.linkiesta.it/it/article/2017/10/09/ledilizia-e-un-disastro-di-produttivita-ecco-come-costi-e-tempi-posson/35764/>.

<sup>10</sup> Thomas Miorin è Presidente di RE-Lab, società che organizza l’evento REbuild. È anche il Direttore di Habitech, il Distretto Tecnologico dell’Energia e dell’Ambiente dal 2009 e co-fondatore di Axelera, associazione nata per una nuova leadership nella comprensione delle dinamiche e tecnologie di tipo esponenziale. In passato è stato amministratore delegato del primo centro servizi distrettuale privato in Italia, docente di Logistica all’Università di Padova e professore di "Small & Medium Enterprise Development" in MBA internazionali in medio oriente.

<sup>11</sup> Colin Davies, *High Tech Architecture* (New York: Rizzoli international, 1988).

<sup>12</sup> Paul Barker, «il problema delle abitazioni a Londra», *New Statesman*, 2002.

<sup>13</sup> Karsten Tichelmann, Jochen Pfau, e Enrico De Angelis, *Costruzioni a secco*, 2017.

<sup>14</sup> Ettore Zambelli, Marco Imperadori, e Pietro Antonio Vanoncini, *Costruzione stratificata a secco: tecnologie edilizie innovative e metodi per la gestione del progetto* (Mariotti 1820, 2017).

---

- PARTE 2 -

SOLUZIONI APPLICATIVE



## II - SISTEMA “INTEGRO BS 400”



# 1 LA CASA BARACCATA

L'utilizzo del legno come elemento strutturale portante è frequente in molte culture nel corso dei secoli ed anche al giorno d'oggi. In Italia, attualmente, la tradizione di costruire in legno, è stata progressivamente abbandonata propendendo verso altre tecnologie più consolidate come muratura e calcestruzzo.

Il principale riferimento per l'evoluzione del progetto fonda le sue radici nel recupero di una tecnica costruttiva che ha origini molto antiche: la casa "baraccata". Essa è generalmente costituita da una intelaiatura in legno, che le conferisce buona rigidità ed allo stesso tempo elasticità, e da un tamponamento, inserito tra gli elementi lignei, che può essere composto di materiali leggeri come canne e intonaco ma anche mattoni o pietrame. Come primo passo si è scelto di effettuare una ricerca storica al fine di individuare le radici di questo sistema, e di alcuni sistemi ad esso assimilabili, con l'intento di comprendere ancora meglio come abbia potuto divenire e permanere per diverso tempo uno dei più validi presidi anti sismici disponibili.

## 1.1 I PRECURSORI

Fin dall'antichità venivano impiegati rinforzi in legno al fine di rendere più resistenti le strutture. Alcuni esempi risalgono persino ai Babilonesi, che erano soliti impiegare canne all'interno della muratura per edificare grandi Ziggurat, conferendo unitarietà ed un'omogenea distribuzione delle masse alla costruzione. Erodoto come venissero erette queste Ziggurat:

*"La struttura dei mattoni di fango è interrotta ogni 5 corsi da uno strato di stuoie di canne di notevole profondità. L'intera struttura era inoltre legata assieme da cavi multipli di robuste canne intrecciate che correvano direttamente da una facciata all'altra nelle due direzioni principali"*<sup>1</sup>

Anche alcuni edifici costruiti nell'era minoica, come quelli delle città di Cnosso e Phestos a Creta, integravano al loro interno una intelaiatura lignea, che conferiva loro ottime proprietà antisismiche. Altri impieghi di rinforzi lignei annegati nella muratura venivano utilizzati in epoca romana, dapprima per armare i *valli* (Figura 1-1), ed in seguito usati anche per l'edilizia abitativa con la tecnica dell'*opus craticium*.



Figura 1-1 Il vallo di Adriano

Descrizioni dettagliate di questa tecnica costruttiva e più in generale anche delle case in legno le possiamo ritrovare nei *Dieci libri di Architettura* scritti da Vitruvio.<sup>2</sup> Esempi tangibili di questo retaggio sono giunti sino a noi, conservandosi molto bene, tra le rovine delle città di Pompei ed Ercolano.

In ciò che resta delle architetture di Pompei ed Ercolano è possibile ritrovare la tecnica romana dell'*opus craticium* (Figura 1-2), sistema costruttivo consistente in un graticcio ligneo formato da elementi verticali passanti e travi di sostegno, o correnti orizzontali, con un riempimento costituito da *opus incertum*: ovvero un nucleo formato da vari materiali (pietre e laterizi) cementati con malta racchiuso da blocchetti (*caementa*) di forma irregolare e sommariamente sgrossati.

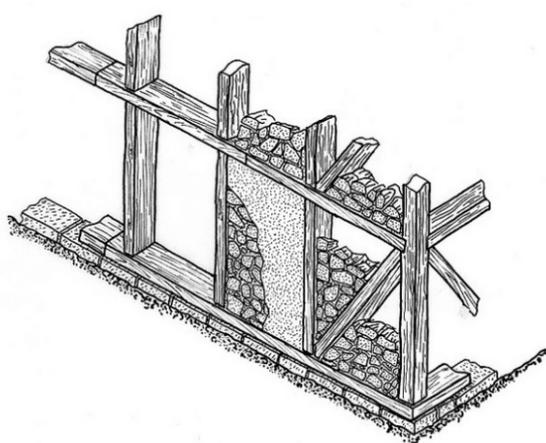


Figura 1-2 Esempio di opus craticium a Ercolano

Sostanzialmente si tratta di un graticcio formato da pali verticali e correnti orizzontali che fungono da sostegno per la costituzione della muratura, la quale si interpone nella scacchiera formata dalla parte in legno. Seppur non consciamente, questo sistema dava alla costruzione ottime capacità di risposta alle sollecitazioni dinamiche, cosa che ha favorito la conservazione di questi edifici fino ai nostri giorni.

Altro esempio presente sul territorio italiano è quello delle baracche, caratterizzate da una fitta disposizione di montanti e travi orizzontali con funzione di irrigidimento: tale sistema strutturale fu ideato come ricovero antisismico con carattere provvisorio. Il primo esempio di baracca, secondo una testimonianza del 1688, fu realizzato a Rieti nel 1300.

*"...Sotto il pontificato di Papa Bonifacio Ottavo e dell'imperio di Alberto nelli anni del Salvatore 1300 incominciò in Italia un'horribilissimo terremoto, che durò per molto tempo, e sempre con continuate concussioni, e finalmente distrusse la città di Rieti, dove detto pontefice ritrovava con tutta la corte... perché intemorito il pontefice fuggì né chiostrì de Padri Domenicani di quella città, e non cessando il terremoto, hebbe per bene di fare edificare né medesimi chiostrì una casa di tavole, e si viddero la prima volta in Italia li Tabernacoli, che volgermente chiamano Barracche, e Ciacconio nella vita del suddetto pontefice riferisce che in quell'anno era un freddo indicibile, e pareva che cessato il timore dopo più giorni dovesse il Pontefice ritornare nella sua habitazione, ma cò sofferenza inesplicabile volle habitare nella Barracca".<sup>3</sup>*

L'utilizzo delle baracche, protrattosi fino al '700 circa, nella maggioranza dei casi presenta un carattere provvisorio, poiché queste venivano realizzate come rifugio nell'evenienza di calamità e subito abbandonate una volta cessato il pericolo perché scomode, poco coibentate e vulnerabili al fuoco; tuttavia numerose sono le fonti che testimoniano una larga diffusione del sistema, soprattutto in Calabria e Sicilia: la conoscenza delle capacità prestazionali dell'intelaiatura lignea, dovute alla leggerezza e alla duttilità del materiale, alle azioni dinamiche era largamente acquisita; a conferma di ciò la testimonianza di Marcello Bonito riguardante le performance delle strutture lignee giapponesi.

*"...Le loro fabbriche sono al generale di legname per essere Paese soggetto ai terremoti... E se ben queste case di tavole son sicure dà Terremoti, stanno tuttavia soggette al terribile ed straordinario impeto di un vento".<sup>4</sup>*

Gli scritti sopra citati sono cronache di viaggiatori, redatte nella maggior parte dei casi da medici, militari, nobili, che indicano la baracca come ricovero efficace in caso di scosse telluriche, ma che non si addentrano in presupposti scientifici.

Dal XVIII secolo in poi però prende il via la stagione illuministica in cui una fiducia sempre maggiore nei confronti della ragione porta allo studio e all'analisi critica ogni fenomeno, tra cui l'evento sismico. Una serie di eventi tellurici molto importanti, il primo in Portogallo (Lisbona 1755) e poi in Calabria (1783), saranno infausti motori per avviare studi più specifici e mirati, che porteranno alla redazione delle prime normative antisismiche della storia. L'osservazione sistematica dei danni provocati nelle diffusissime case rurali costruite con materiali poveri, come mattoni o pietrame non regolare e malta di scarsa qualità se non addirittura assente, portò a comprendere i punti di debolezza delle costruzioni tradizionali. Gli edifici non venivano concepiti o realizzati per resistere ad azioni orizzontali, ma solo verticali, secondo modalità dettate prevalentemente dalla pratica e dalla tradizione. Questa mancanza di unitarietà delle strutture, durante l'evento sismico, provocava il ribaltamento delle pareti, sfilamento di solai e crollo delle coperture pesanti. Osservando queste problematiche i progettisti del tempo riuscirono ad intravedere la chiave per risolvere il problema. Infatti singoli rapporti di varie fonti poterono constatare l'effettiva efficacia alla risposta sismica degli edifici con strutture in legno o in muratura, con parti lignee all'interno, poiché queste conferivano una maggiore duttilità generale. Ulteriore punto debole era la mancanza di unitarietà strutturale negli edifici in muratura o pietrame dovuta alla scarsa qualità, o all'assenza, della malta. I costruttori dell'epoca individuarono nel legno, ma soprattutto nell'accoppiamento legno/muratura, la giusta strada da percorrere per garantire unitarietà e duttilità alle nuove costruzioni.

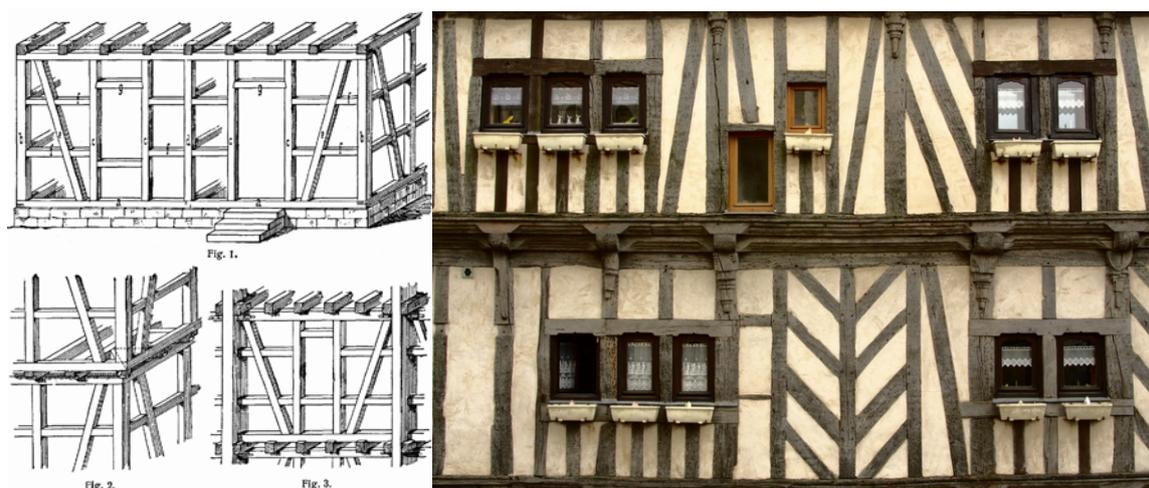


Figura 1-3 Schema di assemblaggio Fachwerkhäuser

Queste nuove considerazioni spesso si affiancarono e fortificarono tradizioni costruttive lignee già ampiamente radicate come la *Maison à colombages* in Francia, la *Fachwerkhaus* (Figura 1-3) in Germania e Austria ed il *timber framing* o *half-timbering* in Inghilterra.

## 1.2 L'ESEMPIO PORTOGHESE

Nel novembre del 1755 Lisbona venne colpita da un fortissimo terremoto (8,5/8,7 gradi della scala Richter) che distrusse buona parte della città causando migliaia di morti; quello che non fu raso al suolo immediatamente subì danni dai successivi incendi, generati dalla caduta di candelieri e lucerne, ed infine, poiché l'epicentro fu in mare aperto, dallo tsunami.

Le rovine della Lisbona medievale furono la base per un grande intervento di urbanizzazione, caratterizzato dal carattere moderno e funzionale, legato alla volontà e al pragmatismo del potente Marchese di Pombal<sup>5</sup>, il quale ordinò rapidamente la realizzazione di un progetto di ricostruzione firmato da Carlos Mardel<sup>6</sup> ed Eugenio dos Santos<sup>7</sup>. Dopo il cataclisma la prima necessità era la realizzazione di nuove abitazioni per i cittadini sopravvissuti e riavviare la vita mercantile: bisogni che richiedevano una rapida e ponderata ricostruzione.

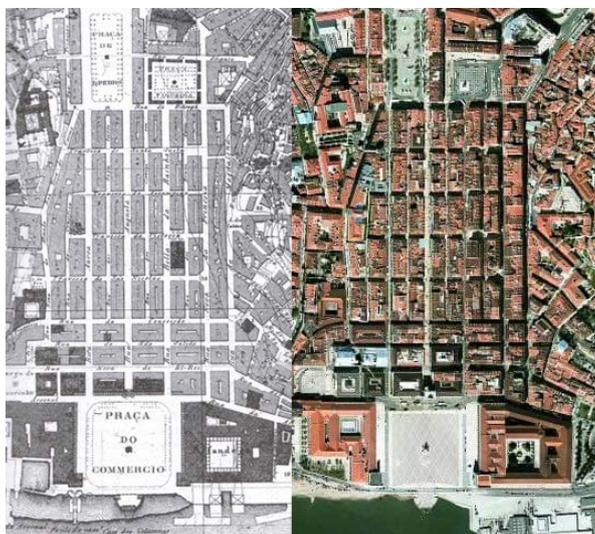


Figura 1-4 Lisbona, Baixa Pombalina.

L'intervento fu caratterizzato da due innovazioni decisive: l'adozione di un tracciato urbano estremamente razionale, basato su assi ampi e rettilinei, che si incrociavano regolarmente ad angolo retto, e l'adozione di un sistema costruttivo volutamente antisismico, la gabbia pombalina. Il centro della città ricostruito, che prese il nome di "*Baixa Pombalina*" (Figura 1-4) non si caratterizzava per la monumentalità dei suoi edifici, rappresentativi di un nuovo ordine sociale che valorizzava la classe

commerciale e finanziaria, ma per l'armonia del complesso, gli scorci nati dalle strade perpendicolari da cui si intravedeva il fiume Tago, i negozi del commercio tradizionale e i monumenti.

Il sistema costruttivo con cui vennero realizzati i nuovi edifici (*gaiola pombalina* in portoghese), variazione dell'opus craticium di origine romana, era basato su una struttura intelaiata tridimensionale a gabbia (*gaiola*) di legno con le pareti costituite da intelaiature di legno formate da elementi verticali e orizzontali formanti una maglia quadrata. All'interno di ogni campo veniva posta una controventatura lignea a forma di croce si Sant'Andrea; l'intelaiatura veniva riempita negli spazi triangolari risultanti da porzioni di muratura formata da piccole pietre e laterizi e successivamente intonacata. Con tale sistema si arrivarono a realizzare edifici fino a cinque piani di altezza, che tutt'ora sono in perfette condizioni e sono sede di uffici, banche e negozi (Figura 1-5).



Figura 1-5 Ricostruzione della casa a Gaiola portoghese

Alcuni passi confermano la consapevolezza con cui era stata progettata la struttura:

*“struttura lignea, che, in caso di terremoto avrebbe potuto sostenere i solai e lo stesso tetto, anche qualora le murature fossero cadute, data la sua indipendenza da queste ultime. La sua elasticità garantiva una enorme resistenza, accentuata da un flessibile congegno di tasselli, anch’essi lignei”. “Si compone essenzialmente di un insieme di pali (prunos) e traverse (travessenhos) (...). Le traverse sono connesse alle murature con una specie di dadi (maos). Le parti superiori dei pali sono legate fra loro da travi (frechais), e nei vani, da architravi (vergas) e da travetti (pendurais). Il legno usato era quercia o leccio”.*<sup>8</sup>

In tempi recenti la tecnica della gaiola pombalina è stata riproposta in chiave moderna, all'interno del progetto Eco Sistema (Figura 1-6), per la realizzazione di moduli per case ecologiche trasportabili.



*Figura 1-6 Eco Sistema Construção Sustentável proposto da João Carlos Alfonso Alves*

### 1.3 LE ISTRUZIONI REALI DEL GOVERNO BORBONICO

Probabilmente la più precisa definizione di questo sistema costruttivo arriverà a seguito della ricostruzione della Calabria Ulteriore e Sicilia, dopo il disastroso terremoto del 1783 (Figura 1-7).

Quell'anno la regione fu oggetto di ben cinque eventi sismici in un intervallo di tempo di circa due mesi (5 febbraio, 28 marzo). La prima scossa durò 2 minuti, secondo Dolomieu<sup>9</sup> ebbe come epicentro una zona a sud di Polistena (RC). All'evento principale si attribuisce un'intensità pari all'undicesimo grado della scala Mercalli. Le scosse si succedettero spostando l'epicentro dal sud della Calabria risalendo lungo l'appennino verso il nord della regione. Questa devastante sequenza sismica, formata da cinque terremoti ben individuabili, causò danni elevatissimi in una vasta area comprendente tutta la Calabria centro-meridionale ed il messinese. Il quadro cumulativo dei danni è di gravità straordinaria: agli effetti distruttivi sugli edifici si accompagnarono estesi sconvolgimenti dei suoli e del sistema idrogeologico. Oltre 180 centri abitati risultarono distrutti totalmente o quasi totalmente; gravi distruzioni interessarono anche centri urbani importanti per la vita politico-economica e militare del Regno di Napoli e di Sicilia, quali Messina, Reggio, Monteleone e Catanzaro. Secondo le stime ufficiali, nella Calabria meridionale le vittime furono circa 30.000 su

una popolazione di quasi 440.000 abitanti (6,8%). Nel Messinese i morti furono circa 630. Si può dedurre che la gravità del fenomeno, non sia stata nell'elevato grado delle scosse, quanto nella rapidità con cui si sono succedute. Questo non permise agli abitanti di provvedere alla riparazione dei danni e gli edifici che rimanevano in piedi ad una prima scossa, spesso crollavano con la successiva. La normativa emanata dal regno borbonico nel maggio dello stesso anno, con la quale si imponeva l'inserimento di un'intelaiatura in legno all'interno della muratura, segnò un punto di svolta per impedire che i danni sismici si ripetessero con le medesime conseguenze.



Figura 1-7. Terremoto di Reggio e Messina in una rappresentazione pittorica dell'epoca

Già dal '400 le "baracche" ad intelaiatura lignea erano diffuse in varie parti d'Italia. Si trattava di case temporanee, viste come sinonimo di povertà e provvisorietà. Le origini si fanno risalire alle immigrazioni di massa delle popolazioni greco-albanesi giunte nel sud Italia a seguito della caduta dell'Impero Romano d'Oriente (1453). Ciò viene riportato da numerose cronache che descrivono come questa tecnica costruttiva sia stata particolarmente efficace nel contrastare i sismi che si sono succeduti nel corso dei secoli. Un esempio su tutti è rappresentato dal Palazzo del Conte di Nocera, situato a Filogaso (VV). Esso resistette con lievi danni al terremoto del 1683, e verrà preso come riferimento da diversi studiosi ed esperti per individuare le prescrizioni da inserire nella successiva norma antisismica Borbonica. L'utilizzo della "baracca", se non in qualche caso particolare come quello del Conte di Nocera, era destinato alla realizzazione di rifugi provvisori a seguito di evento sismico, assumendo quindi una connotazione temporanea, senza tenere conto del fatto che erano per lo più scomode e facilmente attaccabili dal fuoco.

Si iniziò a vedere questo sistema sotto una nuova luce solo dopo lo sciame sismico del 1783. Il governo Borbonico infatti intervenne con efficienza e tempestività, nominando una commissione ad hoc al fine di redigere indicazioni per la ricostruzione. Facevano parte della commissione vari ingegneri militari, a capo dei quali vi erano Francesco La Vega<sup>10</sup> e Antonio Winspeare<sup>11</sup>. Ispirato in parte alle norme di Lisbona del 1755, il 20 marzo 1784 vennero emanate le *Istruzioni Reali*, vero e proprio regolamento edilizio ed urbanistico, "...che si ispirava in buona parte alle norme del 1755 di Lisbona"<sup>12</sup> ed alla tradizione costruttiva meridionale delle intelaiature lignee. Per la prima volta le strutture baraccate vennero non più considerate come fabbricati provvisori destinati ai poveri, ma come un presidio essenziale alla sopravvivenza a futuri eventi sismici. Dal punto di vista più strettamente urbanistico si vollero limitare i possibili danni prevedendo sezioni stradali di 10-13 metri per le strade principali e 6-8 metri per quelle secondarie, l'introduzione di piazze, il cui numero e dimensione dovevano essere calcolati in base alla popolazione ed essere pensate per fungere anche da rifugio per le emergenze.

Si riportano alcuni articoli di queste *Istruzioni*, commentate in A. Grimaldi "*La Cassa Sacra ovvero la soppressione delle manimorte in Calabria nel secolo XVIII*":

*“Art.1 L’aspetto degli edifici sarà semplice ed elegante.*

*Art.2 La loro altezza sarà di un sol piano superiore, oltre il piano terra in tutto palmi 30. Negli edifici costruiti sulle piazze o sulle ampie vie, oltre alla detta misura potrà alzarsi un mezzanino dai nove ai dieci palmi.*

*Art.3 Divieto dei balconi di grossa mole, in cui vece dei piccoli e leggeri, lontani il più possibile dagli angoli delle mura.*

*Art.4 Fasce di ferro da stringare ogni edificio in tutte le sue parti.*

*Art.5 Le case avranno una rete interna di legname di poca fabbrica rivestita.*

*Art.6 Divieto di costruzione di cupole e campanili.*

*Art.7 La principale strada 50 palmi di larghezza, le trasversali quelle da 24 a 30...*

*...Così per i lavori pubblici. Per i privati fu lasciato libero a ciascun calabrese il diritto della ricostruzione, modificato però dalle savie restrizioni dell’arte che fissarono una novella euritemia ed architettura. E qui ci piace rammentare che Pignatelli persuase ed impose ai calabresi di innestare una rete di legname nelle nuove fabbriche per renderle meno periglianti nelle scosse della terra...che anzi molte case furono abbattute in divieto dell’ordine...”.<sup>13</sup>*

## 1.4 LA DEFINIZIONE DEL LINGUAGGIO COSTRUTTIVO

Questo nuovo regolamento troverà una principale teorizzazione con Giovanni Vivencio<sup>14</sup>, che analizzerà e descriverà dettagliatamente le caratteristiche della "Casa Baraccata". Il prototipo in questione viene descritto nella "Istoria e Teoria de' tremuoti"<sup>15</sup> e illustrato da Vincenzo Ferraresi.

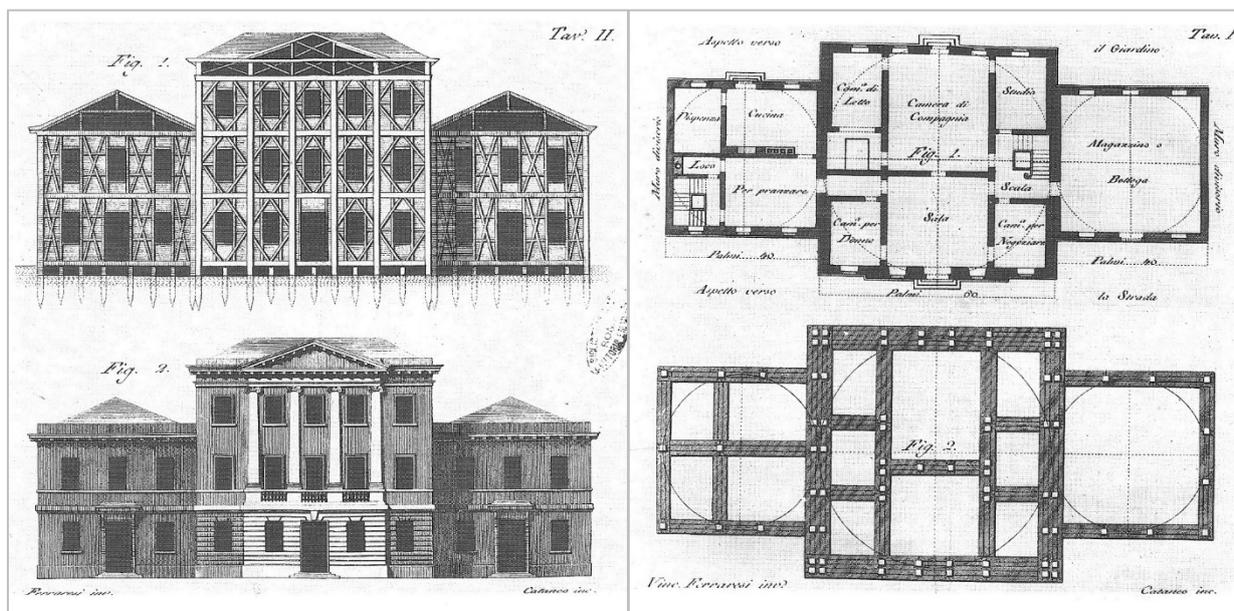


Figura 1-8 Sezione, Prospetto e Pianta della casa e della platea di fondazione

Il progetto, di tre piani e con due padiglioni più bassi laterali, presentava corpi di fabbrica volutamente a pianta quadrata e che rispettavano una simmetria bi-assiale (uguale rigidezza alle azioni dinamiche nelle due direzioni principali). I due corpi laterali avevano la funzione di contrafforti con il compito di scaricare l'azione sismica al corpo centrale e inoltre, data l'altezza inferiore, abbassavano il baricentro della costruzione, diminuendo quindi l'accelerazione nascente in caso di sisma (Figura 1-8).

*"...Da questa disposizione generale della casa se ne ricava ancora un vantaggio notevole, qual è degli angoli di tutte le strade occupate da fabbriche basse, le quali contribuendo alla solidità apporterebbero meno ruina in caso di violentissimo, e sovversivo Tremuoto".<sup>16</sup>*

La robusta fondazione era costituita da pali di quercia che sorreggevano travi rovesce intelaiate con travi di bordo anch'esse di quercia, connesse con traverse nelle quali si innestavano i pilastri, alcuni dei quali, più lunghi, erano anch'essi conficcati nel terreno generando quindi totale

solidarietà tra suolo e corpo di fabbrica. I pilastri, a sezione quadrata, secondo il principio innovatore che sarà uno dei fattori determinanti per il successo del Balloon Frame, non erano composti da un'unica sezione, ma a gruppi di due o quattro elementi distanziati a seconda della posizione e, di conseguenza, del carico. Si perseguiva in tal modo un forte livello di standardizzazione dimensionale con la possibilità di prefabbricazione anche se nel progetto erano presenti diverse utopie costruttive. Osservando le tavole i pilastri risultano passanti e hanno un'altezza superiore a tre piani, senza presentare alcun tipo di giunto, e il loro posizionamento presenta incongruenze tra piante ed alzato (Figura 1-9).

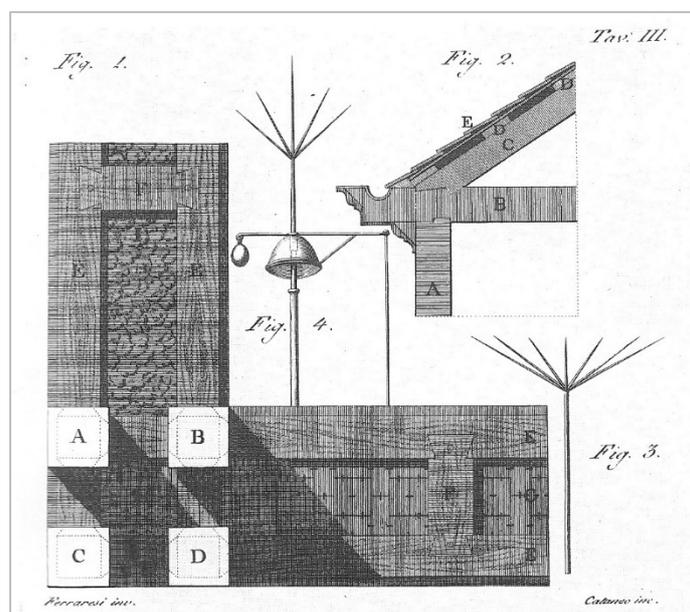


Figura 1-9 Modo di costruire muri negli edifici pubblici, dettaglio della struttura in legno e del riempimento in pietra da taglio. Dettaglio della cornice, della grondaia e del tetto con lastre di lavagna o certa cotta. Dettagli dei conduttori.

Per quanto riguarda l'edificio più alto si aveva la presenza di due telai, l'uno interno all'altro, resi solidali da elementi lignei posti trasversalmente che svolgevano la funzione di diatoni, uniti da collegamenti a coda di rondine e pioli. Le travi corrispondevano ai piani e nei riquadri tra queste e i pilastri erano inseriti complessi controventamenti realizzati con tavole formanti croci di Sant'Andrea, in aggiunta agli ulteriori elementi costituiti dai telai fissi di porte e finestre. Il vuoto tra le armature lignee era riempito di pietre squadrate ben cementate e legate tra loro con grappe metalliche o da muratura incerta: la leggerezza della muratura di ricoprimento e di riempimento era intuito come un vantaggio nei confronti delle azioni sismiche.

L'edificio è realizzato con una doppia intelaiatura lignea con presenza di diagonali controventanti a forma di croce. Il materiale leggero offre al sisma una massa ridotta, portando alto beneficio alle resistenze dinamiche complessive. Il vuoto tra le parti lignee è riempito con pietre

squadrate ben cementate e legate tra loro con grappe metalliche. Le fondazioni sono fatte con pali di quercia ben piantati nel terreno, assicurando una decisa solidarietà tra suolo e corpo di fabbrica. Il complesso è caratterizzato da tre edifici a due piani, disposti in pianta con simmetria bi-assiale. Il centrale, più alto, e i laterali più bassi che fungono da veri e propri contrafforti. Tutto l'apparato neoclassico, decorazioni, lesene vengono concepiti come un presidio antincendio.

Tuttavia la trattazione del Vivenzio risulta per certi versi piuttosto empirica, in quanto non si fanno riferimenti di carattere statico riguardo la struttura, ma si rimanda alle “*esperienze fatte da più grandi filosofi del nostro secolo*”, ed alle “*verità, che si dimostrano nella meccanica e nella statica*”. Proprio per questo, la concezione progettuale del Vivenzio appare forse troppo idealizzata. Alcuni aspetti costruttivi risultano poco pratici se non impossibili da realizzare per come sono stati disegnati, per non parlare dell'enorme quantitativo di legname lavorato richiesto. Ciò non toglie il fatto che con questo progetto fossero stati centrati dei fondamentali concetti antisismici, a noi oggi ben noti, ma che per l'epoca, e con i mezzi a loro disposizione, furono davvero all'avanguardia.

I contenuti del progetto vivenziano diventeranno parte integrante della normativa varata dal Governo Borbonico come prescrizioni strettamente necessarie per la ricostruzione dei futuri edifici. Si sa infatti che la casa di un nobile di Bagnara venne demolita in quanto si era iniziata la costruzione senza rispettare le regole della casa baraccata. Altre descrizioni più dettagliate e meno empiriche ci vengono fornite anche dal Milizia<sup>17</sup> nel suo libro “*Principi di architettura Civile*”.<sup>18</sup> Egli, come Vivenzio, attribuisce agli edifici ad intelaiatura lignea ottime proprietà contro le sollecitazioni dinamiche, in quanto si fornisce una intima connessione tra tutti gli elementi costituenti la struttura e anche elevata duttilità, facendo funzionare il tutto come una unica massa. Milizia descrive un telaio resistente in legno composto da travicelli verticali e orizzontali, i cui vuoti vengono riempiti in muratura, fornendo un notevole aumento di rigidezza. A differenza di Vivenzio ebbe una intuizione molto più moderna riguardo le fondazioni. Proponeva cioè di eliminare la connessione tra esse e il manufatto, precorrendo i moderni isolatori sismici.

Si riporta un passo dal libro “*Principi di architettura civile*”.

“...V'è un'altra specie di mura detti intelaiati: si compongono di travicelli verticali e orizzontali; e i vuoti si riempiono in muratura...un muro sarà forte I) se avrà una grossezza conveniente II) se i materiali saranno ben assettati III) se saranno ben concatenati IV) se si innalzerà perfettamente a piombo V) se si ergerà uniformemente da per tutto... (Dal capitolo IX). Per difendersi da tremuoti voglion esser case di legno, ma in maniera che ciascun pezzo sia così ben connesso e incassato cogli altri, che formino tutti insieme una sola massa. Non devesi questa massa piantare o fondare in terra, ma posare soltanto sopra un pavimento di pietre più grande della pianta della

*casa...L'altezza di questa casa non deve eccedere la sua lunghezza o larghezza, piuttosto sia un tantino minore. In questa guisa per qualunque scossa il centro di gravità rimarrà sempre nella sua base. Le scosse potranno farla tremare, ma non mai rovesciare, né precipitare, come le case di un muro: ella è una cassa...”*<sup>19</sup>

## 1.5 COSTRUZIONI IN LEGNO NELLA CALABRIA DEL XIX SECOLO

La rilevante attività sismica nel corso dell’800 e l’inizio della sua sistematica documentazione favorì la nascita di una pubblicistica specializzata sull’arte del costruire, incentivando la sperimentazione di nuove tecniche, potendo sfruttare l’avvento e la diffusione di nuovi materiali come l’acciaio e il conglomerato cementizio.

Proprio in una di queste riviste specializzate, per la precisione nel periodico torinese “L’ingegneria civile e le arti industriali” del 1876, Luigi Pesso pubblica un articolo intitolato “Consolidamento delle fabbriche nelle Calabrie contro i danni dei terremoti”<sup>20</sup> dove viene ancora una volta consigliato l’uso della casa baraccata come sistema costruttivo di prevenzione antisismica. Pesso propone a sua volta una rivisitazione personale di tale tecnica, descrivendo nel dettaglio materiali da impiegare, dettagli costruttivi e modalità esecutive (Figura 1-10).

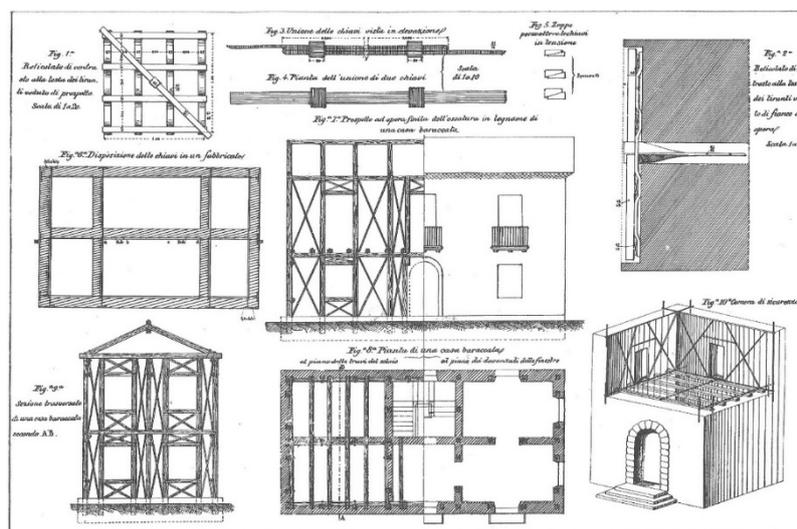


Figura 1-10. Sistema di prevenzione antisismica (L. Pesso): tiranti in ferro, casa baraccata e camera di sicurezza.

Sostanzialmente per tutto il 1800 si proseguirà utilizzando come principale tecnologia quella baraccata, continuando a ricalcare quelle che erano da sempre le prassi costruttive tradizionali della zona. Sfortunatamente, ad oggi, non abbiamo più testimonianza di questi edifici costruiti tra ‘700 e

'800 a causa delle demolizioni adoperate per le ricostruzioni dopo i terremoti di inizio '900. I pochi esempi ancora sopravvissuti sono di difficile individuazione dall'esterno, a meno che non presentino parziali danneggiamenti che ne mettano in luce la struttura interna. Da questi pochi casi rimasti si può constatare come, con l'andare del tempo, la cultura tecnica della casa baraccata abbia perso progressivamente gran parte delle concezioni di base che la contraddistinguevano. Un esempio è costituito dalla frequente mancanza degli elementi diagonali, e l'impiego di materiale incoerente per realizzare la muratura, aspetti fondamentali per garantire una corretta risposta al sisma. Questa povertà tecnica, dovuta alla scarsa attenzione ai dettami originali, mise in luce come questo sistema non fosse stato effettivamente capito fino in fondo minando l'efficacia delle realizzazioni.

Il sistema baraccato borbonico non si sviluppò soltanto nel mezzogiorno, ma si diffuse anche nel resto d'Italia. Ne sono una testimonianza le varie menzioni fatte nelle normative di Norcia (1859), Ischia (1883) e in Liguria (1887), dove il sistema baraccato viene ancora volta indicato come il più idoneo a resistere ai movimenti sismici.

---

## 1.6 L'AVVENTO DEL XX SECOLO

---

Dopo il terremoto del 1908 che mise in ginocchio Reggio Calabria e Messina, la cultura tecnica e la manualistica virano progressivamente verso l'utilizzo del cemento armato come principale tecnologia antisismica.<sup>21</sup> Nonostante questo, la Commissione nominata allo scopo di valutare le nuove direttive costruttive, successivamente ai sopralluoghi effettuati nei siti colpiti, nella sua *relazione* constaterà come:

*" Il sistema delle case baraccate, secondo le norme imposte coi regolamenti del Governo borbonico subito dopo il terremoto del 1753, è un sistema che può considerarsi buono anche oggi e da consigliarsi in tutti quei casi nei quali difettano materiali per sistemi di costruzione più perfetti, o meglio rispondenti alle speciali condizioni create alle costruzioni nelle zone sismiche e dove invece si può a buon mercato, e sul luogo stesso, avere a disposizione legname di buona qualità, di dimensioni considerevoli per le baraccature, mattoni o pietra di forma regolare, quanto meno con due piani di posa, calce e sabbia di buona qualità".<sup>22</sup>*

Nonostante il sistema baraccato sia considerato ancora valido, le sue performance verranno sempre più relegate a strutture di piccole dimensioni relative all'edilizia comune. È significativo però notare come il tema della casa baraccata ritorni in alcuni dei 54 brevetti presentati e rilasciati dal

Ministero dell'Agricoltura, Industria e commercio tra il novembre del 1908 e il gennaio del 1910. Le illustrazioni di questi brevetti per case antisismiche, pur utilizzando materiali e tecniche più all'avanguardia, pongono l'accento sulla standardizzazione dei sistemi costruttivi, operazione non dissimile da quando delegato dalle *Istruzioni* emanate dal Governo Borbonico nel 1783.

Di seguito si riportano alcuni esempi di brevetti, dove è evidente l'influenza e il richiamo della tecnica costruttiva che caratterizza il sistema baraccato:

- TIPO DI CASA CON SCHELETRO IN LEGNO E LAMIERA STIRATA RESISTENTE AL TERREMOTO (ACS, Min. AIC, UCB n. 101282) Luigi Lanza, Castiglione Cosentino (CS). Viene definito uno scheletro in legno fatto da travi verticali e orizzontali, irrigidite da elementi diagonali. Il rivestimento è composto da lamiera stirata e malta cementizia. (Figura 1-11)

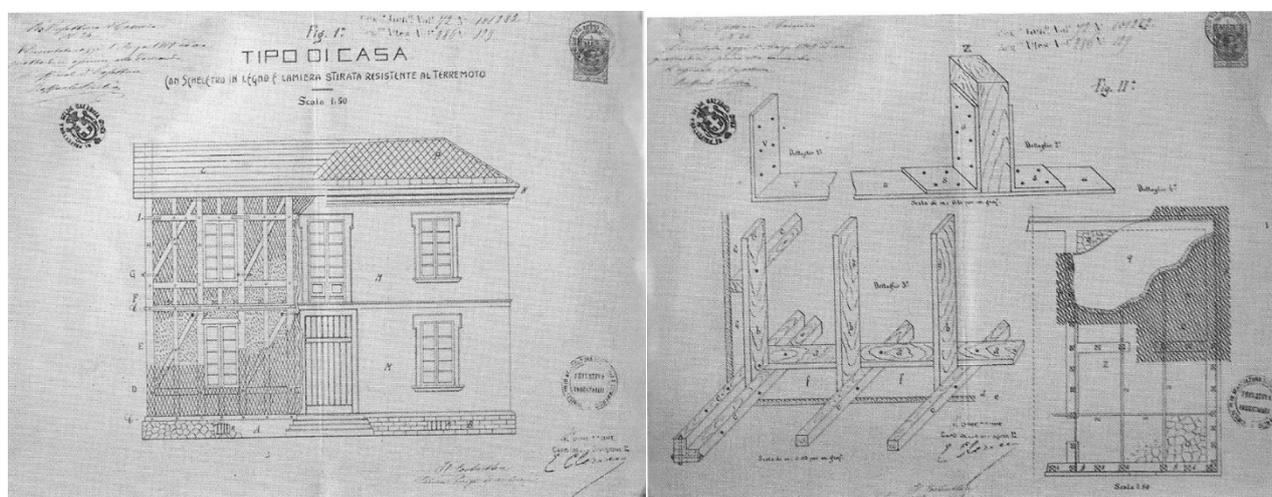


Figura 1-11 TIPO DI CASA CON SCHELETRO IN LEGNO E LAMIERA STIRATA RESISTENTE AL TERREMOTO (ACS, Min. AIC, UCB n. 101282) Luigi Lanza, Castiglione Cosentino (CS)

- NUOVO SISTEMA DI COSTRUZIONI EDILIZIE RESISTENTI AI TERREMOTI (ACS, Min. AIC, UCB n. 101281) Luigi Lanza, Castiglione Cosentino (CS). Il materiale utilizzato per l'intelaiatura è l'acciaio. Tamponamento costituito da mattoni, finiti con l'applicazione di lamiera stirata o filo telegrafico in economia per applicare la malta cementizia. (Figura 1-12)

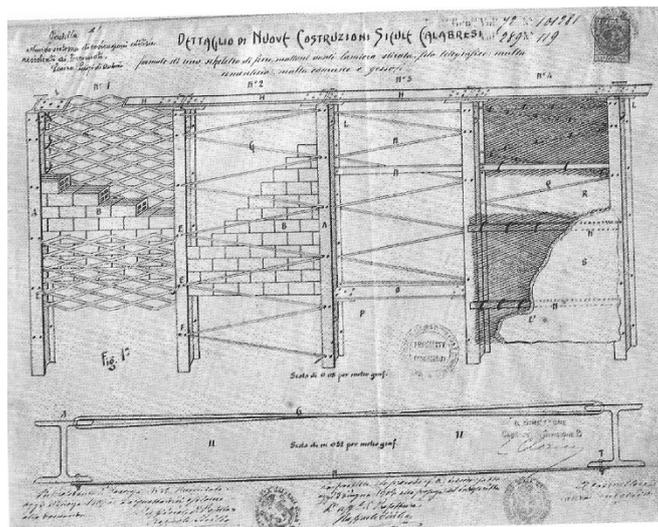


Figura 1-12 NUOVO SISTEMA DI COSTRUZIONI EDILIZIE RESISTENTI AI TERREMOTI (ACS, Min. AIC, UCB n. 101281) Luigi Lanza, Castiglione Cosentino (CS).

- SISTEMA DI COSTRUZIONE DI CASE RESISTENTE AI TERREMOTI (ACS, Min. AIC, UCB, n. 103254) Pasquale Frezza, Laureana di Borriello (Reggio Calabria). Viene descritto il brevetto come una struttura lignea completata con tamponamenti in mattoni e tubi cavi di argilla, legata insieme da grossi fili di ferro assicurati alla maglia strutturale in legno. Viene posto l’accento sull’utilizzo di materiali tradizionali usati dalle maestranze calabresi, per ovviare alle difficoltà di messa in opera che riscontravano andando a costruire in cemento armato. L’impiego del legno per realizzare la struttura portante viene considerato fondamentale per costruire una gabbia che sia resistente al sisma in quanto in grado di deformarsi e adattarsi. (Figura 1-13 )

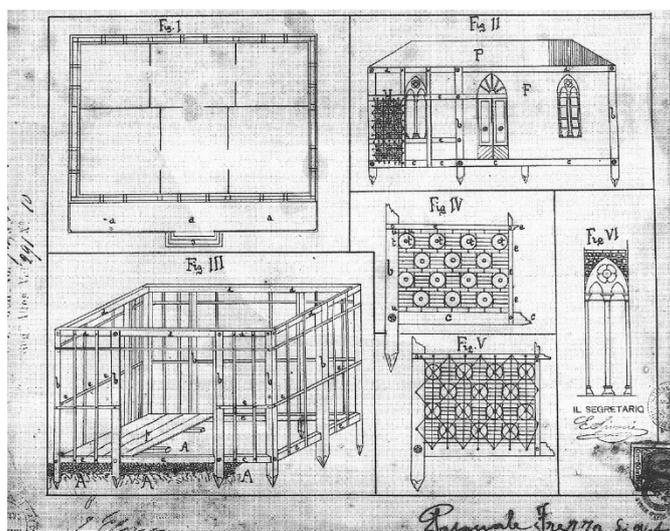


Figura 1-13 SISTEMA DI COSTRUZIONE DI CASE RESISTENTE AI TERREMOTI (ACS, Min. AIC, UCB, n. 103254) Pasquale Frezza, Laureana di Borriello (Reggio Calabria)

---

## 1.7 CONSIDERAZIONI

---

La ricerca svolta dimostra come questo sistema costruttivo tradizionale italiano sia andato nel corso del tempo perdendosi senza una particolare motivazione. La sua efficacia è stata comprovata dal riscontro per via empirica avvenuto "sul campo", che ne ha determinato la sua grande diffusione. Il radicamento sul territorio italiano è ben evidente nell'impiego di materie prime disponibili in abbondanza nel nostro territorio che ne hanno favorito l'utilizzo limitando fortemente i costi di approvvigionamento. L'utilizzo congiunto del legno per la parte strutturale e del laterizio per la parte di tamponamento conferisce alla costruzione una elasticità maggiore rispetto a quelle muratura semplice ed una efficienza energetica per le latitudini mediterranee superiore rispetto quelle con tamponamento leggero in legno.

Inoltre questo tipo di tecnica costruttiva può facilmente essere adattata ad alcuni dei punti fondamentali che si vogliono valorizzare con questa ricerca, tra cui il fatto di essere a secco, facilmente standardizzabile e realizzabile con materiali sostenibili.

Il costruire in legno ha radici che si perdono nei secoli ed ha sempre risposto in maniera eccellente agli eventi sismici.

La *gaiola pombalina* portoghese, *casa baraccata* italiana, la *himis turca* (Figura 1-14) e molti altri esempi sparsi in Europa ed Asia hanno risposto efficacemente, nel corso dei secoli, a disastrosi terremoti. Si riporta una citazione datata 1908, in cui una squadra di ingegneri conferma come gli esempi di casa baraccata realizzati un secolo e mezzo prima abbiano brillantemente superato il sisma che colpì la Calabria nel medesimo anno.

*"...le case baraccate antiche, con ossature di legnami disposte in senso verticale, orizzontale e diagonale, tra di loro collegate e racchiuse entro le murature perimetrali e trasversali, benché presentano lesioni e scompaginamenti nelle masse murali, pure sono rimaste in piedi, salvando la vita alle persone che ospitavano; lo stesso può ripetersi delle case intelaiate, cioè di quelle la cui ossatura è di legname, mentre le pareti negli specchi formati dalle membrature di legno sono riempiti di muratura...Risulta anzitutto provato che il sistema delle case baraccate può considerarsi buono ancora oggi".<sup>23</sup>*

Nonostante la valenza antisismica dei sistemi costruttivi lignei intelaiati fosse, e rimane, innegabile, nel corso dei secoli questi sono stati abbandonati e rimpiazzati, senza motivo apparente, da nuove tecnologie, come il calcestruzzo armato.



*Figura 1-14 "Himis" rimasta in piedi a dispetto di molte costruzioni in cemento armato nel terremoto del 1999*

<sup>1</sup> Corrado Latina, *Terremoti e costruzioni: progetto e tecnologia della resistenza sismica* (Firenze: Alinea, 1989).

<sup>2</sup> Vitruvius Pollio, *I dieci libri dell'architettura*, Libri rari : collezione di ristampe con nuovi apparati, 1987.

<sup>3</sup> Vincenzo Magnati, *Notitie storiche de' terremoti succeduti ne' secoli trascorsi, e nel presente, indirizzate alla serenissima real maestà di Carlo 2* (In Napoli: appresso Antonio Bulifon, 1688).

<sup>4</sup> Marcello Bonito, *Terra tremante*, 1980.

<sup>5</sup> Sebastião Josè de Carvalho e Melo, conte di Oeiras e marchese di Pombal (Lisbona, 13 maggio 1699 – Pombal, 15 maggio 1782) fu "Ministro del regno" (l'equivalente di un odierno ministro dell'interno) e, de facto, capo del governo sotto il regno di Giuseppe I dal 1750 al 1777.

<sup>6</sup> Carlos Mardel (nato Martell Károly; Pressburg; c. 1695 - Lisbon; 8 September 1763) ufficiale militare Ungaro-Portoghese, ingegnere e architetto.

<sup>7</sup> Eugènio dos Santos de Carvalho (1711-1760) architetto e ingegnere militare portoghese

<sup>8</sup> José Augusto França, *Una città dell'illuminismo : la Lisbona del marchese di Pombal*, Collana di architettura, 1972.

<sup>9</sup> Dèodat Guy Silvain Tancrede Gratet de Dolomieu (Dolomieu, 23 giugno 1750 – Châteauneuf, 28 novembre 1801) è stato un geologo francese, da cui hanno preso nome le montagne delle Dolomiti.

<sup>10</sup> Francesco La Vega (Roma, 25 giugno 1737 - Portici, 24 dicembre 1804) architetto di famiglia spagnola, direttore degli scavi di Ercolano e Pompei e scopritore nel 1764 del Tempio di Iside, è famoso per i suoi criteri nel restauro degli antichi edifici.

<sup>11</sup> Antonio Winspeare senior (Livorno, 1739 - Napoli, 1820) fu un militare, intendente e ingegnere al servizio del Regno delle Due Sicilie. È ricordato fra i migliori tecnici del governo borbonico

<sup>12</sup> Clementina Barucci, *La casa antisismica : prototipi e brevetti : materiali per una storia delle tecniche e del cantiere*, 1990.

<sup>13</sup> Achille Grimaldi, *La Cassa Sacra, ovvero La soppressione delle manimorte in Calabria nel secolo 18* (Napoli: Stamperia dell' Iride, 1863).

<sup>14</sup> Giovanni Vivenzio (174? – 1819), Cavaliere del Regale, e Militare ordine costantiniano di S. Giorgio; Primo medico delle LL.MM. Direttore de Regali Militari Spedali delle Sicilie, e delle pubbliche cattedre di Chirurgia, Ostetricia, Anatomia, e Fisica Sperimentale, e Protomedico Generale del Regno.

<sup>15</sup> Giovanni Vivenzio, *Istoria de' tremuoti avvenuti nella provincia della Calabria ulteriore e nella città di Messina nell'anno 1783* (Napoli: nella Stamperia regale, 1788).

<sup>16</sup> Vivenzio.

<sup>17</sup> Francesco Milizia (Oria, 15 novembre 1725 – Roma, 7 marzo 1798) è stato un teorico dell'architettura, storico e critico d'arte italiano, teorico del Neoclassicismo.

<sup>18</sup> Francesco <1725-1798> Milizia, *Principi di architettura civile*, Planning & design, 1847.

<sup>19</sup> Milizia.

<sup>20</sup> Luigi Pesso, *Sul consolidamento delle fabbriche nelle Calabrie contro i danni dei terremoti: incatenamento delle fabbriche ; case baraccate ; camera di sicurezza* (Camilla e Bertolero, 1877).

<sup>21</sup> Ornella Fiandaca, *Le béton armé «système Hennebique» a Messina fra XIX e XX secolo: dalle sperimentazioni pre-terremoto del brevetto alle sue declinazioni antisismiche* (Ariccia: Aracne, 2014).

<sup>22</sup> Barucci, *La casa antisismica*.

<sup>23</sup> I Maganzini et al., «Giornale del Genio Civile: rivista dei lavori pubblici», 1909.



---

## 2 SVILUPPO DEL MODULO

---

Lo sviluppo del modulo costruttivo INTEGRO BS 400 (BUILDING SYSTEM 400) ha seguito un percorso piuttosto lungo. Partito da un'intuizione del prof. Riccardo Gulli, che mirava a accorpate in un unico progetto diverse linee di ricerca aperte all'interno del Dipartimento di Architettura, ha subito diversi cambi di configurazione nel tempo. Anche i materiali utilizzati sono in parte cambiati, in alcuni casi per cause contingenti mentre in altri per una precisa scelta tecnologica di ottimizzazione.

I principi alla base del sistema sono però sempre rimasti gli stessi, ovvero la riproposizione in chiave moderna di una tecnica costruttiva storica ispirandosi agli assunti fondamentali di forte industrializzazione del processo e di soddisfacimento dei criteri di bioclimatica massiva, tipici dei contesti mediterranei.

---

### 2.1 CONCEPT

---

Nella sua prima concezione il sistema segue i requisiti illustrati in precedenza ed in particolare approccia i criteri di una edilizia sostenibile basata sul principio della costruzione “bioclimatica e massiva”, qui intesa come modello alternativo all'edificio leggero ed adiabatico. Tale principio si fonda sul presupposto che i modi di costruire sono anche espressione della variabilità delle condizioni ambientali e climatiche dei luoghi, e che conseguentemente la costruzione “bioclimatica e massiva” rappresenti la migliore risposta alle esigenze poste dal confort abitativo e dalla riduzione dei consumi nelle aree con regimi climatici temperati e mediterranei. Un obiettivo perseguito sia attraverso una ottimizzazione delle prestazioni termiche fornite da materiali massivi, in modo da migliorare l'inerzia termica e garantire uno sfasamento adeguato in regime estivo, sia con una corretta esposizione “sole-aria”, ovvero una appropriata organizzazione tipologico-funzionale degli spazi abitativi. Oltre a tali requisiti il sistema mira a soddisfare le istanze poste dalla sicurezza strutturale in contesti ad elevata esposizione sismica, quelle di rapidità ed economicità esecutiva garantita dall'impiego di procedimenti a secco e quelle di tutela dei siti con l'impiego lavorazioni reversibili.

In sintesi i primari requisiti del sistema sono così definibili:

- Rapidità ed economicità esecutiva
- Riciclabilità di prodotti e componenti
- Sostenibilità dei processi

- Flessibilità d’uso
- Adattabilità funzionale
- Sicurezza sismica
- Componibilità tipologica
- Salubrità e confort abitativo interno
- Efficienza energetica
- Isolamento acustico
- Durabilità



*Figura 2-1 Fasi di realizzazione e sottostruttura di controventamento in acciaio*

L’organismo strutturale si basa sull’impiego combinato di uno scheletro puntiforme in acciaio, con un passo di 400 cm, e di pareti a conci (a base di argilla trattata con i processi di geopolimerizzazione AAM) armate con barre e piatti in acciaio. La scelta di impiegare una struttura “mista”, con scheletro leggero e murature armate, è motivata da alcune primarie considerazioni. In primo luogo i dettami posti dalla attuale normativa sismica (NTC 2008) limitano fortemente l’impiego di murature armate in termini di flessibilità tipologica degli organismi edilizi, essendo vincolata alla continuità strutturale delle singole cellule, ovvero alla scatolarità dell’impianto murario. Il sistema INTEGRO BS consente di eseguire strutture che rispondono ai criteri della muratura armata ma al contempo non sono condizionate al rispetto di detti vincoli. L’idea è quella di garantire l’esecuzione di pareti collaboranti con la struttura così da fornire controventamento ai telai con l’impiego di procedimenti interamente a secco (Figura 2-1).

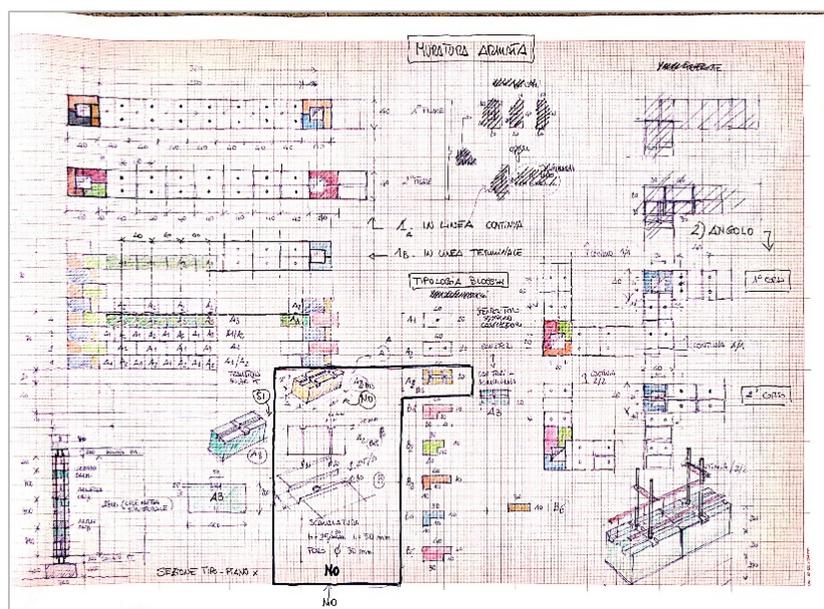


Figura 2-2 Tipologie blocchi, schemi di posa, sistema di armatura. Schizzi prof. Gulli

Altra specificità del sistema riguarda l'introduzione di solai in struttura lignea con impalcato collaborante costituito da pannelli sandwich composti di doppio tavolato con anima in grigliati stampati in PFRV. Questo impalcato, denominato INTEGRO FS PRFV (FLOOR SYSTEM), sarà presentato nel dettaglio nella seconda parte di questa tesi di dottorato. In ultimo la tipologia a volta in struttura reticolare in acciaio con camera d'aria ventilata, consente di calibrare i flussi termici in ragione della variabilità delle condizioni climatiche stagionali e di adattarsi all'impiego di sistemi di produzione energetica con fonti rinnovabili.

Questo primo concept del sistema prevede fondazioni a plinti e cordoli in c.l.s. prefabbricati con fori per la ventilazione e la canalizzazione impiantistica. Pareti in muratura armata in blocchi a base di argilla delle dimensioni standard di 20x20x40. La serie A, derivata dal blocco standard, si differenzia in 4 tipologie:

- A1 = semplice senza forature;
- A2 = con 1 foro passante;
- A3 = con 2 fori passanti;
- A4 = con 1 foro passante e scanalature.
- 

La serie B (da B1 a B5) è costituita da pezzi speciali, senza forature, diversamente conformati per garantire l'integrazione con i ritti della struttura metallica e la chiusura dei nodi d'angolo (Figura 2-2).

Lo scheletro è in struttura metallica con profilati scatolari per i ritti e reticolari o alveolari per le travi a formare una struttura a telaio compatibile con un orizzontamento ad ordito ed impalcato quale il sistema INTEGRO FS PRFV. La copertura è pensata realizzata con una volta a botte in lamiera grecata composta e barre di controvento (Figura 2-3).

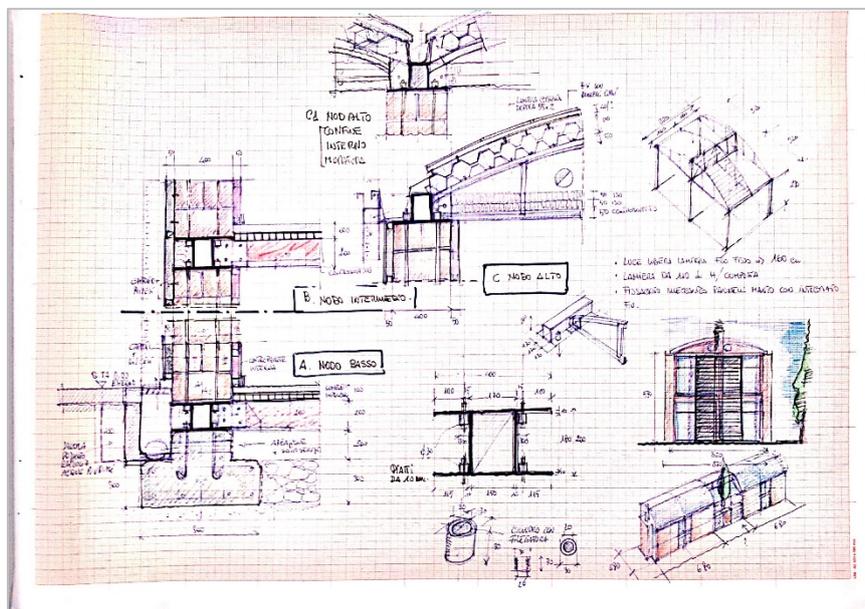


Figura 2-3 Bozza dettagli costruttivi. Schizzi prof. Gulli

Per i componenti edilizi ci si rivolge a componenti standardizzati e già presenti sul mercato. Serramenti standardizzati con vetrocamera con sistema di oscuramento integrato ed automatizzato. All'esterno si prevede un isolamento a cappotto con sottostruttura e rivestimento integrato. Manto di copertura con pannelli integrabili con fotovoltaico. Il rivestimento interno sarà realizzato con una controparete in pannelli con sottostruttura, ottimale per garantire il passaggio degli impianti. Pavimentazioni fissate su pannelli fonoassorbenti e disaccoppiati ed eventuali controsoffittature in pannelli isolanti e ignifughi.

Già in questa prima fase, il rispetto dei requisiti della flessibilità funzionale, adattabilità tecnologica e componibilità tipologica del sistema, consente di ottenere un gamma articolata di soluzioni architettoniche. Il focus è sulla tipologia edilizia che meglio risponde alle esigenze sociali attuali, sia pubbliche che private, ovvero la residenza a basso costo.

La soluzione proposta con il sistema INTEGRO BS 400, prevede una organizzazione compatta di unità edilizie disposte su due livelli e basata sulla componibilità di cellule elementari. La flessibilità funzionale dell'alloggio consente di calibrare le esigenze abitative per ospitare nuclei variabili da due fino a sei abitanti. La modalità di aggregazione delle unità edilizie segue il principio del rendimento tipologico, qui inteso come soluzione ottimizzata in termini di efficienza

prestazionale, efficacia economica, funzionalità d'uso e compatibilità ambientale. In aggiunta soddisfa i primari requisiti dell'edilizia bioclimatica riguardo alla compattezza (rapporto S/V), alla ventilazione trasversale degli alloggi, all'orientamento eliotermico (nord-sud), alla permeabilità (presenza di corti verdi), allo sfruttamento dell'irraggiamento solare in copertura (Figura 2-4).

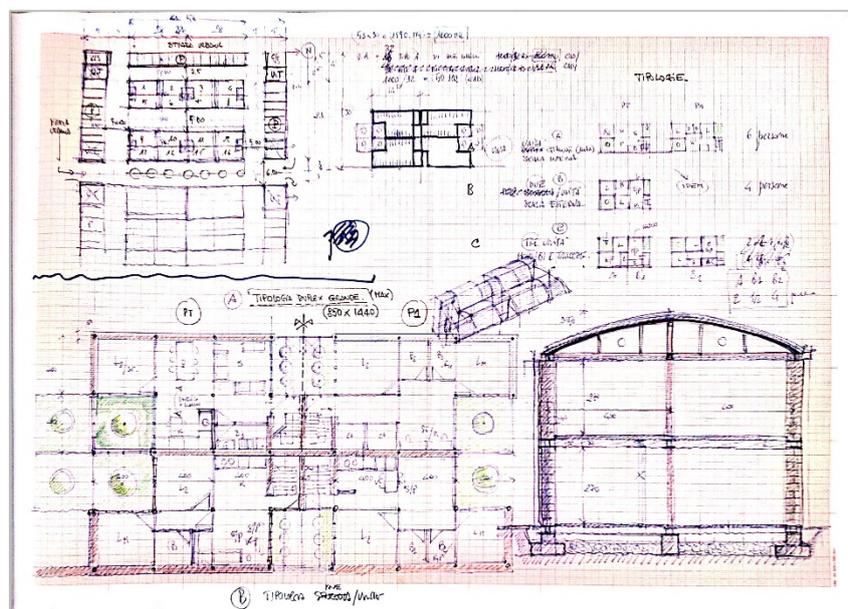


Figura 2-4 Componibilità tipologica. Schizzi prof. Gulli

## 2.2 PRIMA EVOLUZIONE

Una prima fase di riflessione sulle specifiche del concept iniziale del sistema ha portato a definire meglio la struttura portante a scheletro puntiforme in acciaio oltre che a riconoscere e risolvere alcune problematiche relative alla geometria dei blocchi che costituiscono la parte massiva del tamponamento.

La maglia strutturale ha mantenuto un interasse di 4 metri in pianta con altezza variabile in base alla dimensione dell'interpiano che dipende dalla destinazione d'uso di progetto. Per la modularità del sistema si è scelto un pilastro scatolare a sezione quadrata di 200x200 mm mentre per le travi una sezione a doppia T con doppia anima. Questa scelta consente di realizzare una sorta di profilo scatolare a sezione quadrata con ali superiori e inferiori. Questo elemento ha le stesse dimensioni del pilastro e si innesta direttamente su di esso. Le ali laterali della trave presentano i fori di alloggiamento dell'armatura primaria del tamponamento murario, e dimensionalmente definiscono lo spessore murario di 40 cm.

Il tamponamento armato è strutturalmente interconnesso alle travi inferiore e superiore attraverso un sistema di armatura primaria verticale. Questa è costituita da 9 coppie di barre dywydag le quali connettono trave superiore e inferiore e passano all'interno dei blocchi in geopolimero, appositamente forati. Le barre sono dotate di filettatura su entrambe le estremità, che permette il post-tensionamento delle stesse mediante piastra e dado per il serraggio. L'armatura verticale è infatti posta in trazione e il tensionamento svolge due funzioni. In primo luogo permette di mettere in compressione verticale i blocchi in geopolimero, che vengono stretti fra trave inferiore e superiore, con evidenti benefici di stabilità e risolvendo il problema di labilità dei blocchi derivante dalla posa a secco. È proprio questo sistema che si fonda sull'assemblaggio di elementi strutturali discreti connessi tra loro con un sistema di vincoli di contatto semplici e senza l'utilizzo di materiali leganti, a permettere di ottenere un elemento costruttivo caratterizzato da un elevato grado di monoliticità e resistenza, capace nel suo complesso di opporsi anche a sforzi di trazione.

In secondo luogo il tensionamento delle barre direttamente connesse alla struttura portante si ritiene possa assolvere anche una funzione statica di controventamento dello scheletro puntiforme.

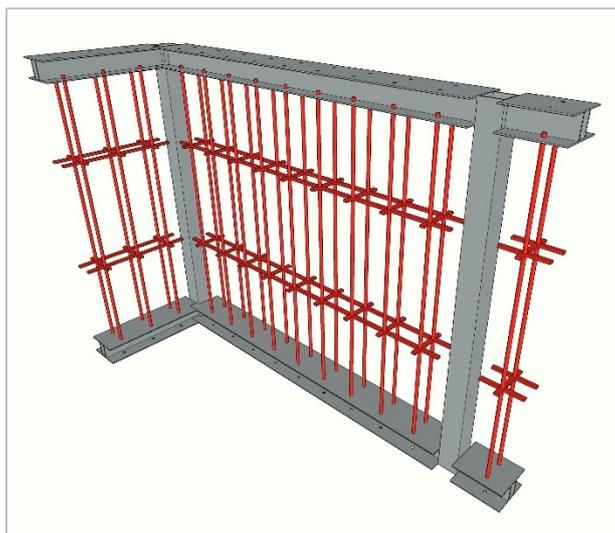


Figura 2-5 Definizione della maglia strutturale nella prima evoluzione

L'armatura verticale collabora poi con un sistema di armatura secondaria orizzontale costituita da staffe in acciaio ogni 4 corsi, che corrono longitudinalmente lungo tutta la lunghezza della muratura da pilastro a pilastro. La struttura secondaria ha duplice funzione; la prima è quella di contribuire al sistema di compressione della muratura: mediante l'inserimento di manicotti filettati sulle le barre verticali si opera la connessione di queste con le piastre orizzontali che vengono spinte verso il basso mettendo la muratura sottostante in compressione. Altra funzione dell'armatura secondaria, da cui deriva la conformazione a piastra, è quella di ripartire uniformemente su tutta la

sezione muraria le spinte verticali derivanti dal tensionamento applicato in corrispondenza delle barre verticali puntiformi, nonché di ripartire uniformemente il peso dei blocchi superiori. L'armatura secondaria, in questa soluzione, non è connessa meccanicamente ai pilastri laterali e non interferisce con lo schema statico portante (Figura 2-5).

Come detto i blocchi costituiscono la parte massiva della parete e sono conformati in modo da avere dei fori appositi per il passaggio delle barre dywydag. In questo modo e grazie all'azione di compressione cui sono sottoposti, i blocchi sono vincolati a rimanere nella loro posizione, superando i problemi di labilità derivanti dalla posa a secco. Il sistema di armature va quindi a "sostituire" la matrice legante fra i giunti. In secondo luogo, la forma e la disposizione dei blocchi sono state progettate col fine di ottenere un buon ingranamento dei conci, caratteristica fondamentale per avere la regola dell'arte nelle murature costituite dall'assemblaggio di elementi discreti, in quanto un corretto ingranamento conferisce una maggiore monoliticità alla struttura nel suo complesso. Quindi i giunti di contatto verticali fra i conci non sono mai sovrapposti: si alternano un corso costituito da elementi diatonici ad un corso costituito da elementi disposti longitudinalmente e i giunti sono sempre sfalsati in ogni punto della muratura.

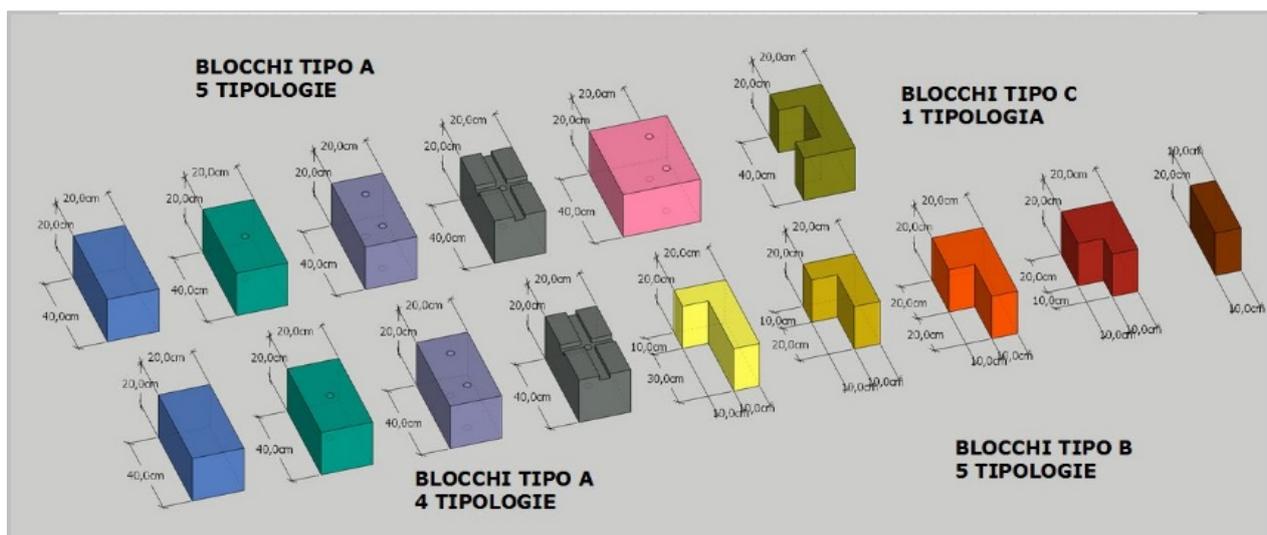


Figura 2-6 Serie di blocchi. In basso concept iniziale. In alto ottimizzazione nella prima evoluzione.

Si è poi lavorato per la semplificazione della soluzione d'angolo. Per evitare un'eccessiva discontinuità metrica in corrispondenza dei pilastri, si è deciso di studiare dei blocchi "d'angolo" o "di congiunzione" che circondassero la struttura portante rimanendo solidali alla struttura di tamponamento. Inizialmente, il concept iniziale prevedeva 5 tipi di blocchi angolari, il tipo B. Questi sono stati ridotti ad un unico blocco, il tipo C, a discapito dell'aggiunta di un blocco speciale fra quelli

utilizzati nell'apparecchiatura dei corsi. La serie A, derivata dal blocco standard, si differenzia ora in 5 tipologie:

- A1 = semplice senza forature;
- A2 = con 1 foro passante;
- A3 = con 2 fori passanti;
- A4 = con 1 foro passante e scanalature.
- A5 = con 2 fori passanti e ringrosso.
- 

Confrontandoli con la soluzione precedente, dove le tipologie di conci erano 9, si è operata una diminuzione del 33%.

Il numero dei conci e la standardizzazione di questi è importante dal momento in cui si considera il problema da un punto di vista più ampio: più il sistema è semplice e immediato, con meno variabili possibili, più si avranno benefici dal punto di vista dell'assemblaggio in cantiere, dei tempi e dei costi di realizzazione. L'obiettivo è quello di progettare edilizia “a basso costo”, quindi nella fase progettuale si è posta l'attenzione sulla quantità e sulle caratteristiche dei singoli elementi, che definiscono i processi costruttivi. La soluzione d'angolo ha subito quindi una forte semplificazione rispetto al progetto iniziale, con l'obiettivo di migliorare il sistema e facilitarne la comprensione. La chiarezza e la semplificazione complessive e la standardizzazione sono infatti ritenute come elemento fondamentale ai fini di una futura ipotetica commercializzazione del prodotto.

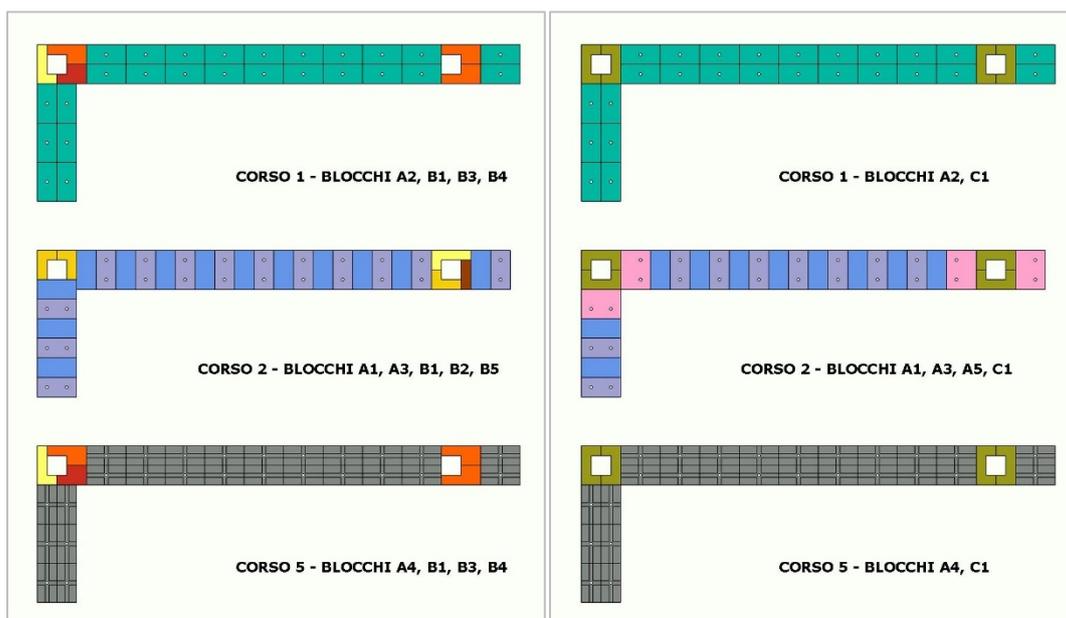


Figura 2-7 Corsi tipo nel concept iniziale (a sinistra) e nella prima fase evolutiva (a destra)

In questa fase di sviluppo del sistema si pensava di realizzare i blocchi con un materiale profondamente innovativo, chiamato solitamente “Geopolimero”, che avrebbe apportato significativi vantaggi dal punto di vista delle prestazioni, dei costi e della sostenibilità.

I materiali ad attivazione alcalina (AAM Alkali Activated Materials), meglio conosciuti col termine di “Geopolimeri”, costituiscono una nuova categoria di materiali definibili come una nuova classe di leganti idraulici inorganici ottenuti, a partire da precursori a base alluminosilicatica, attraverso una reazione di policondensazione. Il termine “Geopolimero”, coniato negli anni ‘70 dal ricercatore francese Joseph Davidovits, è esplicativo delle caratteristiche significative del materiale. Si riferisce alla similarità del processo di sintesi con le condizioni idrauliche e termiche di formazione dei materiali polimerici organici. Per questo motivo sono anche detti “Polimeri Inorganici Chimicamente Attivati”; inoltre il prefisso Geo- implica che essi mimino i materiali naturali, in quanto gli atomi di silicio e di alluminio reagiscono per formare molecole che sono chimicamente e strutturalmente confrontabili con quelle che legano e compongono le rocce naturali.<sup>1</sup>

I geopolimeri possono essere anche considerati come “ceramiche” consolidate per reazione alcalina (ABCs Alkali Bonded Ceramics), perché sono materiali assimilabili ai materiali ceramici, anche se non sono prodotti per sinterizzazione termica ma attraverso una reazione chimica. Tuttavia la definizione nonché la classificazione di questi materiali, che sono oggetto di studi già da alcune decine di anni, attualmente non sono ancora ben definite.

Ciò che ha mosso la ricerca e l’interesse verso il campo dei geopolimeri è stato in primo luogo il concetto di sostenibilità ambientale in architettura e nel campo delle applicazioni nel settore edilizio. I geopolimeri sono infatti sintetizzati a basse temperature e a partire da un’ampia varietà di materiali, i quali possono essere costituiti anche da elementi di scarto, sottoprodotti industriali o di riciclo quali ad esempio materiali provenienti dalla produzione della ghisa come scorie (loppa) d’altoforno, scarti dell’industria termoelettrica a carbone come ceneri volanti, scarti dell’industria ceramica, ma anche essi stessi riciclati, etc., riducendo così la richiesta energetica e l’impatto ambientale durante la loro produzione. Si stima che abbiano un costo inferiore al cemento Portland del 10-30% se si utilizzano prodotti di scarto.<sup>2</sup>

Per diverse ragioni che riguardano sia i costi economici sia quelli energetici, i geopolimeri possono essere considerati materiali a basso impatto ambientale o “environmentally friendly” e appartenenti alla cosiddetta “chimica verde”, indirizzata alla conversione di vecchie tecnologie in nuovi processi puliti e alla progettazione di nuovi prodotti con nuovi processi eco-compatibili.

Il geopolimero è un materiale altamente performante, in quanto possiede un gran numero di proprietà che sono desiderabili per un materiale edile:

- Elevata resistenza a compressione e rapidi tempi di formatura e presa;
- Durezza;
- Stabilità chimica: ottima resistenza chimica a numerosi agenti reattivi (reazioni alcali-silice, attacchi acidi, solfati);
- Durabilità;
- Resistenza ai cicli gelo-disgelo;
- Grande resistenza al calore (fino a 1000 °C) senza emissione di gas nocivi;
- Insolubilità: resistono a tutti i solventi organici;
- Porosità controllata;

La tecnologia dei geopolimeri permette la produzione di una vasta gamma di materiali versatili e di conseguenza esiste un'ampia varietà di applicazioni reali e potenziali del materiale che coprono diversi settori, quali: ingegneria civile, trattamento dei rifiuti industriali, industria dell'automobile ed aerospaziale, fonderie di metalli non ferrosi e metallurgia, industrie plastiche, restauro, arte e decorazione, biomateriali, etc.

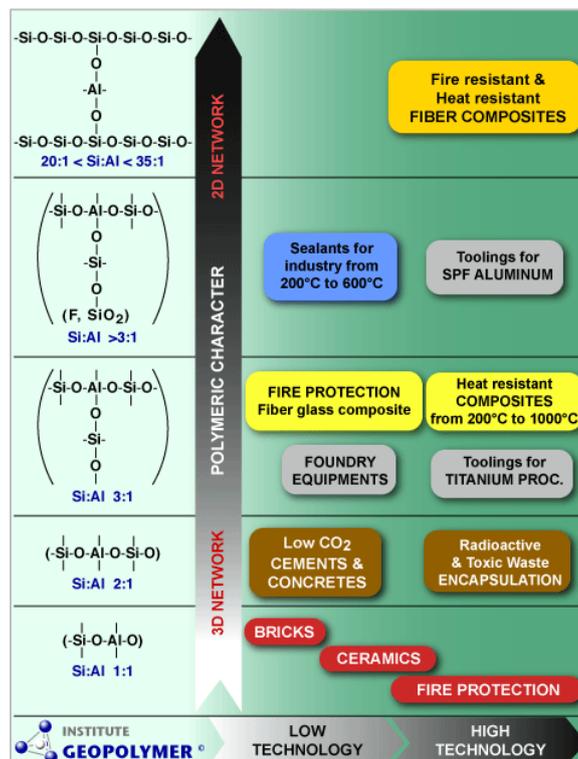


Figura 2-8 Struttura chimica e applicazioni. «Chemical Structure and Applications – Geopolymer Institute», consultato 11 agosto 2017, <https://www.geopolymer.org/science/chemical-structure-and-applications/>.

Nel campo dell'edilizia possono avere diverse applicazioni a seconda di come vengono trattati e con quale processo e precursori vengono prodotti (Figura 2-8). Ad esempio possono essere realizzati materiali compositi in fibre di varia natura (di carbonio o di vetro); oppure si possono realizzare elementi strutturali prefabbricati come ad esempio il GRANCRETE® che è un pannello sandwich costituito da due strati esterni di geopolimero spruzzato direttamente su polistirolo; o ancora si può operare l'aggiunta di additivi porizzanti durante la fase di consolidamento (quali acqua ossigenata, polveri metalliche come l'alluminio metallico o agenti areanti) per produrre geopolimeri altamente porosi e più leggeri che possono essere adatti ad essere utilizzati come isolante termico; si possono aggiungere anche additivi di altra natura del tipo leganti, fluidificanti o per rendere idrofobiche le superfici etc.

In generale i geopolimeri rappresentano una nuova classe di materiali con un potenziale altissimo di applicazione. Tuttavia si riscontra che la loro commercializzazione trova, soprattutto nel contesto italiano, ancora poca fiducia da parte dell'industria e praticamente non vi è ancora una diffusa applicazione nel settore delle costruzioni.

Affinché un materiale possa essere impiegato con successo in una determinata applicazione, deve avere sia le caratteristiche fisiche e chimiche appropriate, sia quelle tecnologiche che consentano la realizzazione di un manufatto. In generale i geopolimeri hanno potenzialmente molti vantaggi rispetto ad altri materiali impiegati nel settore edilizio l'effettivo vantaggio si concretizzerà solo una volta ottimizzate le formulazioni in base al campo di applicazione.

Date le caratteristiche costruttive del sistema-parete che ne determinano le proprietà dimensionali, si può individuare nel singolo blocco il più piccolo elemento in cui il sistema è divisibile, ovvero il modulo elementare inteso come l'unità di misura complessa del processo compositivo e costruttivo. In questa fase evolutiva del sistema si riteneva possibile, in base alle risultanze di alcune ricerche parallele condotte all'interno del dipartimento<sup>3</sup>, confezionare i blocchi necessari alla realizzazione della muratura armata con materiali AAM.

Osservando il metodo di assemblaggio della parete in pianta si deduce che la dimensione più piccola dei blocchi, la quale è assunta a 20 cm, comune a tutti i blocchi, è la dimensione fondamentale da cui dipende tutto il resto. Infatti da questa misura dipendono conseguentemente la dimensione longitudinale dei blocchi, lo spessore murario, la lunghezza della parete nonché il numero complessivo di barre. Questa misura base, che definisce il modulo guida alla definizione di tutte le altre misure di fabbricazione, è stata definita tenendo conto di differenti aspetti che riguardano la praticità e diversi fattori costruttivi.

Di seguito si riporta una breve analisi dimensionale che mostra come variano le caratteristiche del sistema-parete al variare del modulo dimensionale base individuato (Tabella 2-1). Da tale analisi

si vede chiaramente come nella progettazione modulare, le caratteristiche del sistema complessivo dipendano fortemente dall'elemento modulare scelto.

a (cm)	b (cm)	h (cm)	VB (cm <sup>3</sup> )	PB (Kg)	ASR 1 (cm <sup>2</sup> )	ASR 2 (cm <sup>2</sup> )	nBpM	S (cm)	Spp (cm)
	2*a	a	a*b*h	stimato <sup>4</sup>	a*h-1,5*h	b*h-3*h	100/b*2	2*a	a-10
5	10	5	250	0,12	17,5	35	20,00	10	-5
10	20	10	2000	0,96	85,0	170	10,00	20	0
15	30	15	6750	3,24	202,5	405	6,67	30	5
20	40	20	16000	7,68	370,0	740	5,00	40	10
25	50	25	31250	15,00	587,5	1175	4,00	50	15
30	60	30	54000	25,92	855,0	1710	3,33	60	20

Tabella 2-1 Modularità in relazione al singolo blocco e alla parete

In tabella compaiono i seguenti parametri:

- (a) = è la dimensione fondamentale, la più piccola, da cui dipendono tutti gli altri valori. Si sono considerati i valori compresi da 5cm a 30cm, con intervalli di 5cm tra una prova e un'altra.
- (b) = è la dimensione maggiore del blocco. Per la particolare conformazione della parete in cui si alternano dei corsi con blocchi diatonici e dei corsi con blocchi disposti longitudinalmente, si vede che i blocchi diatonici avranno una lunghezza che corrisponde all'ingombro di due blocchi affiancati disposti longitudinalmente. Quindi (b) sarà uguale al doppio di (a).
- (h) = si è assegnata l'altezza del blocco pari alla dimensione minima di questo. Da questa dipende l'area della sezione resistente del mattone.
- (VB) = volume del blocco calcolato in base alle dimensioni
- (PB)\* = è il peso in kg del singolo blocco ottenuto moltiplicando il VB per il peso specifico di riferimento. Non si hanno quindi valori definiti, ma in questa sede si può ipotizzare di assimilare il geopolimero ad altri materiali che sono invece diffusi sul mercato e da cui possiamo trarre specifiche caratteristiche tecniche. Ad esempio si possono considerare valori di peso specifico del calcestruzzo cellulare e in particolare del prodotto GASBETON® EVOLUTION 500<sup>5</sup>, il quale ha una massa volumica a secco pari a 480 kg/mc. Esistono diversi tipi di cemento cellulare: per effettuare quest'analisi teorica si è scelto uno dei tipi fra i più pesanti, in modo da ricadere "nel caso peggiore". I valori in tabella relativi al peso del blocco sono quindi assegnati a partire da questo presupposto.

- (ASR 1) = corrisponde all'area della sezione piena per blocchi con un foro.
- (ASR 2) = corrisponde all'area della sezione piena per blocchi con due fori.
- (nBpM) = indica il numero di barre, le quali sono sempre in coppia, che compaiono in un metro lineare di muratura. Si evidenzia il fatto che all'aumentare del numero di barre corrisponde un significativo aumento dei costi di realizzazione.
- (S) = è lo spessore della parete. Si possono accettare valori minori o maggiori a seconda della tipologia e collocazione di parete all'interno del progetto.
- (Spp) = è lo spessore di muratura in corrispondenza del pilastro. Questo dipenderà dai valori di inerzia termica del materiale geopolimero.

Analizzando i dati dei blocchi si nota che per dimensioni di (a) tra 5 e 10 non si ha una possibile protezione massiva in corrispondenza del pilastro e sono quindi da non considerarsi soluzioni accettabili. Per dimensioni di (a) tra 25 e 30 si ottengono spessori murari eccessivi compresi tra i 50 e i 60 cm e pesi elevati dai 15 kg in su. Se si considera che il peso dei blocchi da costruzione ordinari oscilla (solitamente) fino ad un massimo indicativo di 15kg, tali valori sono anch'essi da considerarsi inaccettabili. Inoltre pesi elevati potrebbero creare problemi dal punto di vista costruttivo, legati alle caratteristiche di assemblaggio della parete stessa: poiché i conci vanno infilati nelle barre dywydag, la leggerezza di questi risulta importante per un più agevole assemblaggio.

Da questa semplice analisi geometrica il valore stimato in fase progettuale di 20 cm per la dimensione dei blocchi risulta pienamente compatibile con tutti gli altri moduli dimensionali coinvolti nella realizzazione della parete.

Definite le caratteristiche dei diversi elementi che lo compongono si è passati alla elaborazione passo per passo dell'iter di assemblaggio del sistema-parete avvalendosi di una semplice modellazione virtuale.

In primo luogo si colloca la struttura portante in acciaio. La prima operazione consiste nel collocare i pilastri laterali. Questi sono di tipo tubolare in acciaio di dimensioni 200x200mm e di altezza 340cm e vengono resi solidali alla trave inferiore mediante saldatura. La trave ha una sezione speciale costituita da una doppia anima, con uno spessore complessivo di 40cm. Sulle due ali superiori della trave sono presenti i fori di alloggiamento delle barre per l'armatura verticale del tamponamento.

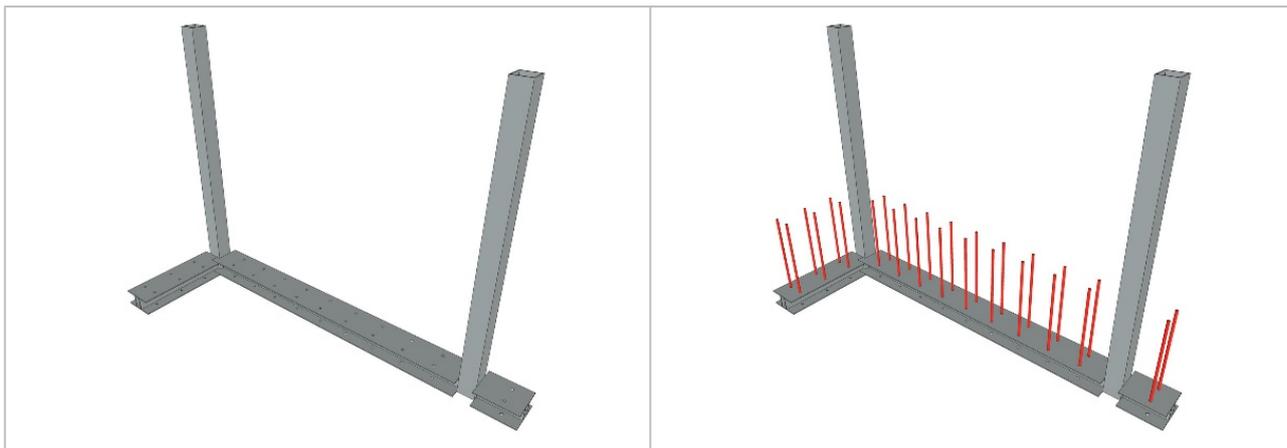


Figura 2-9 Installazione pilastri e infilaggio barre dywydag

Si infila dunque il primo gruppo di barre dywydag all'interno dei fori della trave. Queste sono 9 coppie di barre filettate, di 1,4cm di diametro, fissate mediante piastra e dado per il serraggio; hanno una lunghezza pari a circa  $1/3$  dell'altezza della muratura per permettere un'infilatura progressiva dei blocchi.

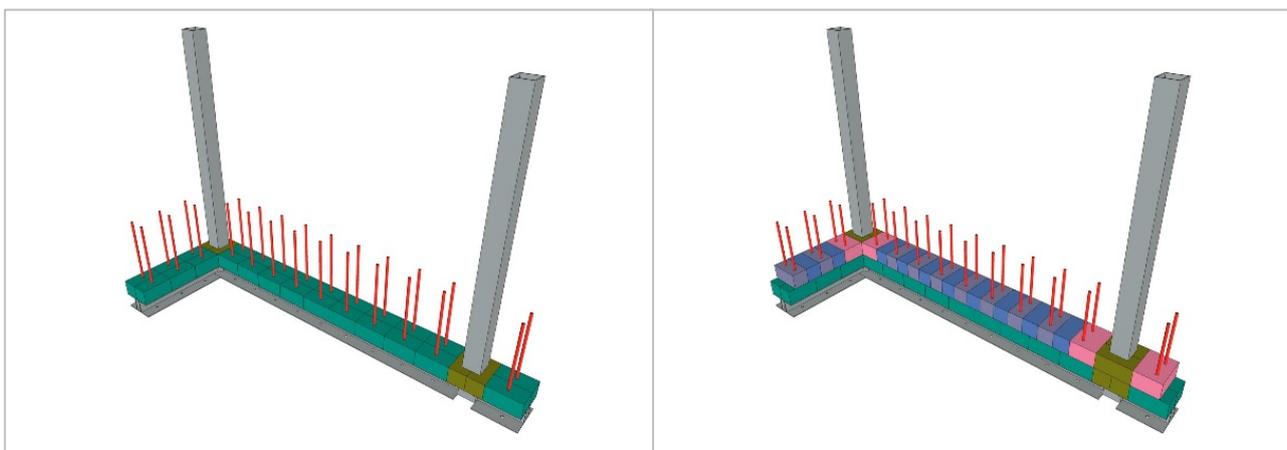


Figura 2-10 Posa del primo e secondo corso di blocchi

Si comincia a comporre la muratura infilando il primo corso con i blocchi tipo (A2) e in corrispondenza dei pilastri i quattro blocchi angolari (C1). Successivamente si compone il secondo corso, di blocchi diatoni di tipo (A1), (A3), (A5) e (C1) e si continua dal basso verso l'alto alternando i tipi di corsi fino al raggiungimento del limite superiore delle barre. L'ultimo corso è costituito da blocchi di tipo (A4) e (C1) sagomati in modo da accogliere le staffe orizzontali.

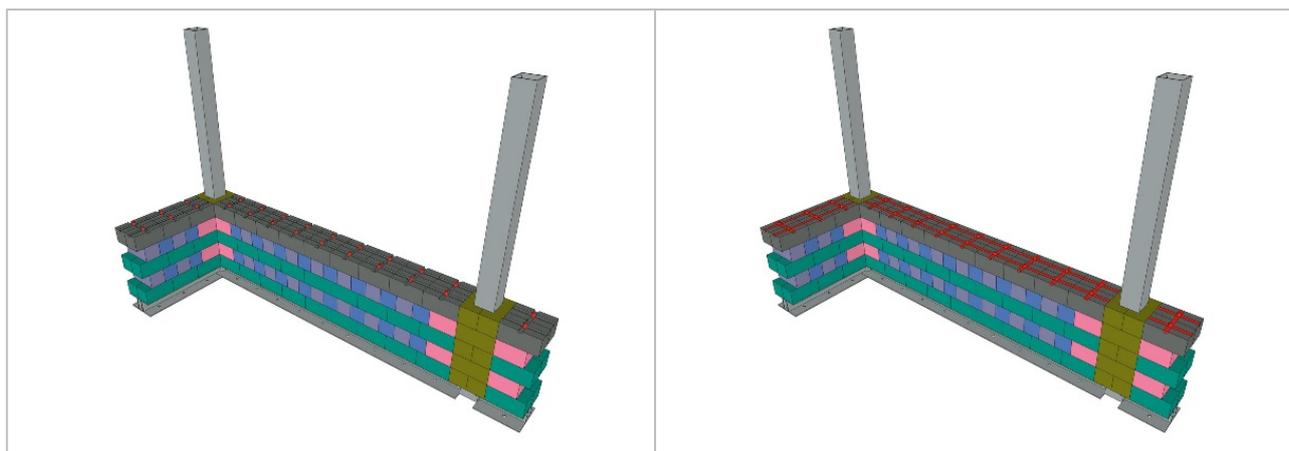


Figura 2-11 Completamento prima sezione e montaggio piastre di ripartizione

Si posizionano quindi le staffe in acciaio e si fissano attraverso piastrina e dado avvitati sulle barre filettate. Completato il primo step, si colloca il secondo gruppo di barre dywydag: queste sono connesse a quelle inferiori mediante un manicotto posizionato in corrispondenza della giunzione. Si procede dunque come sopra infilando i blocchi e fissando in sommità le staffe orizzontali.

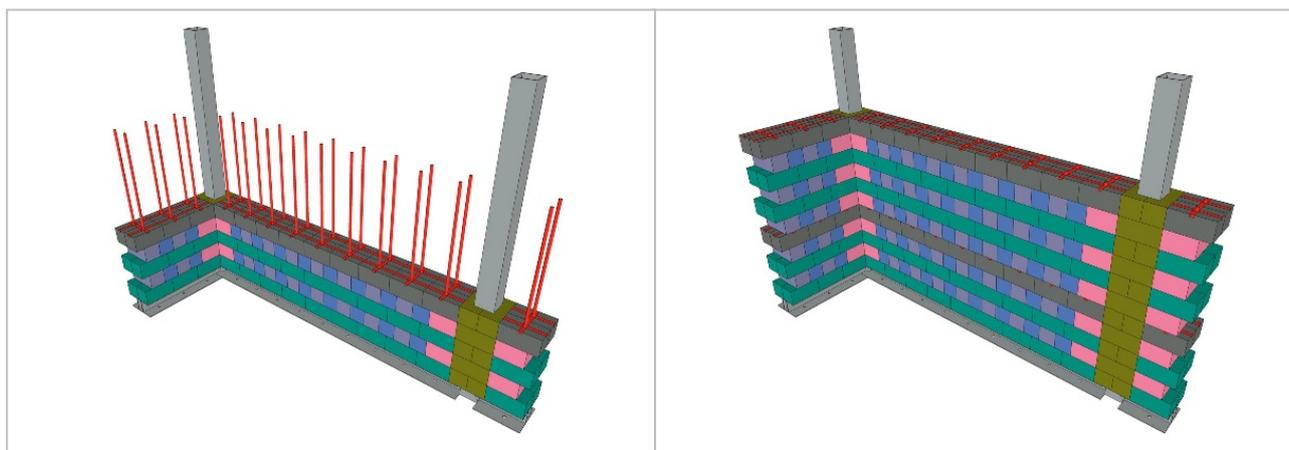


Figura 2-12 Innesto barre seconda sezione e completamento

A questo punto si sono completati 2/3 della muratura. Si colloca il terzo gruppo di barre, le quali raggiungeranno il limite superiore del tamponamento. e si infilano i conci sempre allo stesso modo.

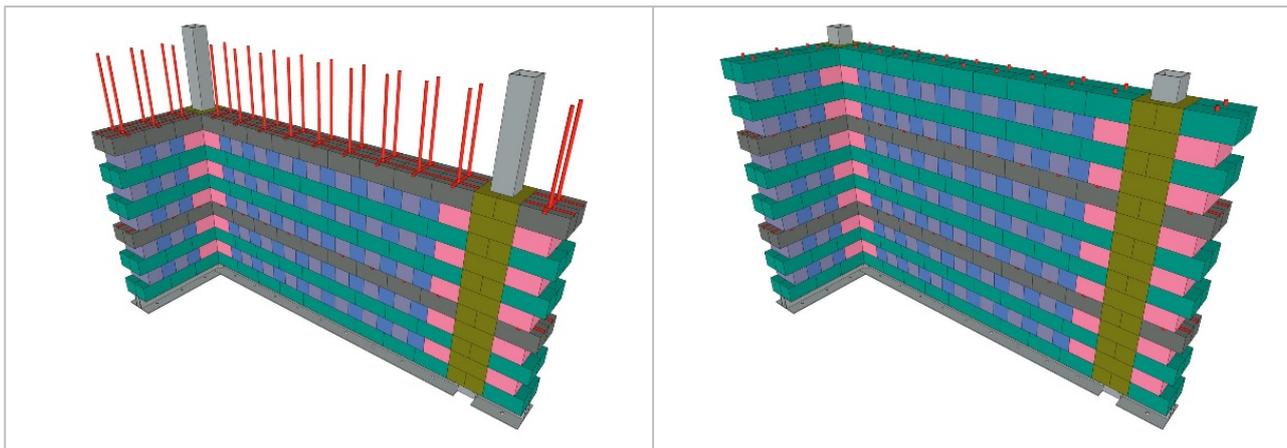


Figura 2-13 Innesto barre terza sezione e completamento

Infine si posiziona la trave superiore (la quale ha le medesime caratteristiche di quella inferiore) facendo attenzione ad infilare le estremità superiori delle barre dywydag all'interno dei fori presenti sull'ala inferiore della trave. Mediante piastra e dado per il serraggio si vincolano le barre e si mette in compressione l'intera muratura sottostante. La muratura, in questo modo è completata e non necessita di altre lavorazioni.

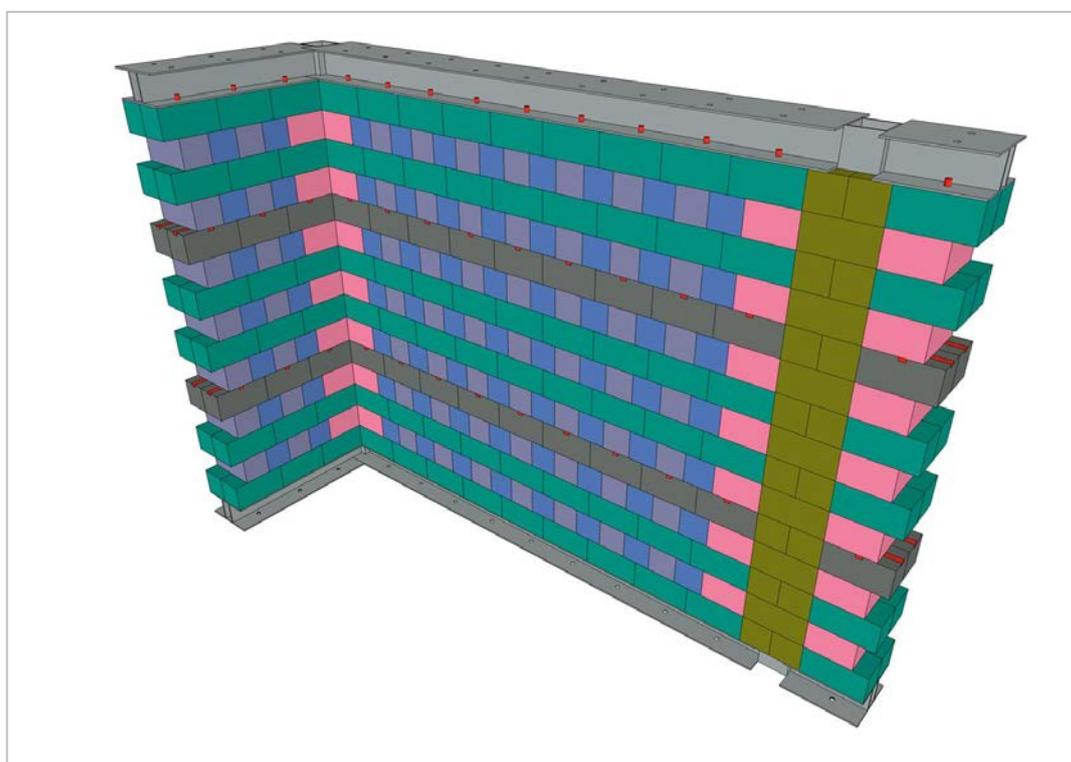


Figura 2-14 Completamento con trave superiore e serraggio del sistema

---

## 2.3 SECONDA EVOLUZIONE

---

Una volta definito il sistema nella sua prima evoluzione descritta nel capitolo precedente, ci si è interrogati sulla sua coerenza con i principi teorici che si vogliono soddisfare. Si è quindi passati a individuare gli elementi da poter modificare al fine di ottenere una struttura che rispondesse in maniera più precisa questi requisiti.

Uno dei primi dubbi è emerso in merito alla eterogeneità dei materiali e soprattutto sulla reale necessità di utilizzare l'acciaio. La difficoltà di approvvigionamento del materiale e la scarsa sostenibilità dello stesso, uniti a costi elevati, hanno portato a prevederne la sostituzione con il legno. Oltre che da un punto di vista dell'eco-sostenibilità del materiale, il cambiamento è giustificato anche dal fatto che, dovendo coprire luci non elevate si può impiegare un materiale con caratteristiche di resistenza inferiori per gli elementi portanti. Ultimo, ma non meno importante, si va ancora maggiormente nella direzione del recupero e aggiornamento della tecnica costruttiva "baraccata".

Pur mantenendo un modulo base di 4 per 4 metri, si è deciso di aumentare il numero di pilastri presenti, ovvero da 4 a 8. I pilastri sono stati aggiunti nella mezzeria dei lati esterni del modulo. Questa modifica, apparentemente maggiormente vincolante, permette una notevole flessibilità in più rispetto alla soluzione precedente, consentendo una disposizione delle aperture più efficiente. Infatti con il sistema precedente, nelle parti ove si desideravano finestre o passaggi, l'unica soluzione era quella di lasciare l'intera parete vuota, a discapito della funzione controventante esercitata dai tamponamenti che veniva completamente a mancare.

Un'altra modifica è stata apportata al sistema di armatura interna. Infatti l'installazione di quest'ultima risultava essere abbastanza macchinosa, pertanto si è pensato di portare le barre al di fuori del tamponamento. Questo ha permesso di eliminare le forature dei blocchi e rendere più veloce l'assemblaggio. Così facendo le barre vengono post tese a parete ultimata, per fornire la giusta compressione in grado di sopperire alla mancanza di malta tra i collegamenti, aumentando l'attrito tra le facce a contatto dei blocchi. L'installazione delle barre avviene mediante delle apposite scarpe metalliche che fasciano le travi di bordo. Queste hanno anche la funzione di ripartire la compressione in maniera uniforme per tutto lo spessore del tamponamento. Le barre restano così a vista, consentendo una migliore manutenzione, e vengono coperte da un profilo di tipo omega che ha la duplice funzione di protezione e di costituire una sottostruttura per il montaggio delle finiture per le pareti lato interno ed esterno.

Per quanto riguarda l'armatura longitudinale si è pensato di sostituirla con un elemento reticolare in legno, formato da due travetti longitudinali collegati mediante diatoni. Questo elemento

sostituisce ed integra la funzione delle piattine metalliche alloggiare nelle scanalature dei conci che fungevano da ripartizione. Utilizzando questo nuovo sistema viene meno la necessità di utilizzare blocchi scanalati rendendo ancora più semplice la realizzazione dei blocchi che, ancora in questa fase, si riteneva di poter realizzare in materiali derivati da scarti di laterizio (AAM).

	INTEGRO BS 400	INTEGRO BS 400 EVO
STRUTTURA PORTANTE		
MAGLIA MODULO BASE		
SISTEMA DI ARMATURA		

Figura 2-15 Schema delle differenze tra sistema vecchio e il sistema 2.0

Si entrerà ora più nel dettaglio dei singoli elementi che costituiscono il modulo base. Particolare attenzione sarà dedicata alla descrizione delle modalità di assemblaggio e delle varie finiture esterne ed interne che completano l'intero organismo.

La struttura portante è costituita da una ossatura formata da travi e pilastri in legno lamellare. La scelta del legno lamellare è principalmente motivata dal fatto che la realizzazione di elementi fortemente standardizzati necessita di tolleranze elevate, non conseguibili con il legno massello. Il sistema di travi e pilastri viene concepito sulla base di un modulo quadrato di lato 400x400 cm, che costituisce la base degli schemi compositivi che verranno adottati per la realizzazione degli edifici. Gli otto pilastri, disposti agli angoli e in mezzeria dei lati, hanno sezioni quadrate di 20x20 cm. Le travi di bordo sono di sezione rettangolare di dimensioni 20x30 cm. Mentre per la trave centrale, coprendo una luce maggiore e non avendo appoggio intermedio, si adotta una sezione di 20x40 centimetri. L'orditura secondaria è costituita da travetti 12x16 centimetri che sorreggono gli orizzontamenti (Figura 2-16).

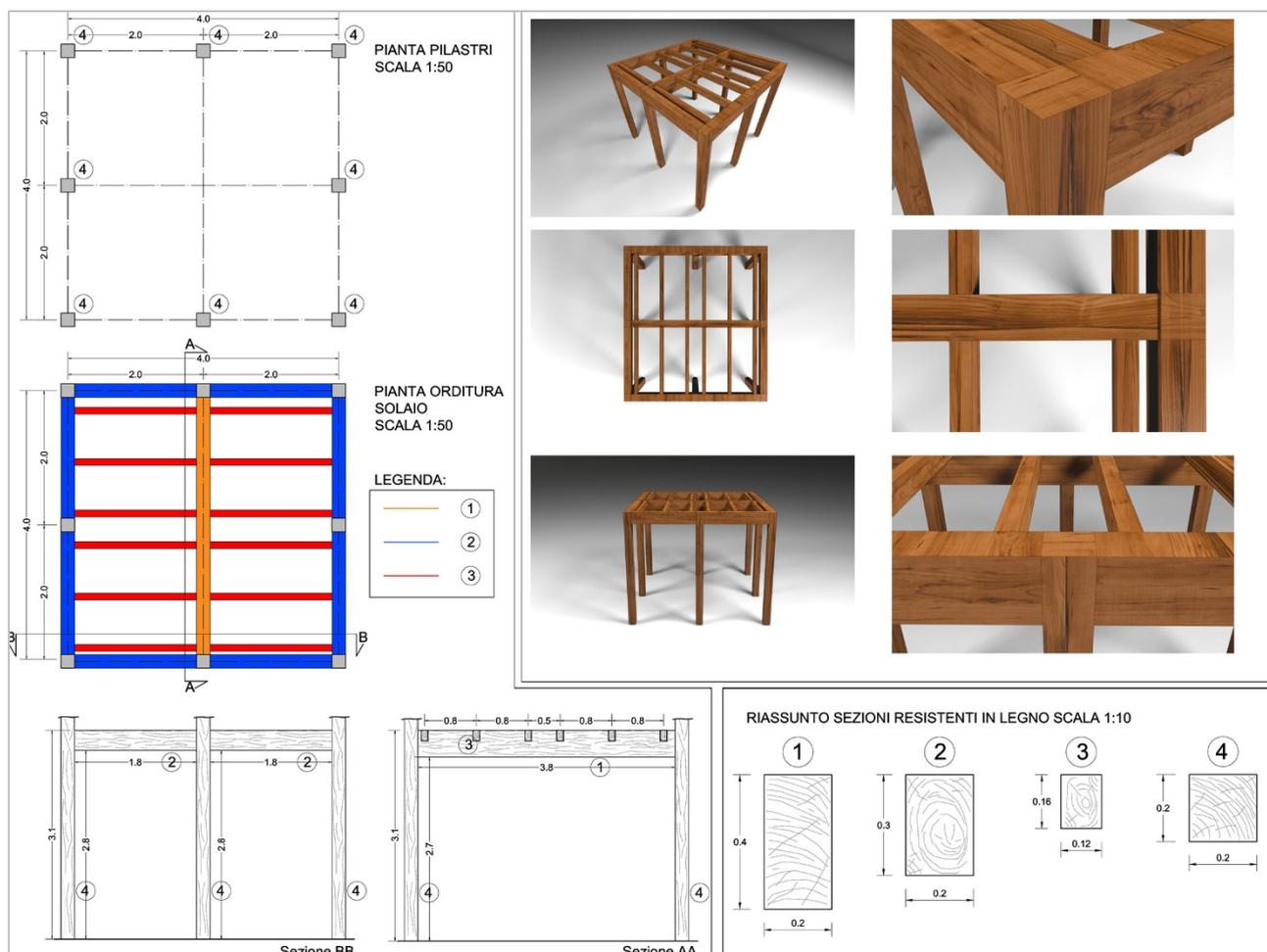


Figura 2-16 Ossatura lignea del modulo base

Per i collegamenti tra i vari elementi ci si rivolge ad un prodotto commerciale. La ditta produttrice che abbiamo usato come riferimento è la ROTHO BLAAS<sup>6</sup>, multinazionale italiana che lavora in collaborazione con l’università di Trento. Le staffe a completa scomparsa in lega di alluminio AluMIDI e AluMAXI si adattano perfettamente alle varie situazioni di dettaglio. Le soluzioni proposte da catalogo sono già dimensionate, quindi in base alle tipologie di sezione delle membrature e alla tipologia di carico si possono impiegare modelli predefiniti (Figura 2-17).

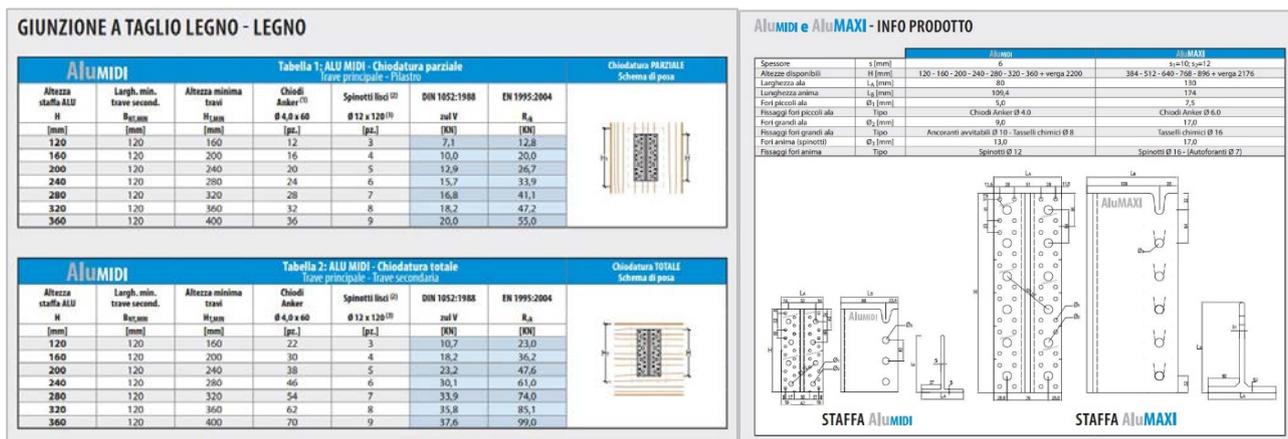


Figura 2-17 Schede prodotto AluMIDI e AluMAXI

Gli orizzontamenti sono sempre costituiti da solai in struttura lignea con impalcato collaborante costituito da pannelli sandwich composti di doppio tavolato con anima in grigliati stampati in materiale plastico rinforzato con fibre di vetro. Parallelamente allo sviluppo del sistema parete stava infatti procedendo lo sviluppo del sistema INTEGRO FS PRFV (il cui dettaglio verrà presentato nella PARTE II di questa tesi) con la realizzazione di diverse prove di laboratorio per indagarne le caratteristiche e perfezionarne la configurazione. Questo elemento costruttivo ben si adatta al modulo costruttivo, sia in termini geometrici sia in termini di elevati standard prestazionali. Dotato di elevata rigidità, leggerezza in uno spessore ridotto dal punto di vista funzionale, presenta buoni standard termici e acustici uniti alla rapidità di montaggio (Figura 2-18).

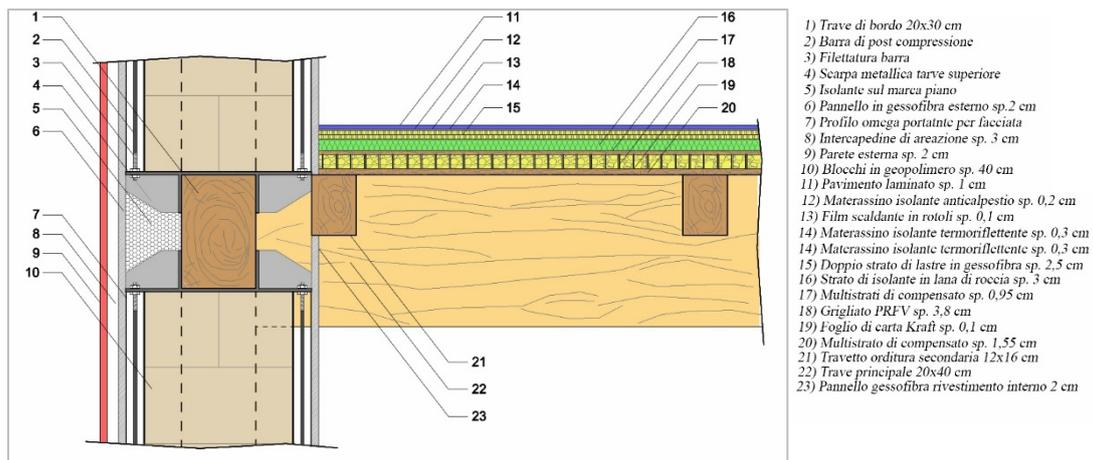


Figura 2-18 Dettaglio trave di bordo e stratigrafia solaio

Il passaggio da acciaio a legno impone anche una modificazione della copertura. Se nella soluzione precedente si era pensato ad una reticolare tubolare il acciaio, in questa versione del modulo si è pensato di utilizzare delle capriate lignee. Ai due puntoni viene collegato un tirante in acciaio avente funzione di catena. La capriata permette di realizzare una copertura non spingente, e quindi non crea ulteriori stati di sollecitazione ai pilastri, se non la componente verticale del peso proprio, e può ben adattarsi alla natura aggregativa e modulare del sistema costruttivo. Un'orditura secondaria di travetti sorregge la finitura esterna del tetto che è composta in sequenza da: tavolato, barriera al vapore, isolante, guaina impermeabilizzante, sottostruttura per ventilazione e supporto per i coppi (Figura 2-19).

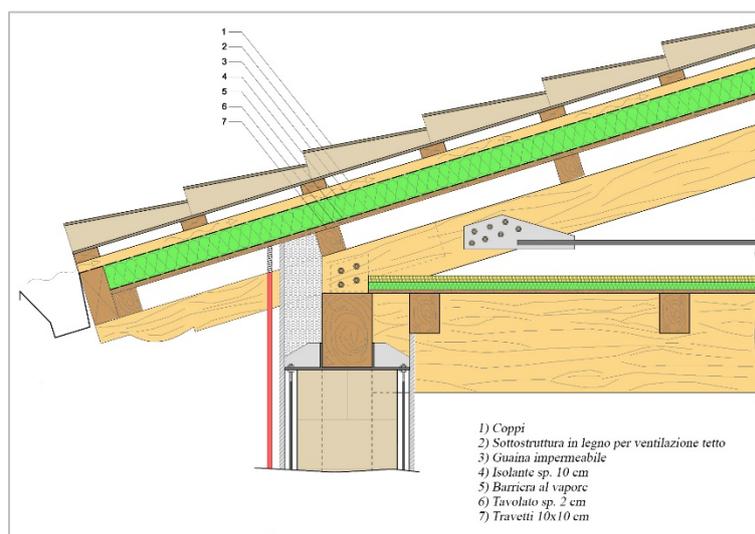


Figura 2-19 Dettaglio copertura

Fino a questo stadio progettuale non si era prestata particolare attenzione a come realizzare le fondazioni. Esulando in parte dalla integrazione nel sistema costruttivo in quanto dipendenti dal sito

e dalle caratteristiche del terreno, devono però consentire il corretto attacco del sistema-parete per garantire un’efficace ancoraggio dei vari elementi che lo compongono. In questa fase progettuale si prevedono fondazioni formate da travi a T rovesce in CCA (Figura 2-20).

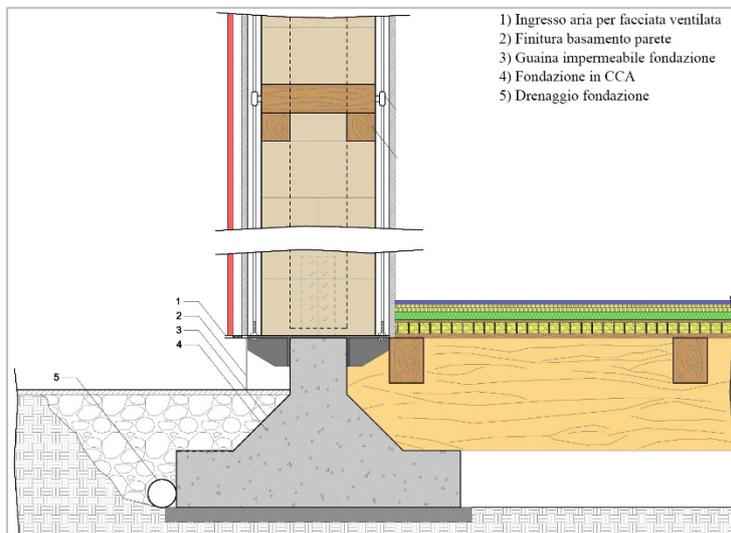


Figura 2-20 Dettaglio fondazione

Il tamponamento è realizzato con blocchi in “geopolimero” le cui caratteristiche di base sono già state evidenziate. Al fine di ottimizzare ulteriormente la produzione e semplificare l’assemblaggio della parete si è cercato di razionalizzarne forma e dimensioni. Come detto, la sostituzione delle piastre metalliche di ripartizione con la reticolare lignea non richiede l’utilizzo di blocchi speciali scanalati (A4) mentre lo spostamento delle barre di post-tensionamento all’esterno della struttura muraria rendono superflua la realizzazione dei blocchi forati (A2 e A3).

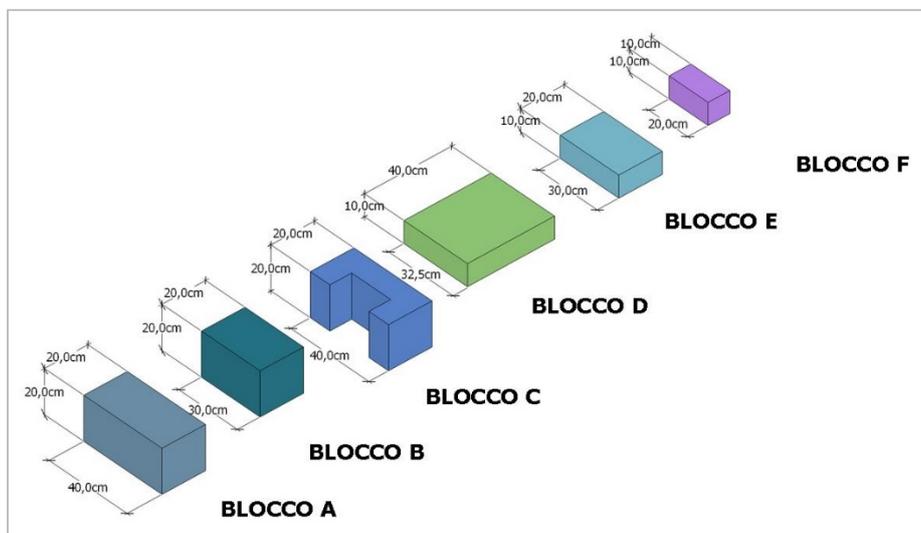


Figura 2-21 Abaco delle tipologie di blocchi.

Di conseguenza si sono individuate sei nuove tipologie di blocchi (Figura 2-21):

- tipologia A blocco standard di dimensioni 20x20x40 cm
- tipologia B necessario per ottenere lo sfalsamento dei giunti nei corsi con blocchi disposti come diatoni di dimensioni 20x20x30 cm
- tipologia C invariato rispetto alla soluzione precedente e necessario per la soluzione d'angolo di dimensioni 20x20x40 cm, con risega
- tipologia D blocco di riempimento i diatoni delle reticolari linee di dimensioni 10x32,5x40 cm
- tipologia E blocco di riempimento per i correnti delle reticolari linee di dimensioni 10x30x20 cm
- tipologia F blocco di riempimento per i pilastri in corrispondenza delle reticolari linee di dimensioni 10x20x10 cm

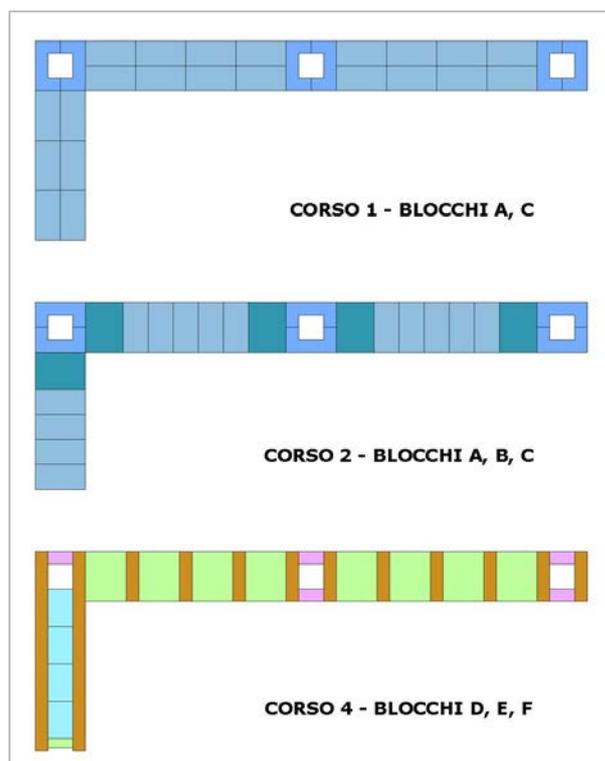


Figura 2-22 Le due tipologie di corsi standard e la soluzione in corrispondenza della reticolare lignea

Le reticolari in legno di ripartizione sono formate da due travetti longitudinali di 10x10 cm uniti da diatoni orizzontali anch'essi di 10x10 cm. Questi elementi sono pensati all'interno del sistema con diverse funzioni. Favoriscono l'ammorsamento tra pareti perpendicolari; i diatoni di una parete diventano i travetti della perpendicolare e viceversa. Limitano il numero di corsi di blocchi "liberi"

contribuendo a ripartire la sollecitazione di post-compressione ed infine costituiscono un ulteriore irrigidimento per la struttura in caso di sollecitazioni orizzontali.



Figura 2-23 Schema sul funzionamento della reticolare lignea.

Il sistema di post compressione è necessario al fine di rendere più stabile l'ingranamento dei blocchi. L'intento è quello di conferire all'attrito tra i blocchi, posati a secco, la stessa funzione che avrebbe la malta in una normale muratura. Infatti, comprimendo la muratura, si andrà ad aumentare la forza necessaria da applicare per permettere uno scorrimento reciproco tra le superfici di contatto dei blocchi. Non potendo più sfruttare le ali delle travi in acciaio, si è dovuti ricorrere ad una soluzione realizzata mediante due scarpe metalliche, ancorate alle travi superiore ed inferiore. La particolare conformazione di questo elemento, progettato ad hoc, consente il fissaggio delle barre filettate. Una volta installate le barre possono essere tensionate fino ad un valore di serraggio calibrato per conferire in maniera uniforme la compressione per tutto lo spessore della muratura (Figura 2-24).

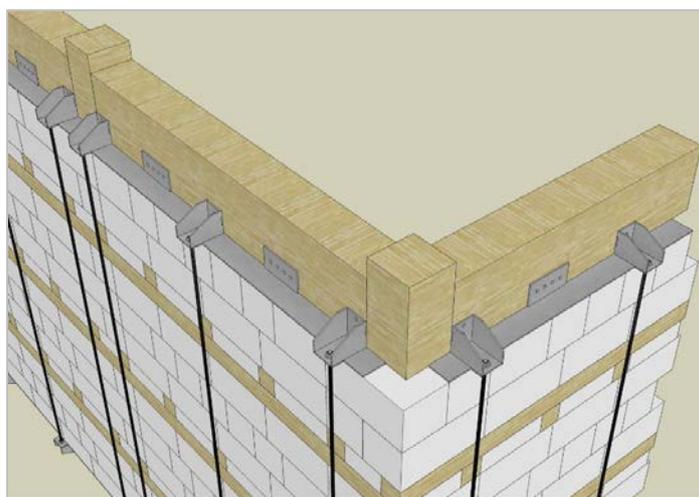


Figura 2-24 Focus sul sistema di post compressione. Vista della scarpa metallica alla trave superiore e barre di post compressione.

Uno degli obiettivi perseguiti nello sviluppo del sistema costruttivo è quello di essere facilmente "montabile" mediante l'impiego di componenti preassemblati in officina ed il più possibile standardizzati. Questo permetterà al cantiere di essere più veloce ed efficace, diminuendo i tempi di costruzione e quindi i costi generali, aumentando al contempo anche la sicurezza. Di seguito vengono schematizzati tutti i passaggi utili alla costruzione della parte portante lignea e quella di tamponamento, che rappresentano la base per dar forma all'edificio.

Il primo passaggio è l'allestimento di un dormiente ligneo al di sopra della fondazione che, anche in questo caso, andrà definita e dimensionata caso per caso. L'inserimento dei pilastri, di sezione quadrata 20x20 cm, avviene mediante il fissaggio sul dormiente avviene mediante delle staffe a croce a scomparsa che vengono inserite alla base dei pilastri, opportunamente sagomati, e fissate, mediante ancorante meccanico e/o chimico in testata.

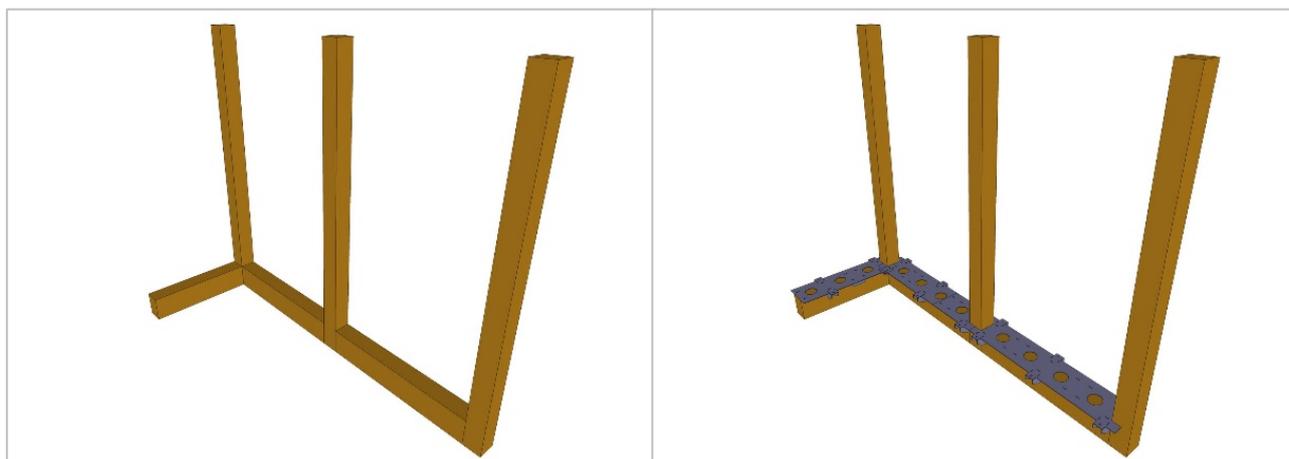
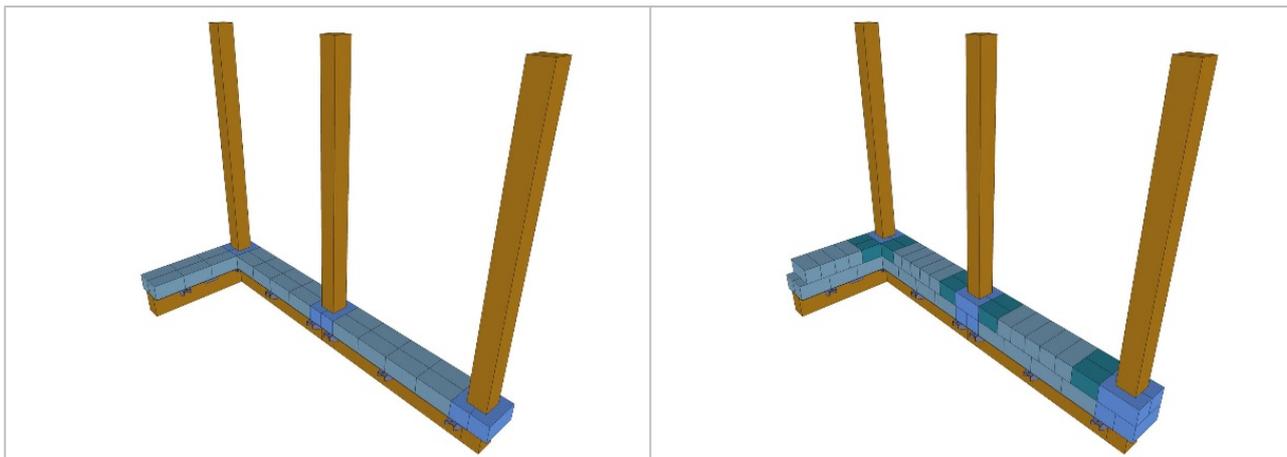


Figura 2-25 Installazione pilastri e posa scarpa metallica di base

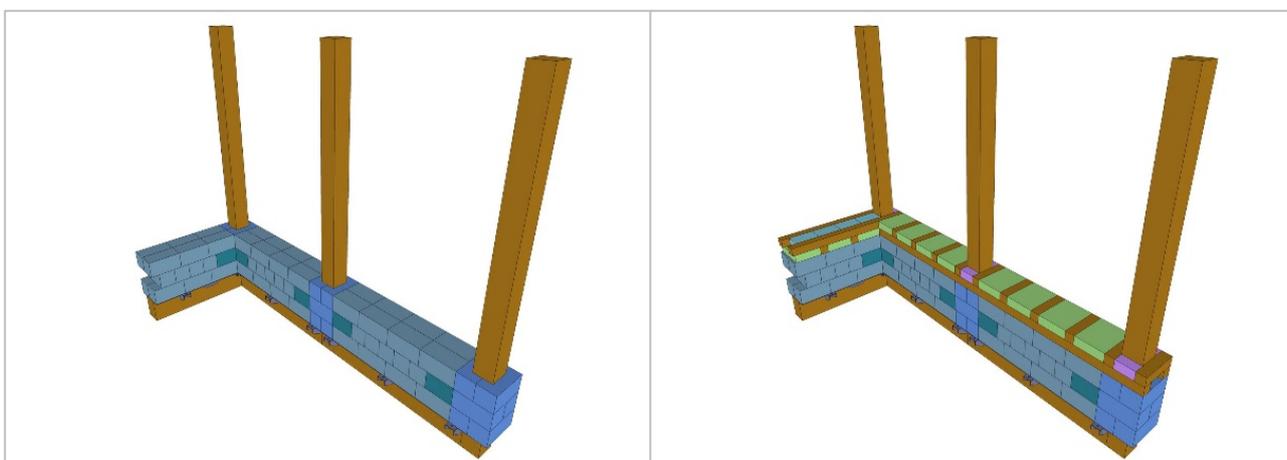
Il secondo passaggio inizia posando la scarpa metallica di base, che avrà la funzione di ancoraggio delle barre che andranno a post comprimere tutto il tamponamento. Quest'ultima arriverà in cantiere già assemblata e pronta per essere posata fissata senza ulteriori lavorazioni. Una volta installata si passa alla posa dei primi filari di conci. Si incomincia sempre dalla posa dei blocchi a C che stanno attorno al pilastro, andando avanti sistemando poi gli altri in successione.



*Figura 2-26 Posa del primo e del secondo corso di blocchi*

Ci sono due tipologie di filari che si alternano, corso 1 e corso 2. Prima dell'inserimento della reticolare in legno vengono posati 3 file di conci: corso 1, corso 2 e di nuovo corso 1.

La reticolare perviene in cantiere già montata e pronta per essere inserita tra i pilasti. È composta da due travetti di sezione 10x10 uniti tra loro mediante diatoni. Gli spazi tra i diatoni vengono colmati dalle tipologie di blocco D, E ed F.



*Figura 2-27 Completamento della prima sezione e posa della reticolare lignea*

Arrivati a questo punto si ripete la posa dei primi tre filari di blocchi e si dispone la seconda reticolare in legno.

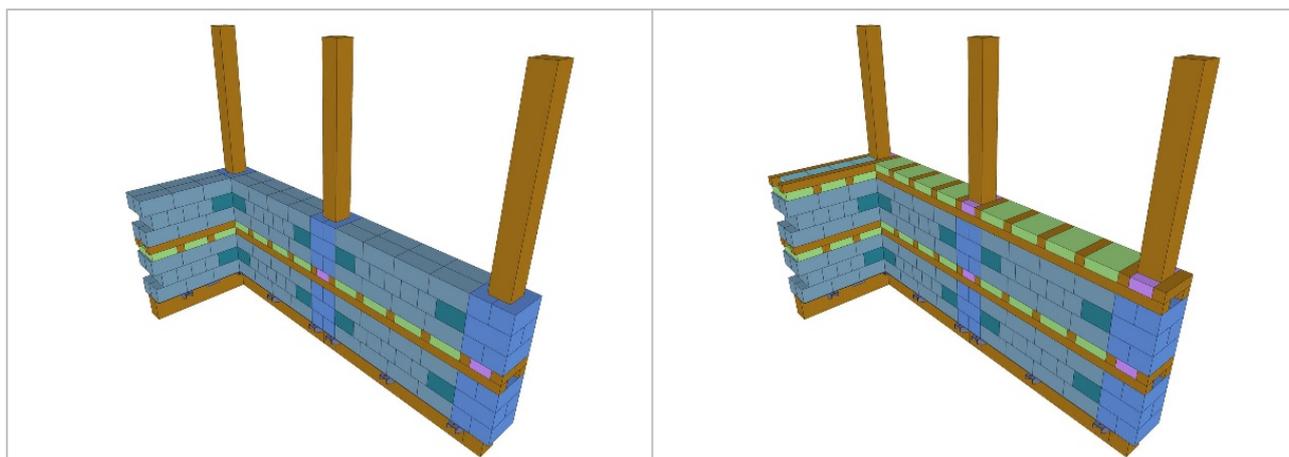


Figura 2-28 Completamento seconda sezione

Si ripete nuovamente la disposizione dei corsi per disporre infine la terza reticolare. L'apparecchiatura della muratura termina con l'inserimento degli ultimi due filari di blocchi, anch'essi alternati.

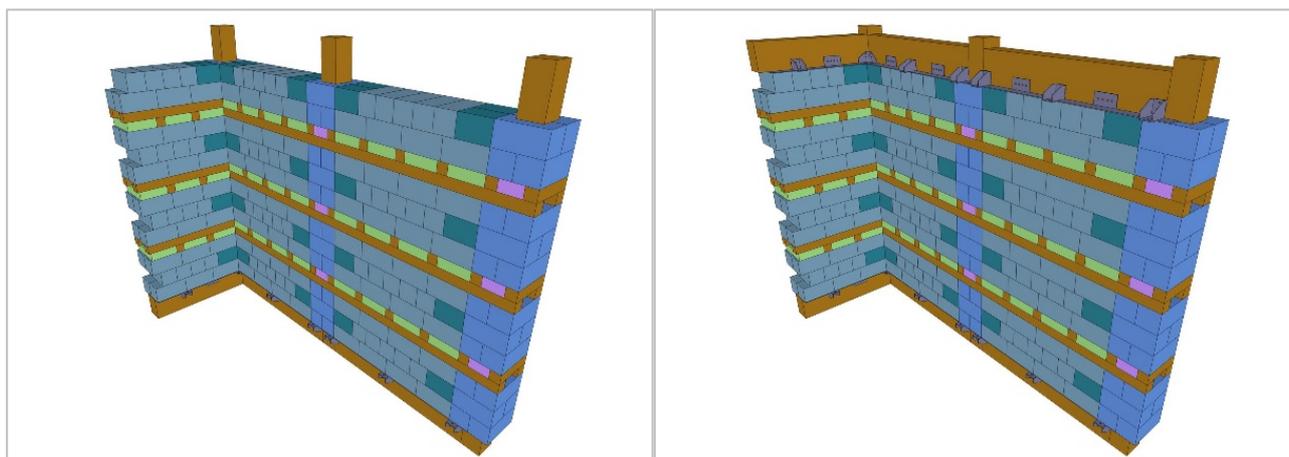


Figura 2-29 Completamento parete e posa della trave superiore

Terminato l'assemblaggio dei conci si predispongono sui pilastri le staffe a scomparsa per l'alloggiamento della trave di completamento. Alla trave sarà già collegata una ulteriore scarpa metallica che, assieme a quella alla base, andrà a costituire l'ancoraggio per le barre.

A questo punto la parete, costituita dalla parte strutturale in legno e tamponatura in geopolimero, è completata. Come ultimo step si provvede all'inserimento delle barre attraverso gli appositi sostegni previsti nelle scarpe metalliche posizionate agli estremi della parete. Ciascuna barra è composta da due pezzi con le estremità filettate, quelle più esterne sono fissate alle scarpe mediante dadi, mentre le due centrali vengono inserite in un tenditore in modo tale da mettere in tensione le

due parti. Il controllo della tensione può essere ottenuto mediante la frequenza di vibrazione della barra o con apposite chiavi dinamometriche.

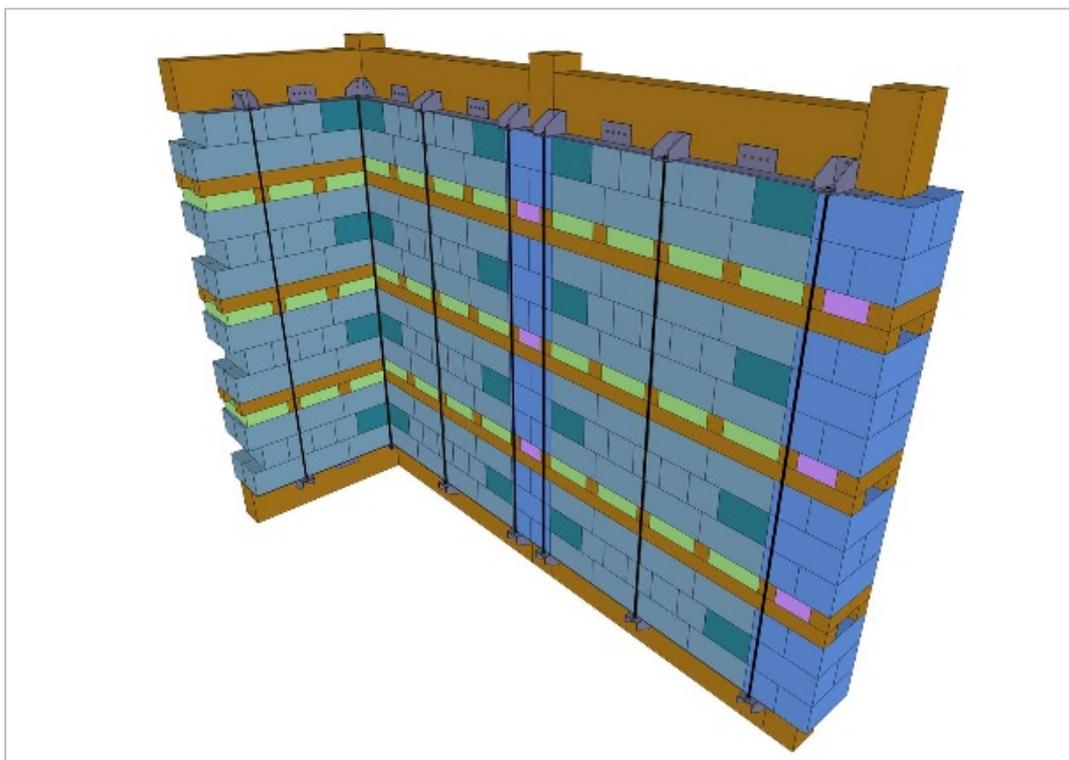


Figura 2-30 Installazione delle barre di post-compressione

<sup>1</sup> J. Davidovits, «Geopolymers - Inorganic polymeric new materials», *Journal of Thermal Analysis* 37, n. 8 (1991): 1633–56, <https://doi.org/10.1007/BF01912193>.

<sup>2</sup> M.C. Bignozzi et al., «Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag», *Applied Clay Science* 73, n. 1 (2013): 78–85, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.015>.

<sup>3</sup> C. Mazzoli et al., «Innovative materials and technologies for a new envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock», in *CESB 2013 PRAGUE - Central Europe Towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*, 2013, 405–8, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84925234142&partnerID=40&md5=a8438c675254adfe0b20189ed99692f9>.

<sup>4</sup> Poiché il geopolimero è un materiale ancora in corso di sperimentazione, non si hanno dei valori riconosciuti e definiti di densità e peso, ma solo valori indicativi oppure valori troppo specifici relativi a singole sperimentazioni. Inoltre per conferire al materiale specifiche proprietà chimico-fisiche si possono introdurre nell’impasto della matrice geopolimerica degli additivi che regolano le caratteristiche del prodotto finale: attraverso agenti areanti è possibile produrre geopolimeri più o meno porosi, andando ad incidere sul peso del materiale.

<sup>5</sup> «GASBETON® blocchi in calcestruzzo cellulare - Bacchi S.p.A.», consultato 11 agosto 2017, <http://bacchispa.it/gasbeton-calcestruzzo-cellulare>.

<sup>6</sup> ROTHO BLAAS SRL, Via Dell'Adige N. 2/1, 39040, Cortaccia (BZ)

### 3 IL SISTEMA STRUTTURALE INTEGRO BS 400

Le successive evoluzioni del sistema ed il continuo processo di affinamento hanno contribuito ad incrementare la sensibilità nei confronti delle problematiche realizzative e di fattibilità. L'esperienza e le sperimentazioni costruttive (che verranno presentate successivamente) hanno consentito di individuare ulteriori aspetti incongrui o critici nella soluzione precedente.

Concettualmente la posa della trave accoppiata alla piastra in sommità una volta terminata la realizzazione del tamponamento sottostante rende tale sistema più vicino alla concezione di muratura portante che a quella di telaio, poiché gli elementi lignei assumono essenzialmente funzioni di ritegno dei blocchi e di propagazione degli sforzi. In effetti anche la logica realizzativa si discosta molto da quella intelaiata poiché non è possibile la preventiva realizzazione della struttura completa e sussiste il vincolo di dover alloggiare la trave solo una volta completato il campo murario sottostante, conferendo alla realizzazione del sistema costruttivo una sequenza strato per strato.

Questo aspetto porta criticità a livello realizzativo. La posa a secco dei blocchi, seppur rettificati, provocherà in sommità qualche dislivello che va ad influenzare in maniera criticamente negativa il corretto posizionamento della trave e quindi dei travetti e dei solai: non si hanno certezze sul raggiungimento delle quote di interpiano di progetto in fase di costruzione.

Lo spessore del tamponamento grezzo raggiunge la notevole dimensione di 40 cm senza contare le finiture esterne che comprendono contropareti areate; tale aspetto nasce dalla necessità del tamponamento di inglobare i pilastri per garantire un corretto ammorsamento tra i corsi e attivare quindi, in caso di necessità, un buon comportamento scatolare.

Per la realizzazione del tamponamento tra due pilastri in un interpiano occorrono 149 blocchi sagomati ad hoc di geopolimero; il materiale a cui si fa riferimento è risultato di grande interesse nel campo dei rivestimenti ma la sua ipotetica introduzione come blocco, strutturale e non, non è più oggetto di ricerca: si tratta quindi di una soluzione concettualmente valida, ma non percorribile a livello pratico.

Il numero di blocchi necessari per chiudere un campo (149 elementi divisi in 4 tipologie) è eccessivo a causa delle proprietà portanti che si sono conferite al tamponamento; inoltre non si ha flessibilità per quanto riguarda le aperture necessarie: si passa dal pieno al vuoto senza soluzioni intermedie a causa delle rigide regole che governano la realizzazione di tale prototipo, facendo sì che l'involucro perda gran parte della massività che dovrebbe caratterizzarlo.

La versione definitiva del sistema costruttivo prende il nome di Integro BS 400 e si basa sull'accostamento ad un telaio ligneo (legno lamellare di abete omogeneo), con passo di 400x400 cm, di un tamponamento armato collaborante in blocchi di laterizio, posato a secco tramite l'utilizzo di irrigidimenti lignei esterni e reso solido tramite una compressione ottenuta con tiranti, mensole e piastre metalliche. Il singolo modulo, successivamente aggregabile per dar forma a edifici più complessi, è costituito da due piani fuori terra elevati su fondazioni da individuare a seconda delle caratteristiche del sito. Tutti i solai, per quanto concerne l'impalcato, sono realizzati con un pannello sandwich ricavato mediante l'accoppiamento di un grigliato stampato in vetroresina con due pannelli di legno. Quest'ultimo sistema, sviluppato parallelamente attraverso prove di carico in laboratorio, è stato progettato proprio per adattarsi al telaio in oggetto.<sup>1</sup>

Al fine di rappresentare al meglio la concezione alla base di questo progetto innovativo, che fonda le sue radici nella tradizione storica delle tecniche costruttive antisismiche in territorio italiano, soprattutto nella riattualizzazione del sistema della Casa Baraccata<sup>2</sup>, si illustreranno tutte le fasi di montaggio del singolo modulo a partire dallo spiccato di fondazione. Si evidenzieranno in questo modo, oltre alle differenze concettuali rispetto alle prime versioni proposte, anche le operazioni che potranno essere realizzate in officina e quelle che dovranno essere realizzate in cantiere, mostrando così l'esiguità e la semplicità di queste ultime.

---

## 3.1 TELAIO PRINCIPALE LIGNEO

---

Il telaio principale ligneo si configura come un sistema modulare pilastrato con interasse tra i pilastri di 400 cm. La struttura è pensata strutturalmente indipendente e montabile senza attendere il completamento dei tamponamenti in muratura. In generale, salvo ove specificato, verrà utilizzato del legno lamellare GL30h per garantire un migliore controllo delle tolleranze.

---

### 3.1.1 PILASTRI

---

Materiale: legno lamellare GL30h.

Dimensioni: 20x20x677 cm.

Numero elementi in ogni modulo: 8.

- a. Operazioni da realizzare in officina:
  - Sagomatura della testa in sommità.

- Giunzione delle piastre a T (Figura 3-3) su cui si innesteranno le travi di bordo e di spina.
  - Inserimento in sommità degli elementi femmina del giunto PITZL: oltre a sostenere le travi, hanno un ruolo fondamentale nella realizzazione della copertura; per questo motivo le teste in sommità sono soggette a particolari sagomature, a seconda della posizione del pilastro, sulle quali vanno posizionati i giunti.
- b. Operazioni da realizzare in cantiere:
- Allargiamento sulla fondazione e messa a piombo.

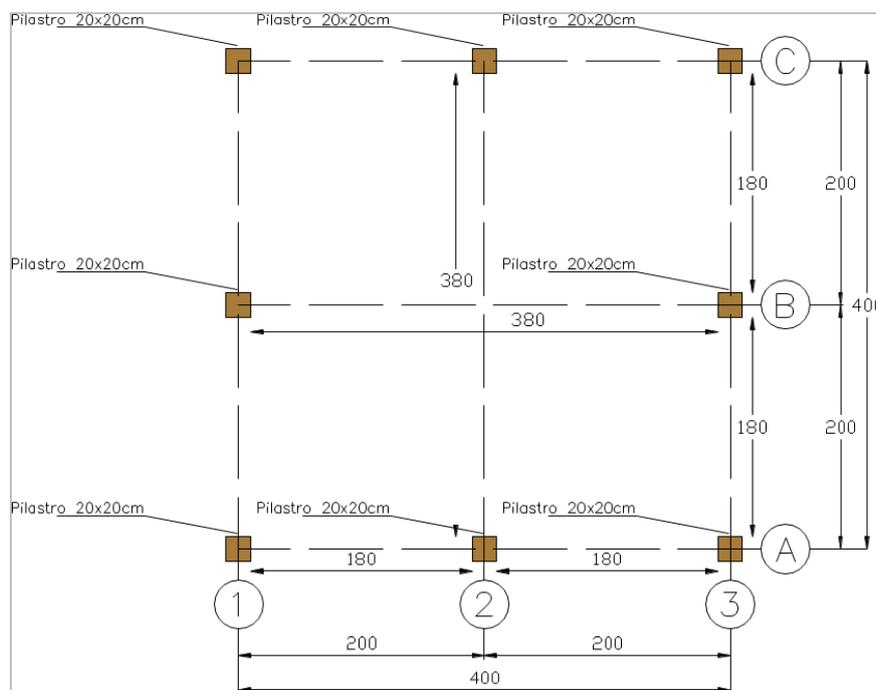


Figura 3-1 Disposizione in pianta dei pilastri del modulo.

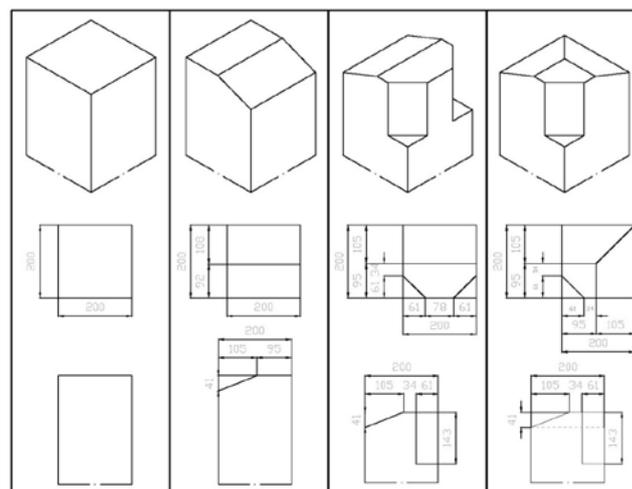


Figura 3-2 Tipi di sagomature della testa del pilastro.

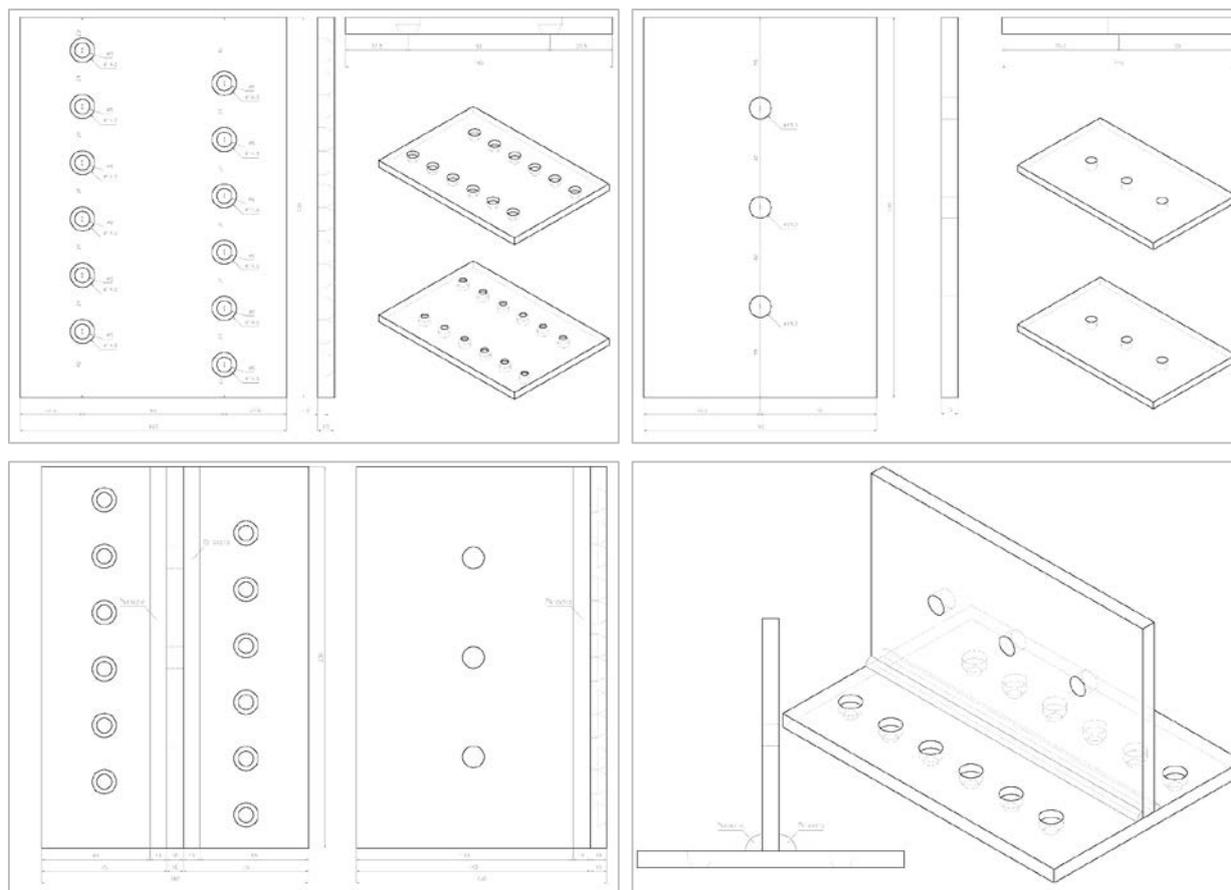


Figura 3-3 Dettagli esecutivi per la realizzazione delle piastre a scomparsa per realizzare il giunto trave-pilastro

### 3.1.2 TRAVI DI BORDO

Materiale: legno lamellare GL20h. Dimensioni: 30x20x180 cm.

Numero elementi in ogni modulo: 24.

a. Operazioni da realizzare in officina:

- Sagomatura delle teste per consentire il giusto alloggiamento sulle piastre a T.
- Alloggiamento della piastra di ripartizione e del giunto bentonitico previa realizzazione di tre fori passanti per i bulloni.
- Posizionamento mensole esterne di 10 cm (S275, profilo angolare a lati uguali 40x40x6 mm), realizzate interamente in officina da profili commerciali. Dimensioni sezione: 100x50x8 mm).
- Posizionamento e giunzione degli elementi PITZL 88006.0000 femmina che sosterranno i travetti del solaio.

b. Operazioni da realizzare in cantiere:

- Posizionamento delle travi sulle piastre a T, inserimento bulloni, serraggio dei dadi.

### 3.1.3 TRAVI DI SPINA

Materiale: legno lamellare GL32h. Dimensioni: 25x20x380 cm.

Numero elementi in ogni modulo: 3.

- a. Operazioni da realizzare in officina:
  - Sagomatura delle teste per consentire il giusto alloggiamento sulle piastre a T.
  - Inserimento degli elementi PITZL 88006.0000 femmina che sosterranno i travetti del solaio.
- b. Operazioni da realizzare in cantiere:
  - Posizionamento delle travi sulle piastre a T, inserimento bulloni, serraggio dei dadi.



Figura 3-4 Componente femmina del giunto PITZL.

### 3.1.4 TRAVETTI

Materiale: legno massiccio C35. Dimensioni: 8x8x177,6 cm.

Numero elementi in ogni modulo: 36.

- a. Operazioni da realizzare in officina:
  - Posizionamento, su ambedue le teste, dei giunti maschio PITZL 88006.0000.
- b. Operazioni da realizzare in cantiere:
  - Alloggiamento dei travetti negli elementi femmina posti sulle travi.

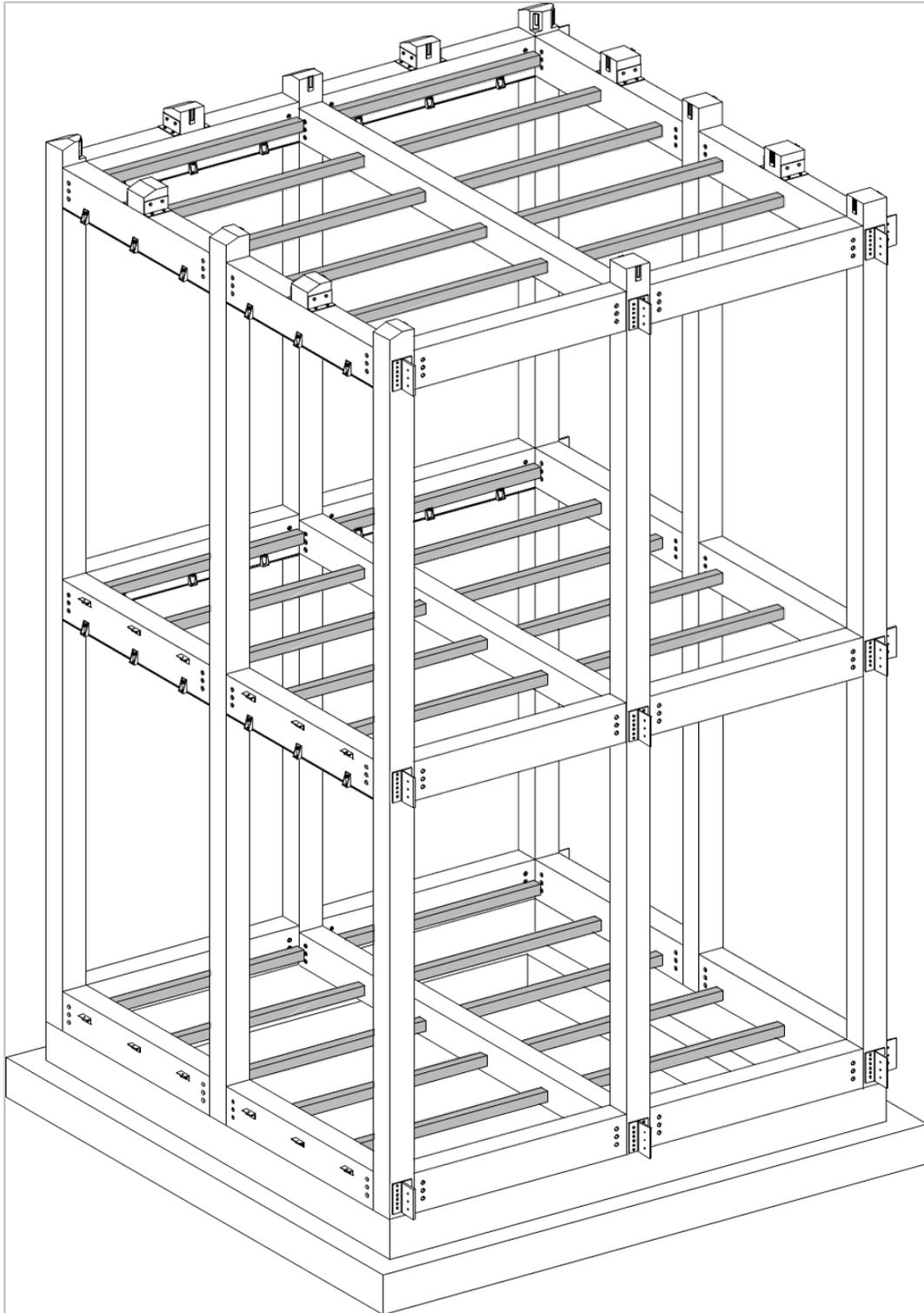


Figura 3-5 Assonometria del telaio ligneo

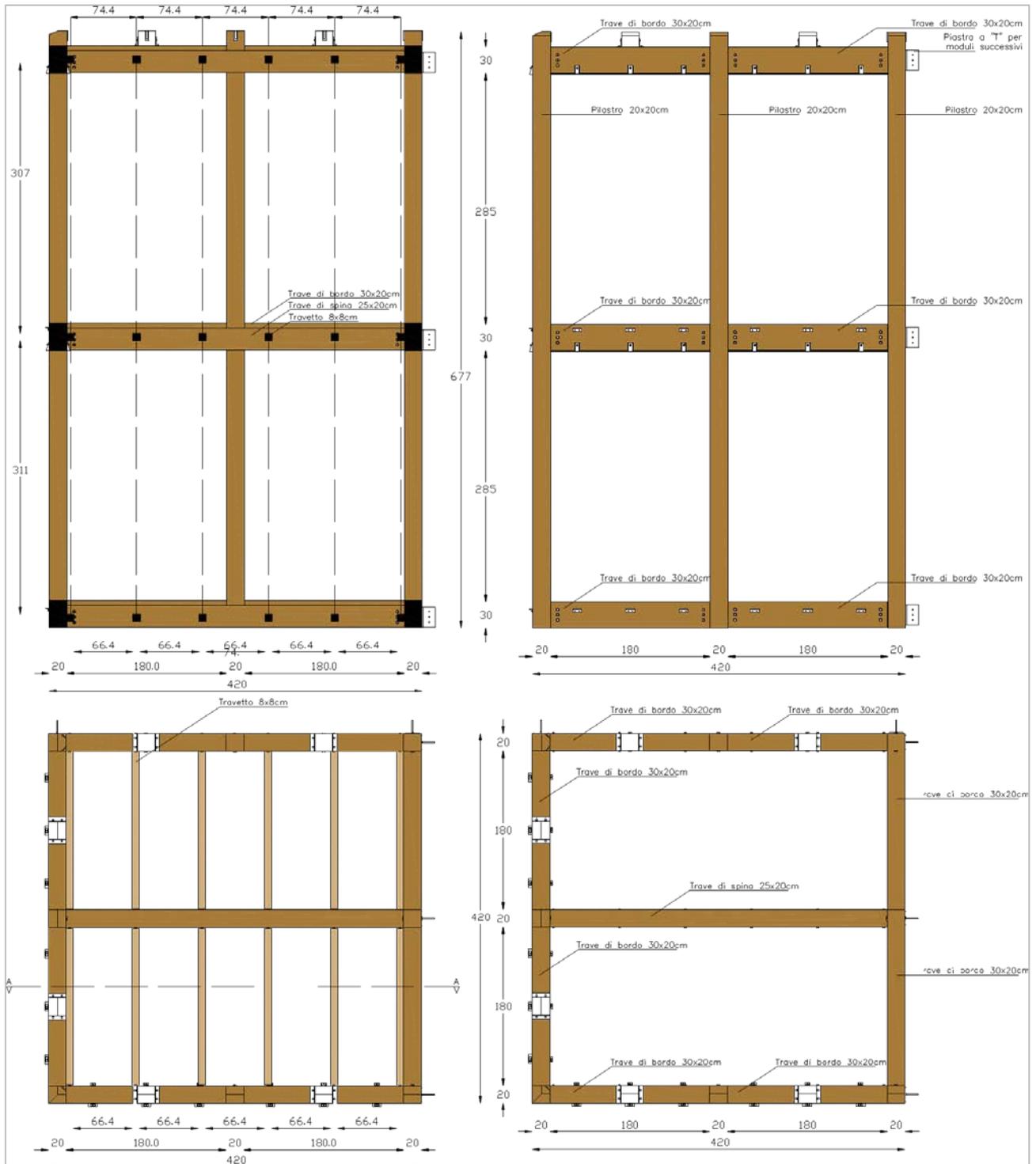


Figura 3-6 Pianta e prospetti del modulo base al completamento del telaio ligneo

## 3.2 SOLAI

Come detto l'impalcato del solaio è realizzato con un pannello sandwich appositamente messo a punto ed attualmente in fase di perfezionamento attraverso la realizzazione di prove di carico per testarne le caratteristiche di rigidità e resistenza, sia nel piano, per garantire il soddisfacimento delle

prestazioni in condizioni statiche, sia parallelamente al piano, per garantirne un corretto comportamento in caso di evento sismico [10].

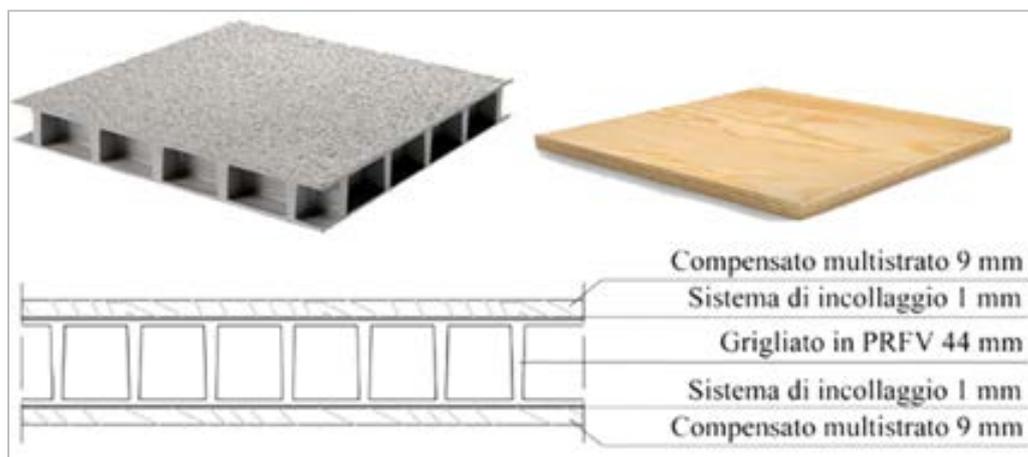


Figura 3-7 Impalcato del solaio. Stratigrafia del pannello sandwich strutturale

Il pannello sandwich completo è costituito da un grigliato in vetroresina di spessore 4,4 cm, racchiuso tra due tavolati lignei di spessore 1 cm ciascuno. Le dimensioni dei pannelli da posare direttamente in opera sono di 180x380x6,4 cm (Figura 3-7).

Materiale: grigliato in vetroresina (4,4 cm) racchiuso tra due tavolati lignei (1 cm ciascuno).

Dimensioni: 180x380x6,4 cm.

Numero elementi in ogni modulo: 6.

a. Operazioni da realizzare in officina:

- Taglio del grigliato.
- Taglio del tavolato inferiore.
- Sagomatura del tavolato superiore per realizzare isole dove si posizioneranno i tiranti testa battente.
- Incollaggio con resine dei tavolati al grigliato.
- Eventuale realizzazione di fori circolari di diametro variabile per il passaggio dell'impiantistica.

b. Operazioni da realizzare in cantiere:

- Posizionamento sopra i travetti.
- Giunzione agli elementi strutturali tramite viti poste a 45°.

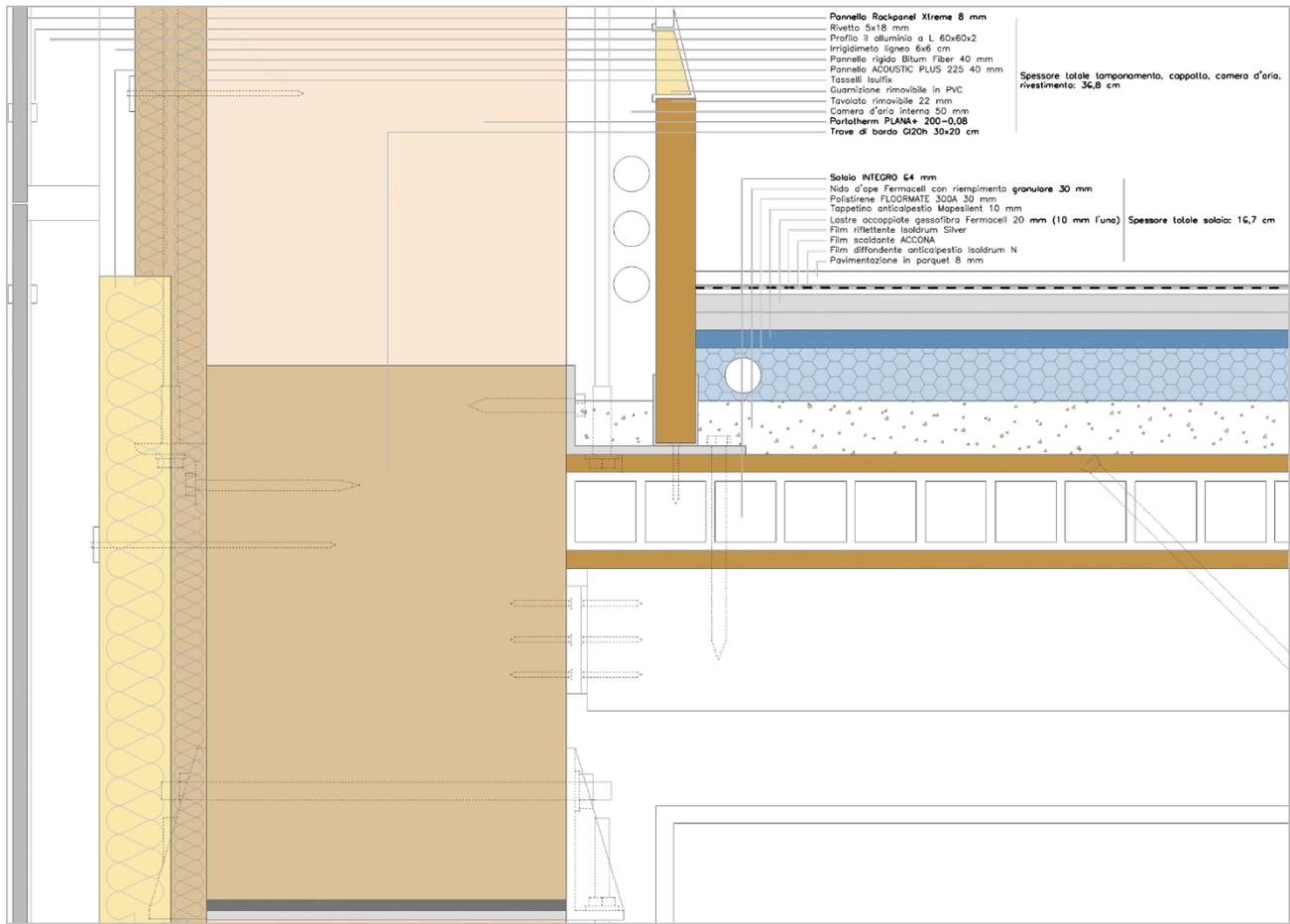


Figura 3-8 Dettagli dell'attacco del solaio interpiano

### 3.2.1 CERCHIATURA DEI SOLAI

Materiale: acciaio S275, profilo angolare a freddo con lati disuguali.

Dimensioni sezione: 100x50x5 mm.

Lunghezza totale elementi coinvolti: 45 m.

c. Operazioni da realizzare in officina:

- Taglio degli elementi e realizzazione delle unghiate.
- Realizzazione di fori per snellire le operazioni di cantiere e per aver maggior precisione.
- Realizzazione dei fori dove passerà il gambo del tirante testa battente.

d. Operazioni da realizzare in cantiere:

- Posizionamento sopra i solai.
- Giunzione agli elementi strutturali tramite viti.

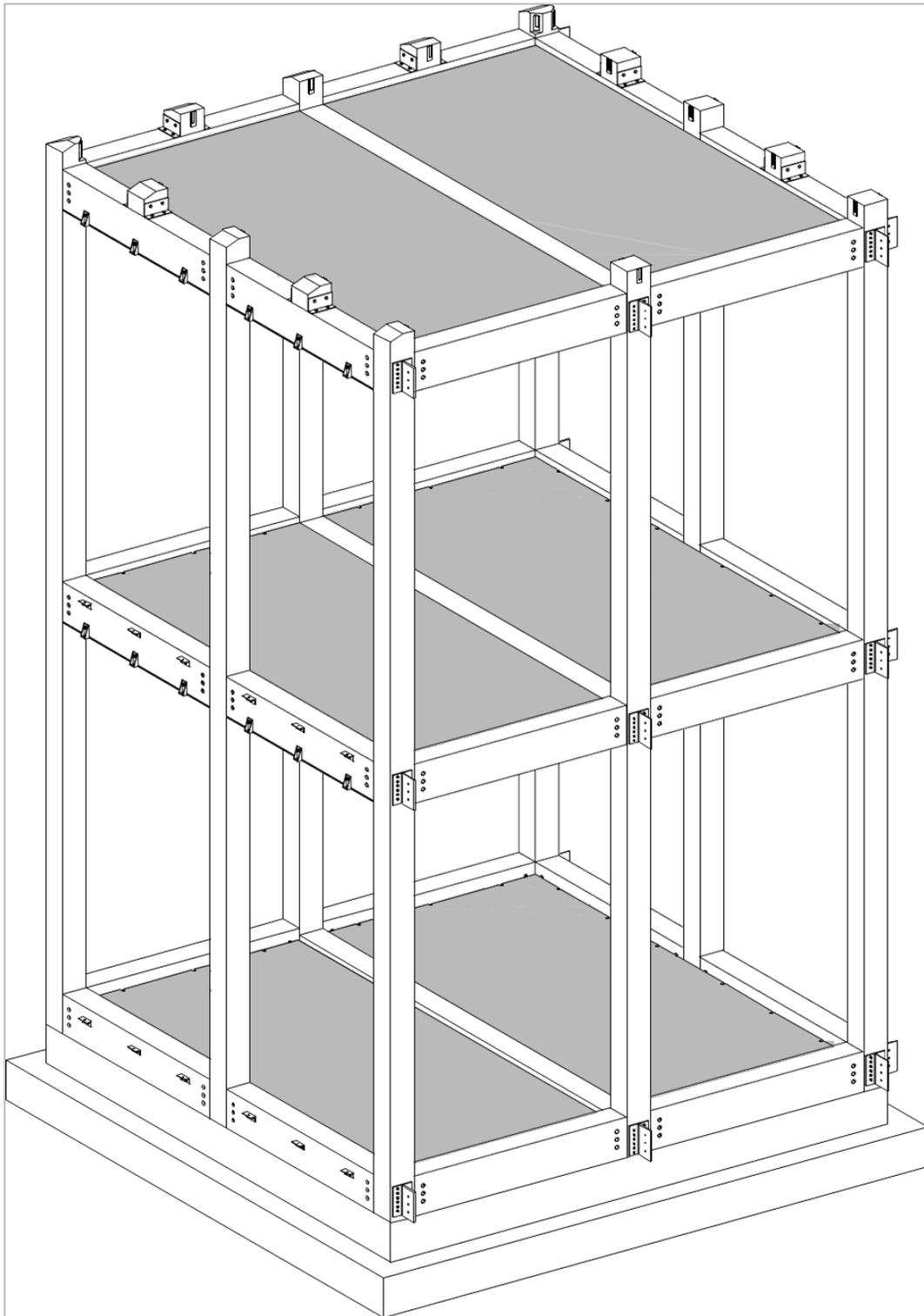


Figura 3-9 Solai sui tre livelli del modulo.

### 3.3 TAMPONAMENTO ARMATO A SECCO

Terminato il montaggio del telaio ligneo si può procedere con l'apparecchiatura dei tamponamenti di parete con contributo controventante. Verranno presentate le lavorazioni da svolgere per completare un campo di muratura con attenzione anche al corretto impiego di presidi di sicurezza per le lavorazioni.

#### 3.3.1 IRRIGIDIMENTI E PRIMO TAVOLATO DI RIPARTIZIONE

Nelle fasi precedenti alla compressione non si hanno vincoli che impediscano imprevedibili crolli dei blocchi impilati; per garantire la sicurezza collettiva e individuale e per avere delle guide in fase di posa dei corsi, vengono inseriti, sui lati esterni delle travi, dei morali in legno lamellare di conifera 6x6 cm, che successivamente sosterranno anche i profili su cui si innesteranno i pannelli esterni.

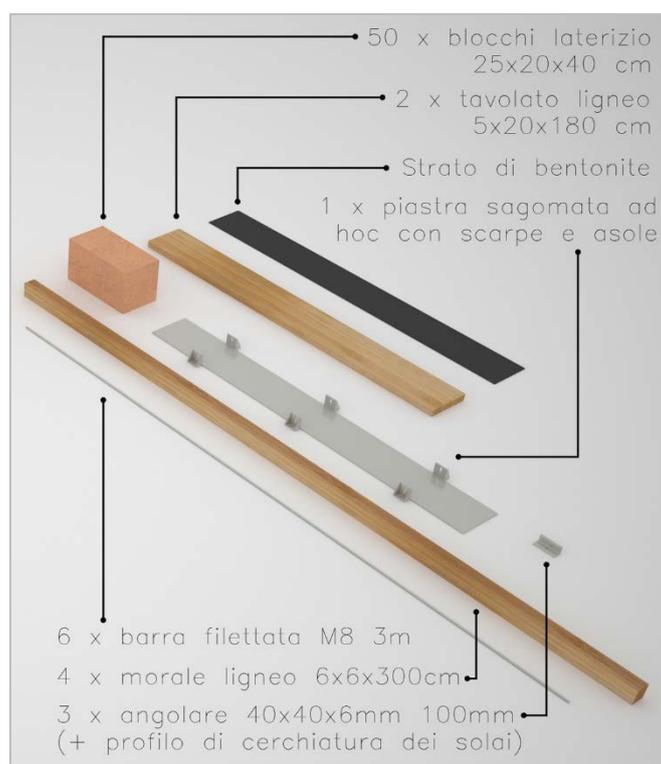


Figura 3-10 Elementi costitutivi del tamponamento.

Altro accorgimento necessario prima della posa dei blocchi è l'introduzione un tavolato ligneo di 5 cm alla quota che andrà a raggiungere il quarto corso di laterizi. Tale elemento viene fissato ai

pilastri limitrofi con 4 piastre dritte metalliche 195x20x2 mm con 13 fori, due per ogni testa del profilo, internamente ed esternamente.

La giunzione rimane non rigida fino all'applicazione della compressione, momento in cui avvengono lievi spostamenti che se vincolati possono indurre autotensioni: solo due viti per piastra in modo da avere un elemento vincolato negli spostamenti al di fuori del piano della parete ma a cui sono concessi lievi movimenti verticali.

Il tavolato assume quindi diverse funzioni:

- funge da parapetto;
- aiuta le operazioni di posa andando a definire i limiti spaziali entro cui collocare i blocchi;
- una volta applicata la compressione contribuirà all'uniforme distribuzione delle pressioni.

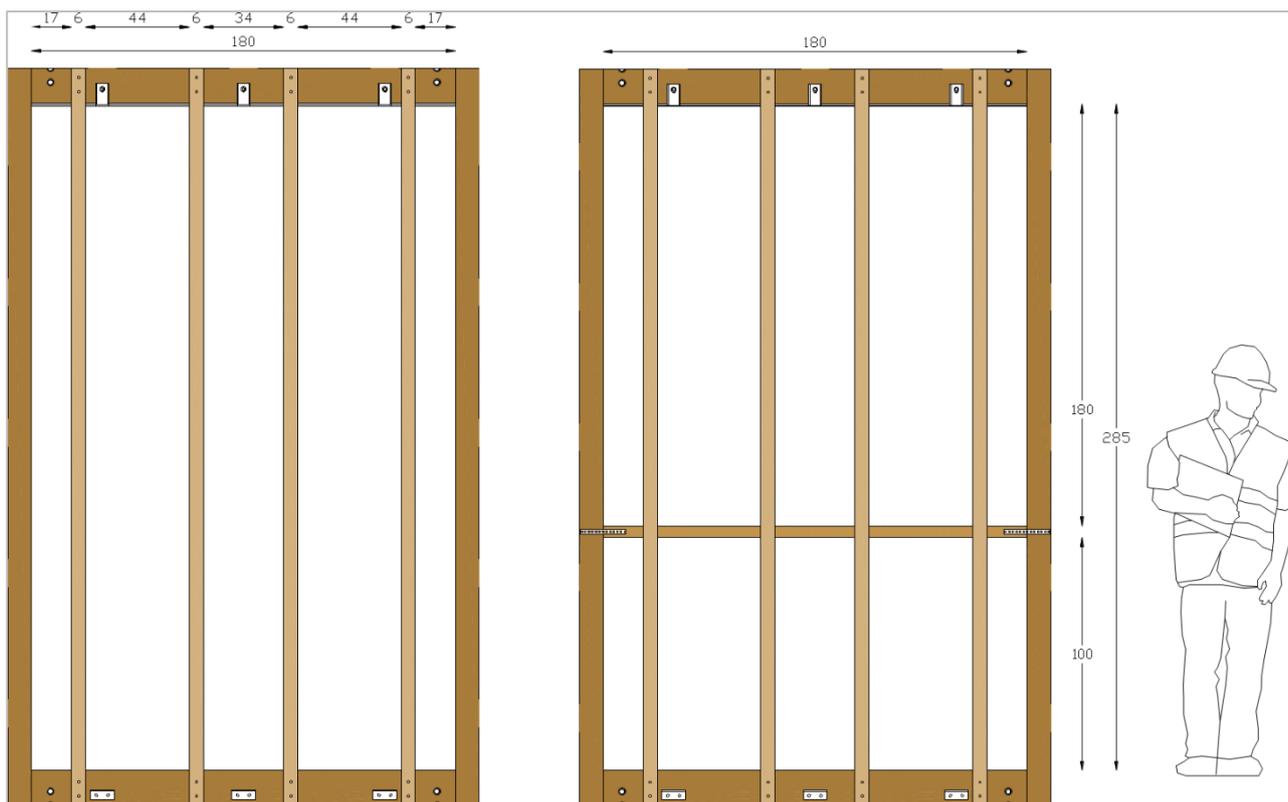


Figura 3-11 irrigidimenti esterni e inserimento del primo tavolato di ripartizione

## 3.3.2 TAMPONAMENTO

Per la realizzazione del tamponamento si è deciso, data la difficoltà nello sviluppo dei blocchi in geopolimero, di effettuare una ulteriore semplificazione. L'idea è quella di rivolgersi a soluzioni commerciali già esistenti poste in opera in maniera innovativa seguendo l'obiettivo di un confezionamento a secco del 'intero tamponamento. Operando in questo senso si sono individuati come pienamente compatibili i blocchi e semi blocchi rettificati prodotti dalla Wienerberger del tipo POROTHERM PLANA+ 200-0,08.





### Scheda tecnica

In riferimento alla norma italiana UNI EN 771-1. Prodotto in categoria I C E




#### Pth PLANA+ 20 - 0,08

#### Caratteristiche del blocco

Codice	53005661		
Stabilimento di produzione	HAIDING		
Tipologia di muro	tamponamento		
Spessore	cm	20	
Lunghezza	cm	40	
Altezza	cm	24,9	
Peso del blocco	kg	15,9	
Foratura	% <	55	
Densità media	Kg/mc	800	

#### Muratura e confezionamento

Muratura mc	pezzi	n.	50,0
	malta speciale PLAN	sacchi n.	0,5
	schiuma DRYFIX extra	bombole n.	-
	peso <sup>(1)</sup>	kg	812,5
Muratura mq	pezzi	n.	10,0
	malta speciale PLAN	sacchi n.	0,1
	schiuma DRYFIX extra	bombole n.	-
	peso <sup>(1)</sup>	kg	162,5
Pacco	pezzi	n.	72
	peso	kg	1145
	pezzi per motrice	13 ton	720
	pezzi per autotreno	24 ton	1440

#### Caratteristiche meccaniche

Resistenza del blocco	base <sup>(2)</sup>	N/mm <sup>2</sup>	10
	testa <sup>(2)</sup>	N/mm <sup>2</sup>	1
Resistenza della muratura	a compressione <sup>(3)</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-
	a taglio <sup>(3)</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-

#### Caratteristiche termiche

Conducibilità termica $\lambda$	con malta speciale PLAN 1 mm <sup>(4)</sup>	W/mK	0,084
	con malta tradizionale 12 mm	W/mK	-
	con malta tradizionale 7 mm	W/mK	-
Trasmittanza termica U	con malta termica 12 mm	W/m <sup>2</sup> K	-
	con malta speciale PLAN 1 mm <sup>(5)</sup>	W/m <sup>2</sup> K	0,384
	con malta tradizionale 12 mm	W/m <sup>2</sup> K	-
Capacità termica areale interno <sup>(6)</sup>	con malta tradizionale 12 mm	W/m <sup>2</sup> K	-
	con malta tradizionale 7 mm	W/m <sup>2</sup> K	-
	con malta termica 12 mm	W/m <sup>2</sup> K	-
Trasmittanza termica periodica <sup>(6)</sup>		W/m <sup>2</sup> K	0,073
Sfasamento	ore		13,32
Attenuazione			0,190

#### Resistenza al fuoco

	min <sup>(7)</sup>	EI 120
--	--------------------	--------

#### Potere fonoisolante

	dB <sup>(8)</sup>	46
--	-------------------	----

#### TIPOLOGIA DI BLOCCO

Blocco rettificato ad incastro con fori riempiti di lana di roccia per la realizzazione di murature di tamponamento ad elevata prestazione termica

#### ACCESSORI E PEZZI SPECIALI



#### ULTERIORI INFORMAZIONI

calore specifico	c	1530	J/kgK
coeff. diffusione vapore acqueo	$\mu$	2,6 / 4,6	

#### POROTHERM RANKING

-  precisione di posa
-  comfort estivo
-  rapidità esecutiva
-  malta/adeseivo inclusi
-  risparmio energetico



Figura 3-12 Scheda tecnica Porotherm Plana

In termini di isolamento termico e acustico il blocco POROTHERM risulta essere una scelta ottimale per il prototipo Integro BS 400, per via delle notevoli performance e per la congruenza coi principi di sostenibilità e massività.

Dal punto di vista geometrico si ha una perfetta rispondenza con la luce libera tra i pilastri (180 cm in cui inserire 4 blocchi e un seme blocco a corsi alternati per garantire una corretta propagazione delle pressioni) e con lo spessore dei pilastri (20 cm).

Prima della posa degli ultimi due corsi di laterizi, viene inserito un secondo tavolato, che oltre a uniformare ulteriormente la propagazione delle pressioni, serve, in coppia con il primo, a definire i limiti entro cui verranno realizzate le aperture nel tamponamento; senza tale elemento sarebbe possibile realizzare solo pareti piene poiché in presenza di un'apertura non si avrebbero vincoli ai movimenti verticali dei blocchi soprastanti l'eventuale vuoto.

Sui tavolati, in presenza di aperture, vengono collocate altre mensole (più lunghe di quelle standard per dissipare su un'area maggiore lo sforzo di trazione che si trasmette al ripartitore) che permettono l'interruzione del tirante centrale, scomponendolo in due elementi.

Terminate tali operazioni si procede con la messa in post-compressione del tamponamento tramite il serraggio dei bulloni in sommità delle barre il cui funzionamento generale verrà descritto più avanti.

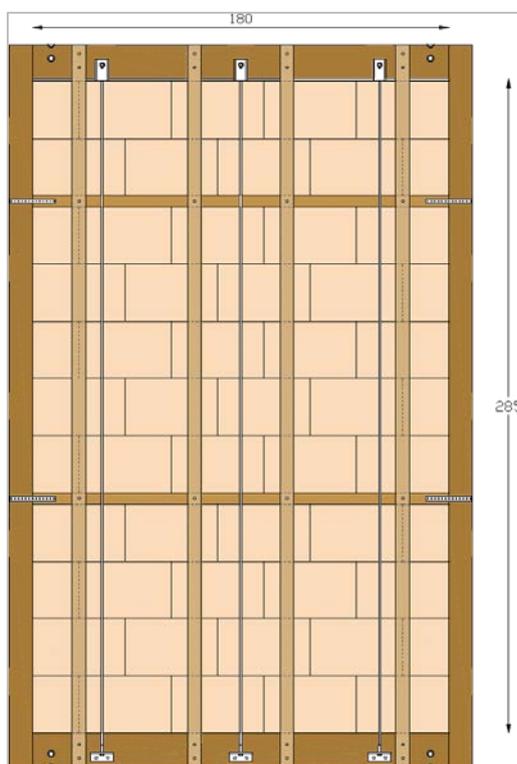


Figura 3-13 Tamponamento completato

Una volta applicata la compressione e terminati i micromovimenti verticali di assestamento resi possibili dalle giunzioni provvisorie non rigide dei tavolati, si conclude questa fase andando a cerchiare le aperture con tavolati spessi 5 cm, fissati ai precedenti elementi lignei con piastre piegate, e andando a porre le rimanenti 4 viti a piastra per il collegamento dei ripartitori con i pilastri.

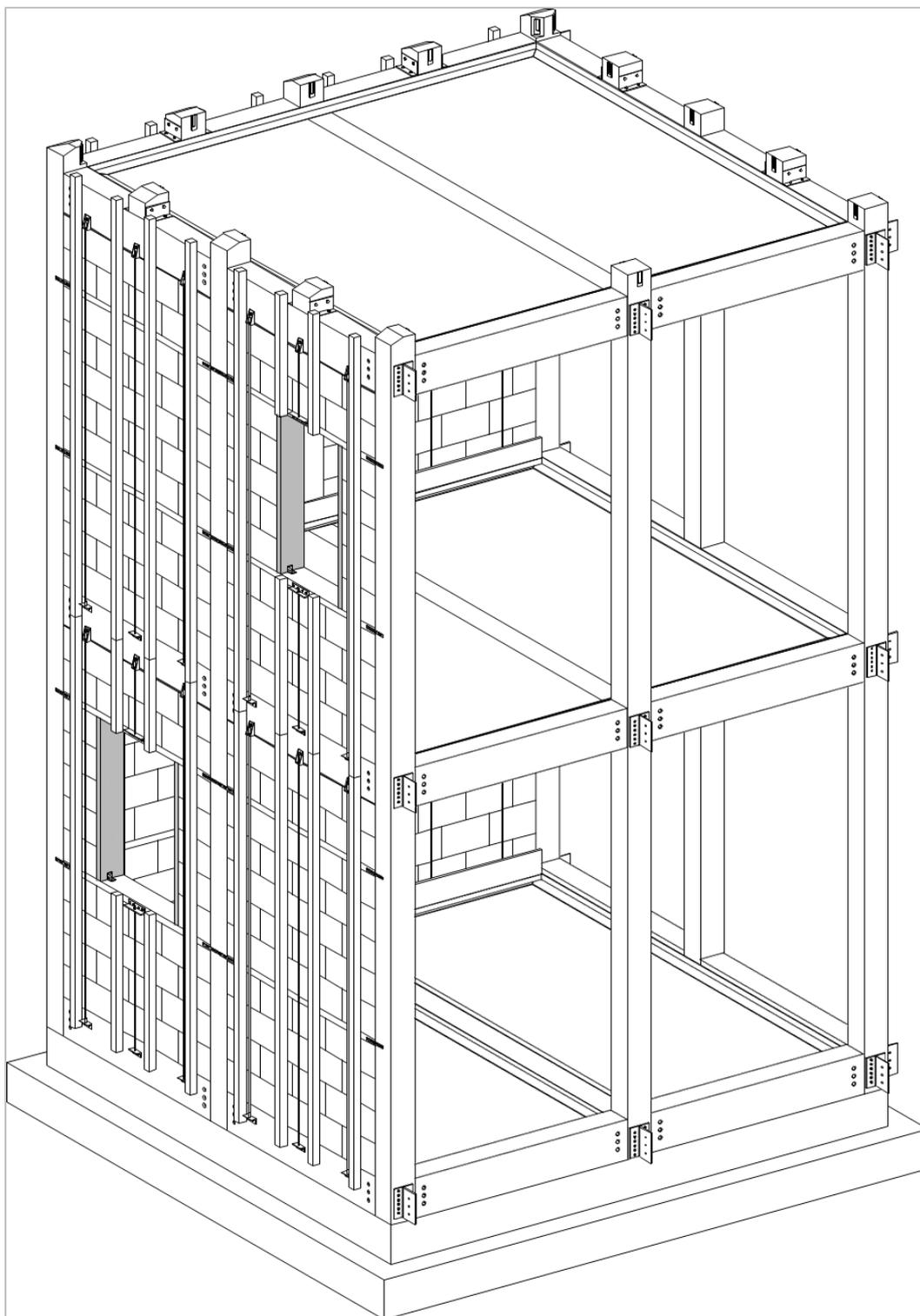


Figura 3-14 Modulo base completo con tamponamento d'angolo e aperture

Ultima operazione necessaria è quella di andare ad unire con viti autofilettanti ogni morale verticale d'irrigidimento ai due tavolati di ripartizione ormai ben vincolati. Il posizionamento degli irrigidimenti lignei non è casuale, poiché, in questa configurazione, ogni blocco di laterizio viene a contatto con un morale: si vogliono così evitare accidentali e rovinose cadute dei corsi in tutte le lavorazioni che precedono la compressione, e quindi, l'attivazione delle forze d'attrito che impediscono movimenti all'interno e fuori dal piano della parete.

### 3.4 SISTEMA DI POST-COMPRESSIONE

---

Data la grande propensione agli eventi sismici nella fascia mediterranea, l'uso del laterizio declinato con la tecnica costruttiva a secco può risultare generalmente ossimorico a livello prestazionale, ma, con i giusti accorgimenti, può portare benefici sia in termini di resistenza (statica e dinamica) che di comfort abitativo (sfasamento e smorzamento dell'onda termica, eliminazione dei ponti termici dovuti ai letti di malta).

Come già fatto nella soluzione precedente, per garantire solidità al tamponamento è necessario, in assenza di leganti, fornire un'adeguata compressione in modo da attivare forze d'attrito tra gli elementi che si oppongano efficacemente a possibili fenomeni deformativi causati da forze nel piano della parete e nel piano ortogonale ad essa. Tale funzione viene espletata da un sistema di barre filettate che fungono da tiranti. Questo sistema di compressione viene completato superiormente da una piastra di ripartizione in acciaio realizzata ad hoc con la funzione di ripartire uniformemente la pressione. Inferiormente, con l'intento di semplificare ed efficientare la soluzione proposta, la piastra metallica viene sostituita da profili commerciali ad "L" opportunamente lavorati. In questo modo si ha un utilizzo più ponderato dell'acciaio, sia in termini di lavorazioni che in termini di quantitativo di materiale impiegato, rispetto alla versione precedente del prototipo.

Alle estremità inferiore di ogni barra filettata si trova un tirante testa battente accoppiato ad una rondella il cui scopo è, oltre a quello di fornire un vincolo efficace allo sfilamento della barra, permettere il trazionamento del tirante attraverso il solo serraggio del bullone posto superiormente. Mediante tale sistema è possibile, attraverso un'opportuna sagomatura del tavolato superiore del solaio, sfruttare il profilo di cerchiatura come vincolo allo scorrimento della barra filettata, avendo un risparmio in termini di spazio necessario ed elementi coinvolti.



Figura 3-15 Tirante testa battente esagonale.

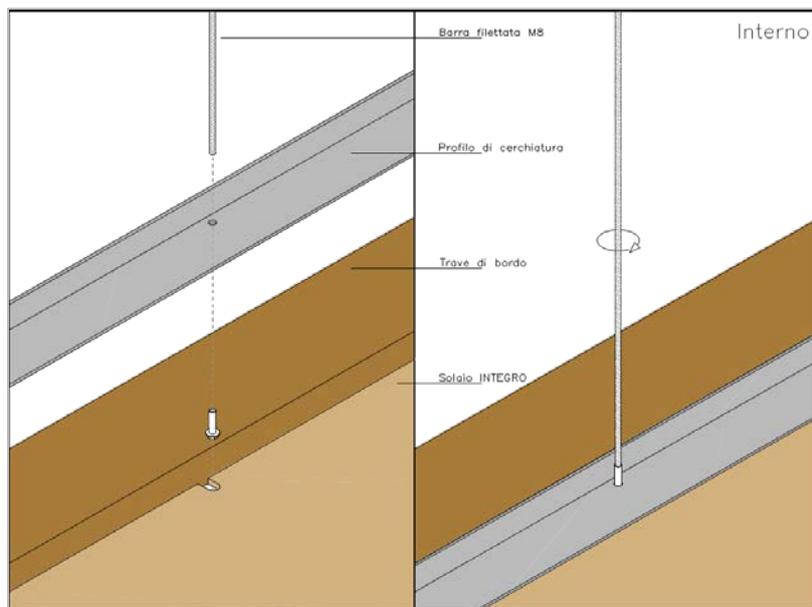


Figura 3-16 Infilaggio delle barre in corrispondenza di un solaio (lato interno)

Esternamente, per vincolare lo scorrimento dei tiranti, si adottano mensole realizzate da tronchi da 100 mm di profili in acciaio S275 ad "L" 40x40x6 mm commerciali tagliati, forati e giuntati alle travi in officina. I fori delle mensole e del profilo di cerchiatura presentano un diametro maggiore di 2 mm rispetto a quello dei tiranti testa battente che vi si inseriscono, per avere delle tolleranze relative al corretto posizionamento delle barre in posizione verticale.

Come già detto, in sommità le barre afferiscono ad una piastra in acciaio 1800x200x5 mm dotata di 6 scarpe irrigidite dotate di fori con opportuna asolatura nel piano della parete e forate nel piano orizzontale; tale elemento converte la trazione nei tiranti in una pressione uniforme che va a comprimere gli elementi del tamponamento. Le piastre vengono unite alle travi in officina, attraverso l'uso di tre barre passanti M10 per ogni elemento. All'interfaccia legno-acciaio vengono inseriti giunti bentonitici idroespandenti a strisce.

L'asolatura permette di avere margini di sicurezza per la corretta realizzazione del tamponamento; difatti, inizialmente, la piastra si trova a ridosso della bentonite sulla faccia inferiore della trave, posizione mantenuta stabile dal serraggio dei bulloni sulle barre filettate, in modo da poter posare i laterizi a secco con un margine dal bordo superiore di qualche millimetro.

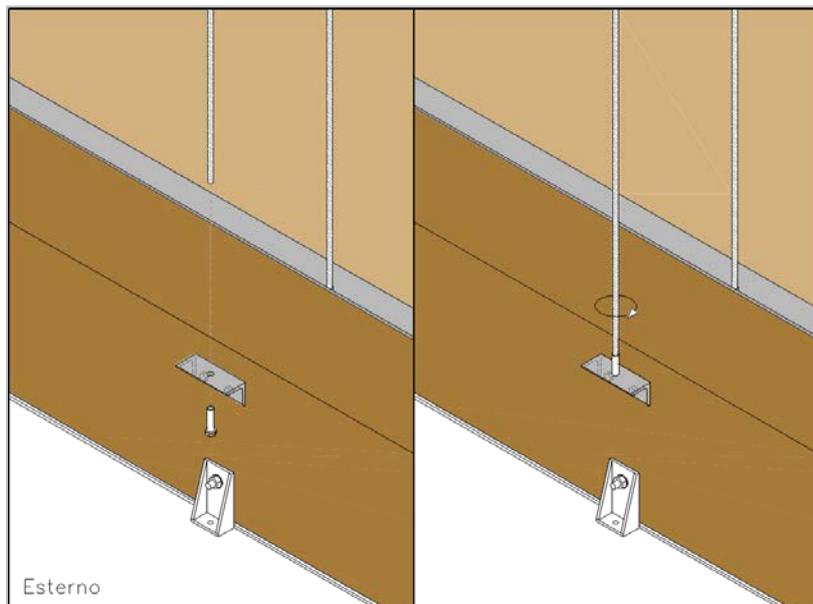


Figura 3-17 Infilaggio delle barre in corrispondenza di un solaio (lato esterno)

Una volta realizzata l'elevazione, la tolleranza tra trave e muratura viene riempita allentando i bulloni sulle asole, consentendo il movimento verso il basso della piastra mentre si effettua il serraggio dei tiranti e la messa in compressione del tamponamento. In seguito, bagnando i giunti bentonitici questi si espandono andando a chiudere il vuoto creato tra piastra e trave.

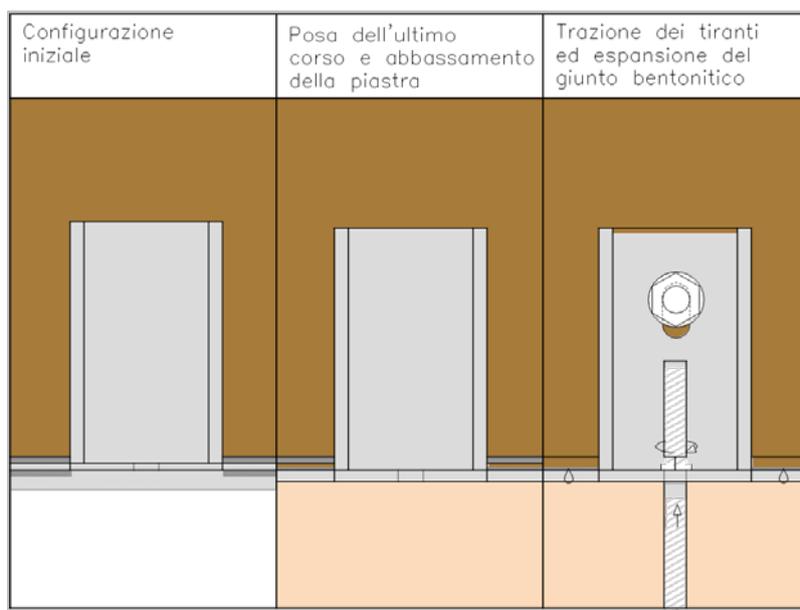


Figura 3-18 Sequenza delle fasi per l'applicazione della compressione.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche geometriche e le lavorazioni da effettuare in officina per la realizzazione della singola piastra.

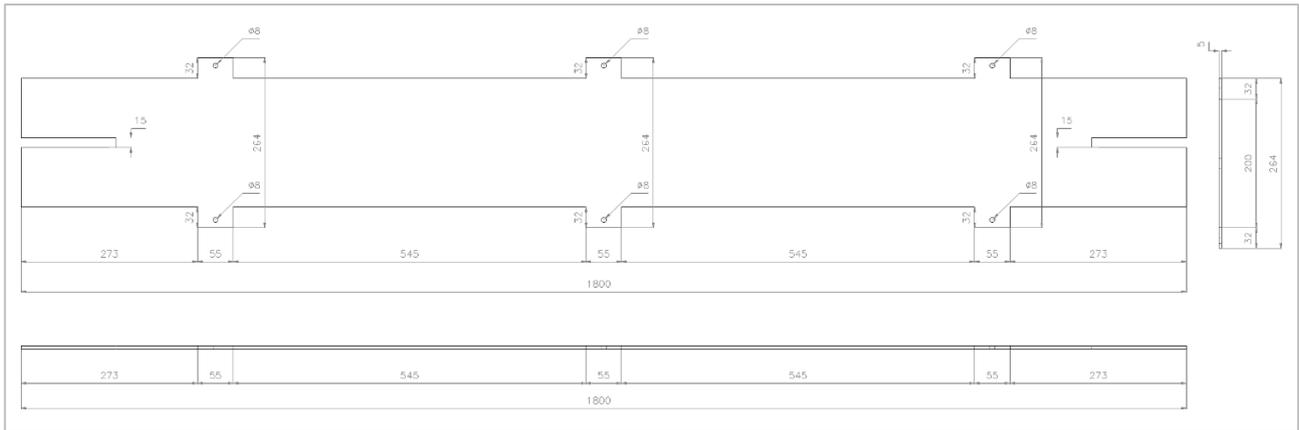


Figura 3-19 disegni esecutivi piastra di ripartizione (base)

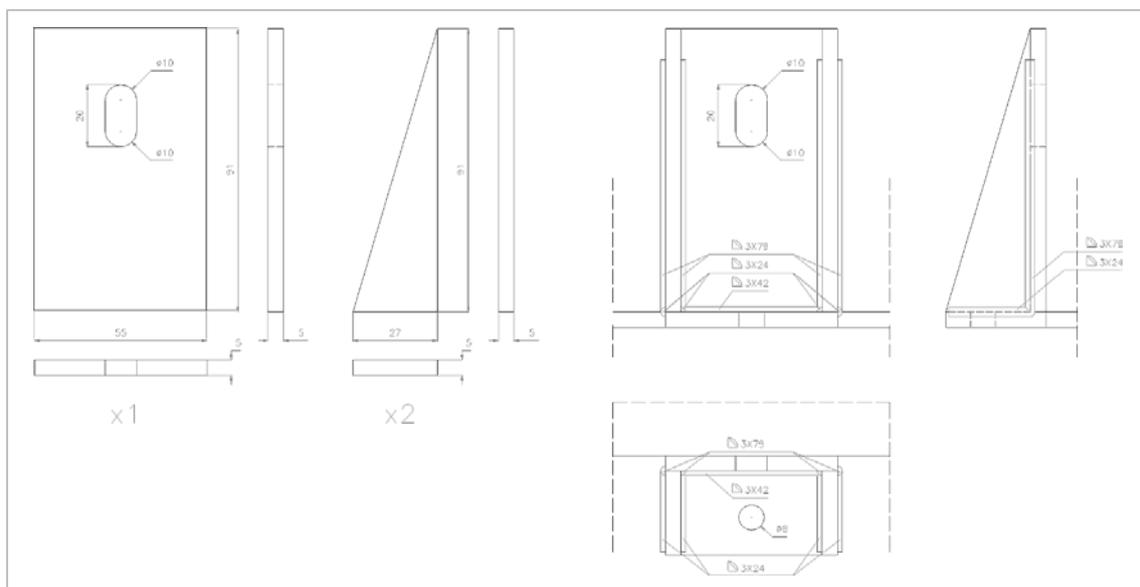


Figura 3-20 disegni esecutivi piastra di ripartizione (scarpe asolate)

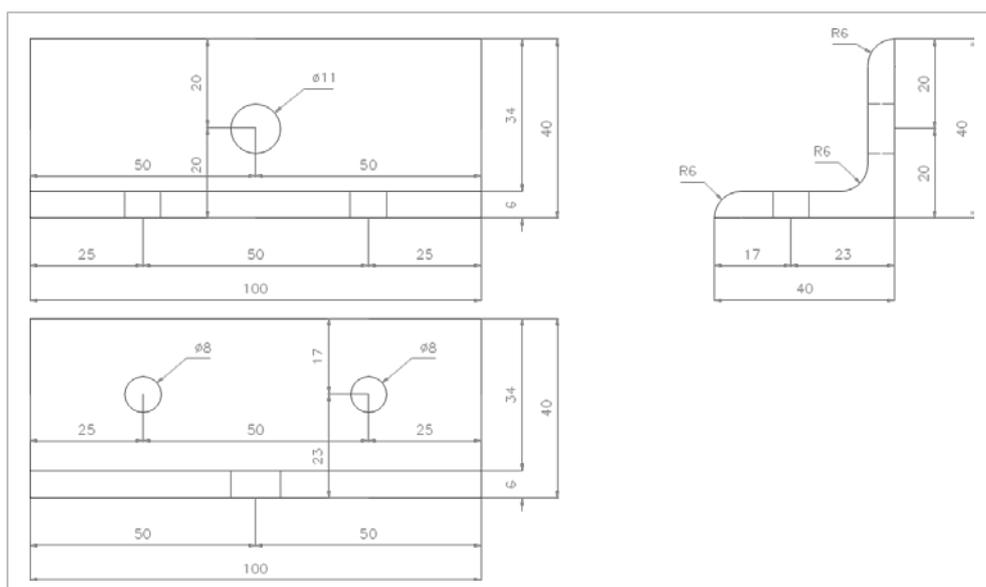


Figura 3-21 mensola ricavata da profili commerciali

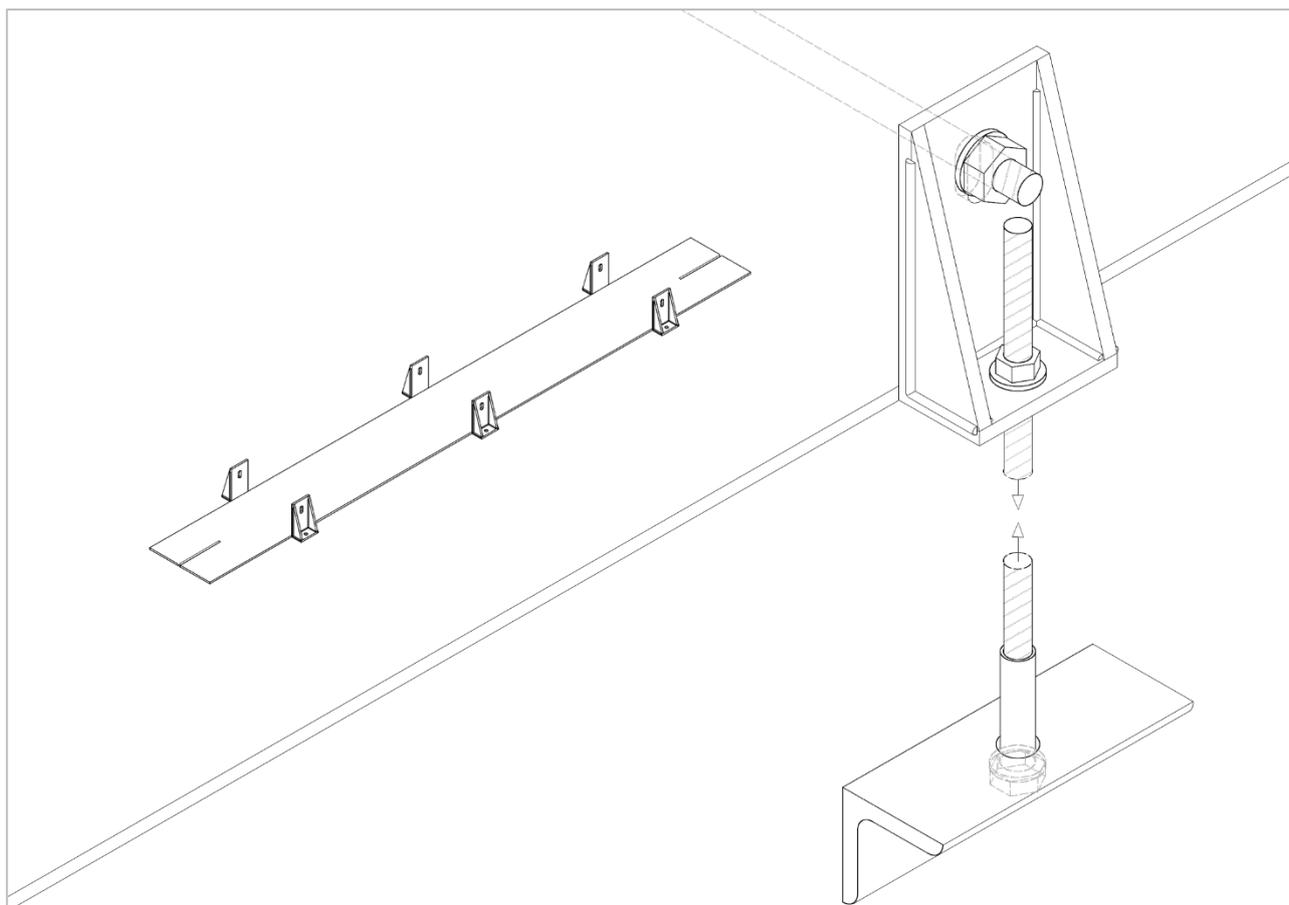


Figura 3-22 Assonometria piastra e dettaglio del funzionamento

## 3.5 COPERTURA

La copertura è uno dei nodi più critici per quanto riguarda la possibilità di aggregazione volumetrica. Le problematiche sono state affrontate rifacendosi a casi tipici del sud Italia.

La circolare ministeriale esplicativa 617/2009 al punto C8A.3 definisce un aggregato edilizio come:

*"costituito da un insieme di parti che sono il risultato di una genesi articolata e non unitaria, dovuta a molteplici fattori (sequenza costruttiva, cambio di materiali, mutate esigenze, avvicinarsi dei proprietari, etc.)."*

Dalle immagini seguenti risulta evidente la logica modulare dell'organismo edilizio storico, che ha subito un processo evolutivo di espansione. L'omogeneità di tecniche, geometrie e materiali evidenzia una rapida aggregazione di cellule base ben distinguibili dall'alto ma celate, a livello strada, da un elemento murario che ripristina l'uniformità a tutto.



Figura 3-23 Veduta dall'alto della città abbandonata di Craco (MT)

Le coperture si basano su una forma piramidale quadrilatera come in una copertura a padiglione dove lo smaltimento delle acque avviene su tutti i lati del poligono di base. La forma di base è geometricamente propensa ad essere, a seguito di aggiunte nei corpi di fabbrica, trasformata in una copertura a capanna. In alcuni edifici infatti le due falde convergono in alto lungo una linea di colmo e l'intersezione delle falde con le pareti di testata avviene secondo linee inclinate che delimitano in alcuni casi un timpano vanno a formare una copertura a padiglione su pianta rettangolare con colmo e gronda a livelli fissi.

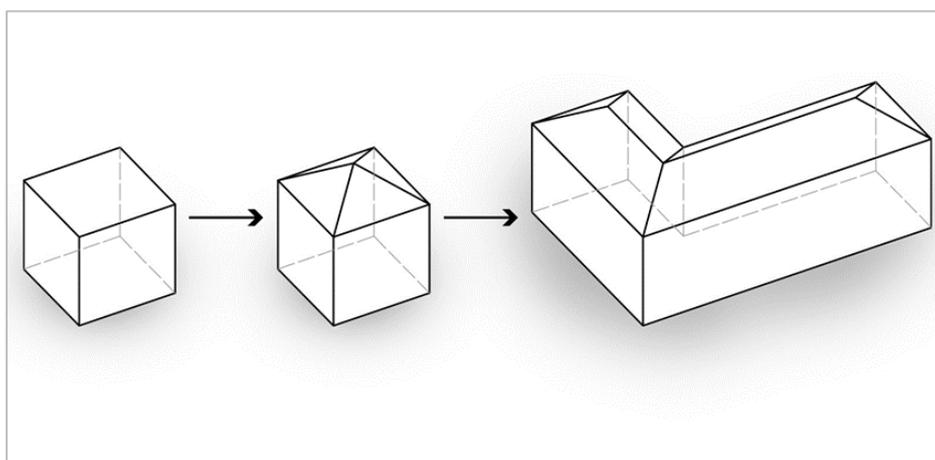


Figura 3-24 Schema concettuale del passaggio da modulo singolo e autonomo ad aggregato.



*Figura 3-25 Coperture nel centro storico di Pisticci (MT)*



*Figura 3-26 Veduta del centro storico di Cagliari dalla terrazza del Bastione Saint Remy*

L'analisi e reinterpretazione di queste immagini, che ben rappresentano processi evolutivi di edifici storici in merito alle riconfigurazioni degli schemi di copertura, ha rappresentato il punto di partenza da cui è partita la definizione di un sistema di copertura modulare ed espandibile, non abitabile e caratterizzato dalla connessione con le intercapedini ventilate perimetrali la cui aria è veicolata sino alla linea di colmo da cui fuoriesce.

La copertura del singolo modulo è a forma di tronco di piramide quadrilatera. In funzione di aggregazione di diversi moduli è consentito lasciare indipendenti gli elementi oppure andare ad unire i colmi e le falde tramite la sostituzione di alcuni componenti (rimozione e aggiunta sono operazioni a secco).

La struttura è composta da morali in legno massello di abete C35 con sezione pari a 8x12 cm (con particolare sagomatura per gli elementi inclinati rispetto le direzioni principali) che si agganciano inferiormente sui pilastri e su blocchi di legno 20x20x20 cm posizionati in mezzeria delle travi di bordo (fissati con l'ausilio di pezzi di profilo a "L" lati disuguali 100x50x5 mm) tramite l'utilizzo dei giunti PITZL.

Superiormente i morali convergono o in un elemento ottagonale il legno lamellare che bilancia e ridistribuisce gli sforzi creando equilibrio o in travi di colmo che congiungono gli ottagoni nel caso di fusione di coperture autonome.

A completamento della struttura principale viene posto:

- perlinato spesso 3, 4 cm;
- guaina impermeabilizzante;
- pannello accoppiato OSB-isolante 11 cm con camera d'aria interna 5 cm (sagomata all'interno del polistirene in tutte e due le direzioni principali);
- guaina traspirante;
- strato esterno in pannelli Rockpanel Xtreme 8 mm.

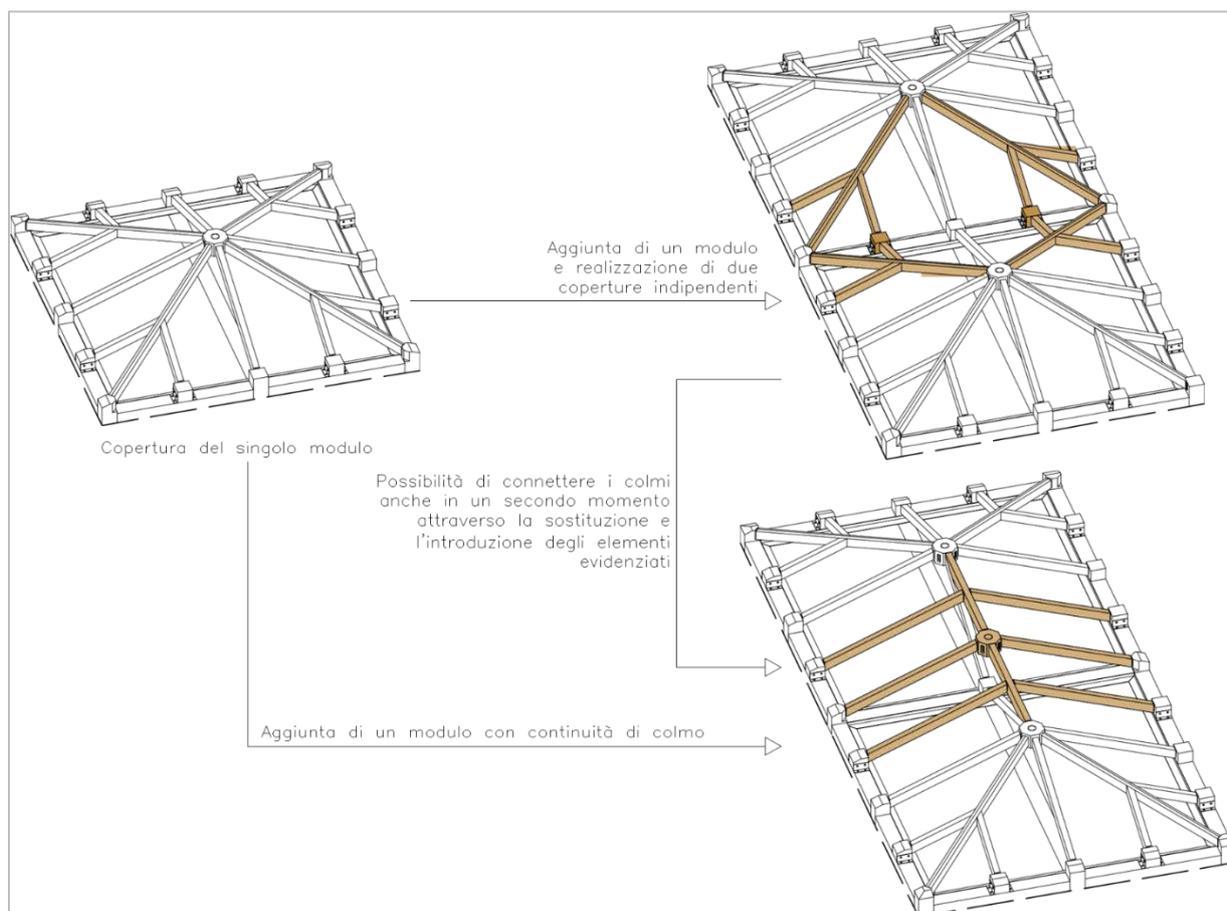


Figura 3-27 Aggregazione dei moduli. Possibili configurazioni di copertura

<sup>1</sup> Davide Prati, Matilde Signorello, e Riccardo Gulli, «SOLUZIONI TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO PRESTAZIONALE DI SOLAI IN LEGNO.» (Colloqui.AT.e 2016: MATER(i)A. Materials, Architecture, Technology, Energy/Environment, Reuse (Interdisciplinary), Adaptability, Roma: Gangemi Editore spa, 2017), 1170.

<sup>2</sup> Alessia Bianco, a c. di, *La «Casa baraccata»: guida al progetto e al cantiere di restauro* (Roma: GB Editoria, 2010).



## 4 CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA

All'interno di questo capitolo verranno raccolte e presentate le riflessioni teoriche, le scelte progettuali, le analisi numeriche e le attività sperimentali che hanno contribuito a definire le caratteristiche principali del sistema strutturale INTEGRO BS 400.

Ad una prima descrizione qualitativa del comportamento strutturale del sistema seguiranno alcune riflessioni in merito alle finiture esterne compatibili col sistema stesso. Il pacchetto di completamento proposto sarà poi utilizzato per effettuare la valutazione delle prestazioni della parete in merito alle caratteristiche termoisolanti e fonoisolanti.

La modularità del sistema verrà poi indagata attraverso un approccio parametrico alla progettazione che sfrutterà le caratteristiche geometriche del singolo modulo per definire la realizzazione di edifici più complessi.

In ultimo, prima di affrontare e descrivere le esperienze di prototipazione svolte, verrà considerata l'effettiva cantierizzazione del sistema. In prima istanza come singolo modulo per poi arrivare ad estrapolare informazioni sull'aggregazione di più moduli.

### 4.1 DESCRIZIONE QUALITATIVA DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE

La post-compressione fornita dalla piastra, ottenuta attraverso il serraggio dei dadi in sommità delle barre filettate, porta all'attivazione di forze d'attrito nelle interfacce tra i corsi, che possono essere di due tipi: laterizio-laterizio, laterizio-legno. (Figura 4-1a) La divisione del tamponamento in tre porzioni fa sì che, in caso di forze taglienti nel piano, non si instauri un unico puntone compresso lungo la diagonale della muratura. Si ottiene così un aumento della capacità dissipativa del sistema e una riduzione della rigidità nel piano, attraverso l'introduzione di piani di scorrimento preferenziali dove si concentreranno spostamenti localizzati, a causa del basso coefficiente d'attrito presente nell'interfaccia laterizio/legno.<sup>1</sup>

Qualitativamente, poiché le forze di tipo attritivo indotte tra legno e laterizio sono molto meno forti di quelle che si instaurano tra due laterizi, in caso di azioni nel piano della parete, sembra lecito considerare il sistema tealio-tamponamento come una mensola reticolare; i campi occupati dai blocchi possono essere ritenuti elementi monolitici a causa del forte attrito a cui sono soggetti e funzionano come dei diagonali compressi mentre i tavolati lignei, coerentemente, ricoprono il ruolo di montanti tesi (Figura 4-1b).

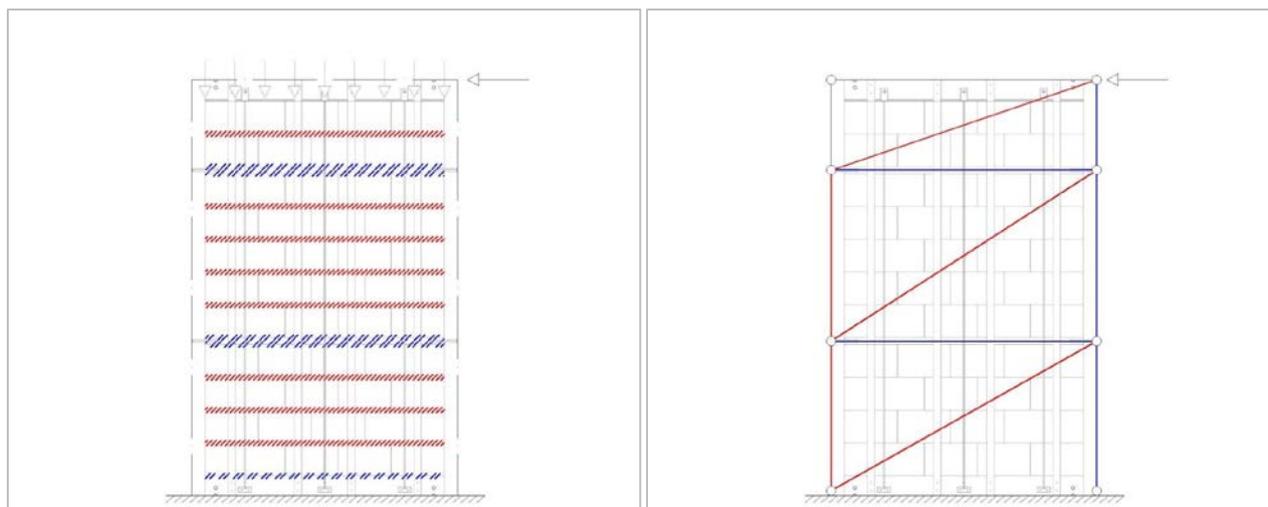


Figura 4-1 a - Forze d'attrito nelle interfacce laterizio/laterizio (rosso) e laterizio/legno (blu). b- Schematizzazione del funzionamento del tamponamento per le forze nel piano.

Si ha quindi una soluzione teoricamente molto valida per contrastare le forze indotte da un evento sismico, già nota da fine settecento<sup>2</sup>, che sfrutta la collaborazione tra telaio ligneo e muratura<sup>3</sup>. Grazie ai piani di scorrimento predeterminati si possono controllare e localizzare le deformazioni, così da poter assimilare ogni singolo campo del telaio ad uno schema statico reticolare che coinvolge tutti gli elementi strutturali (pilastri, tavolati di ripartizione, campi di muratura).

Oltre alle funzioni di ripartizione della post compressione, di strumento per la sicurezza collettiva in fase di realizzazione e di contributo alla resistenza alle forze nel piano della parete, i diversi elementi che costituiscono il singolo tamponamento svolgono un ruolo importante nella definizione delle possibilità architettoniche del sistema in quanto il posizionamento di tali elementi avviene a quote strategiche per la realizzazione delle aperture.

Una volta posati i primi 4 corsi e arrivati a ridosso del tavolato è possibile, sfruttando gli irrigidimenti esterni e introducendo morali temporanei collegati ai pilastri all'interno, continuare l'impilamento creando nei 5 filari successivi aperture di varia larghezza, sfruttando la geometria ridotta dei mezzi blocchi di laterizio; una volta inserito il secondo tavolato si continua la normale posa sino ad arrivare in prossimità della piastra (Figura 4-2).

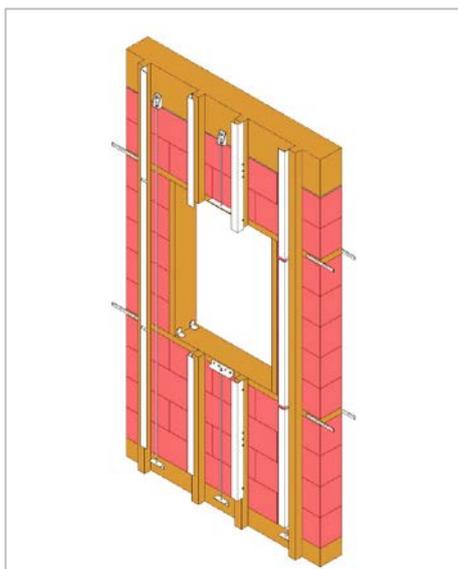


Figura 4-2 Assonometria: cerchiatura delle aperture mediante tavolati lignei

In questi casi si rende necessaria l'interruzione dei tiranti centrali, che avviene ponendo mensole ricavate da profili in acciaio S275 ad "L" 40x40x6 mm sui lati esterni dei tavolati, elementi simili a quelli standard ma divergenti da questi in fatto di lunghezza: si hanno elementi lunghi 20 cm in modo da consentire l'unione al tavolato con 4 viti invece di due, per far sì di scaricare lo sforzo di trazione su un'area maggiore (accorgimento reso necessario dal ridotto spessore dell'elemento in legno). Le aperture così prodotte vanno poi cerchiare mediante tavolati da porre verticalmente e da fissare a quelli orizzontali mediante l'uso di 2 piastre piegate per spigolo.

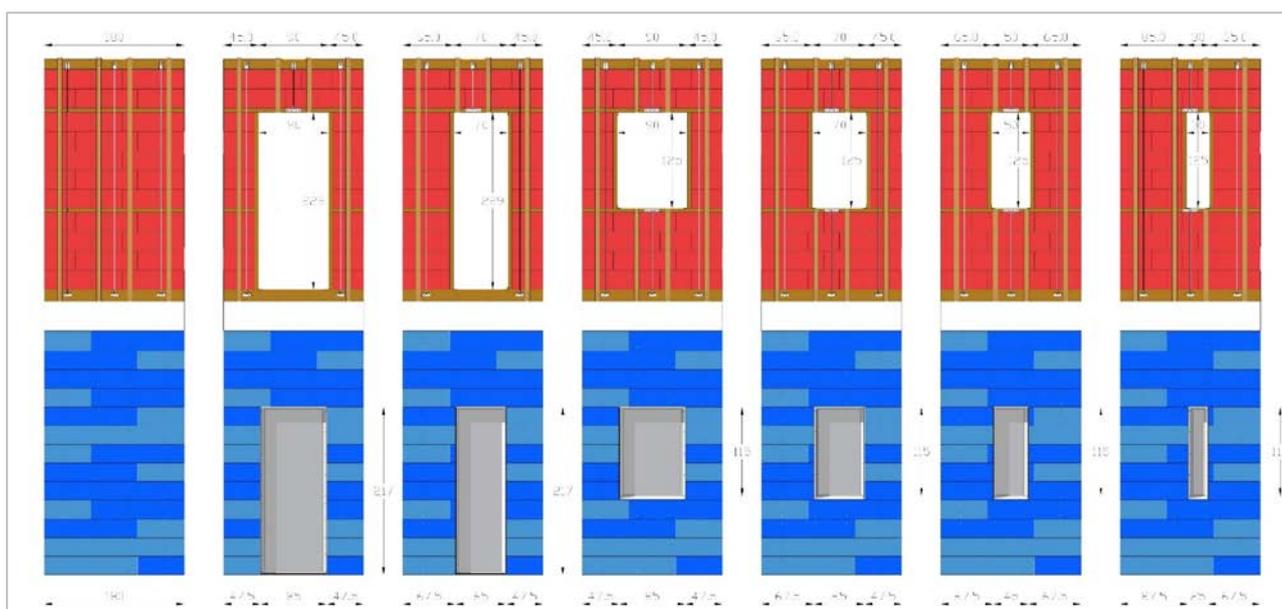


Figura 4-3 Abaco aperture con e senza rivestimento esterno

### 4.1.1 VERIFICA DEL TELAIO LIGNEO

---

Ai fini della valutazione del comportamento strutturale del sistema INTEGRO BS 400, si è scelto di utilizzare un modello che ne riproducesse la geometria e le relative sollecitazioni; i calcoli sono stati risolti mediante il programma software PROSAP Professional della 2.S.I<sup>4</sup>., condotto con il metodo degli stati limite.

L'analisi strutturale viene effettuata dal programma con il metodo degli elementi finiti. Tale metodo si basa sulla schematizzazione della struttura in elementi connessi solo in corrispondenza di un numero prefissato di punti, denominati nodi, definiti dalle tre coordinate cartesiane in un sistema di riferimento globale. Le incognite del problema (nell'ambito del metodo degli spostamenti) sono le componenti di spostamento dei nodi riferite al sistema di riferimento globale (traslazioni secondo X, Y, Z, rotazioni attorno X, Y, Z). La soluzione del problema si ottiene con un sistema di equazioni algebriche lineari i cui termini noti sono costituiti dai carichi agenti sulla struttura opportunamente concentrati ai nodi:

$$K * u = F$$

dove

K = matrice di rigidità

u = vettore spostamenti nodali

F = vettore forze nodali

Dagli spostamenti ottenuti con la risoluzione del sistema vengono quindi dedotte le sollecitazioni e/o le tensioni di ogni elemento, riferite generalmente ad una terna locale all'elemento stesso.

#### *4.1.1.1 MODELLAZIONE DELLA GEOMETRIA E VINCOLI*

Gli elementi utilizzati per la modellazione dello schema statico della struttura in esame sono elementi tipo asta, dotati di 3 gradi di libertà per ogni nodo, elementi tipo trave, dotati di 6 gradi di libertà per ogni nodo, ed elementi tipo solaio, ovvero macroelementi con lo scopo principale di assegnare i carichi degli orizzontamenti alla struttura.

Per simulare il vincolo della struttura in elevazione alle fondazioni sono state bloccate le traslazioni e le rotazioni dei nodi alla base dei pilastri. Le strutture di fondazione sono da valutarsi

separatamente caso per caso, in base alle caratteristiche del sito di installazione del modulo, applicando agli elementi le sollecitazioni trasmesse dalla sovrastruttura.

Per simulare i collegamenti dei travetti alle travi e delle travi ai pilastri, sono state sbloccate alcune rotazioni, così da realizzare vincoli tipo cerniera, in linea con i sistemi di connessione che si intende utilizzare. Salvo diversa specifica, tutti i vincoli interni hanno carattere di continuità in tutti gli elementi.

#### 4.1.1.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E MODELLAZIONE DELLE SEZIONI

I materiali assegnati ai vari elementi utilizzati nella modellazione sono legno lamellare GL28H per pilastri, travi di bordo, travi di spina e travetti e legno massello di tipo C24 per i ripartitori. Per quanto riguarda la modellazione delle sezioni, sono state assegnate sezioni rettangolari 20x20cm per i pilastri, 20x30cm per le travi di bordo, 20x25cm per le travi di spina, 8x12cm per i travetti e 20x5cm per i ripartitori, in accordo con la definizione progettuale degli elementi delineata in precedenza.

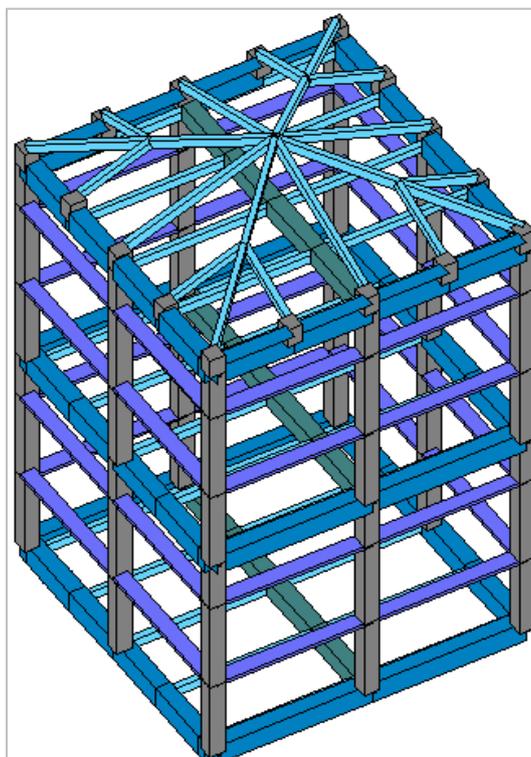


Figura 4-4 Vista del modello della struttura

#### 4.1.1.3 ASSEGNAZIONE DEI CARICHI

Ai fini della valutazione delle azioni variabili in copertura e delle sollecitazioni sismiche, si ipotizza la costruzione del sistema a Bologna, assumendo i relativi parametri di riferimento, in accordo con le NTC 2008.

Si considerano dunque agenti i pesi propri, i carichi permanenti dati dai pacchetti previsti per le finiture ed i carichi accidentali relativi alla destinazione d'uso, di tipo residenziale per entrambi i piani. Si assume agente in copertura il carico neve calcolato per la zona e l'altitudine di riferimento, valutato tramite:

$$q_s = \mu_i \times q_{sk} \times C_e \times C_t$$

con:

$\mu_i = 0,8$  coefficiente di forma, fornito in normativa sulla base dell'inclinazione delle falde;

$q_{sk} = 1,50 \text{ kN/m}^2$  valore caratteristico del carico neve al suolo;

$C_e = 1$  coefficiente di esposizione, tabellato in funzione delle diverse classi di topografia;

$C_t = 1$  coefficiente termico, utilizzato in caso di scioglimento per perdita di calore.

Si ha dunque:

$$q_s = 0,8 \times 1,50 \times 1 \times 1 = 1,20 \text{ kN/m}^2$$

Si riportano di seguito le tabelle relative ai carichi considerati - pesi propri, permanenti, accidentali - secondo le indicazioni sopra riportate.

Per quanto riguarda la copertura si ottiene:

<b>SOLAIO COPERTURA</b>		
<b>peso proprio</b>		
Perline di abete 34mm (600kg/mc)	20	kg/m <sup>2</sup>
<b>permanente non strutturale</b>		
Pannelli Rockpanel Colours Durable 6mm (1050kg/mc)	7	kg/m <sup>2</sup>
Pannello accoppiato LAMBDA POR+OBS (10+1)	8	kg/m <sup>2</sup>
<b>sovraccarico variabile</b>		
neve Bologna	120	kg/m <sup>2</sup>
<b>TOTALE q<sub>cop</sub> =</b>		<b>155 kg/m<sup>2</sup></b>

Tabella 4-1 Carichi del solaio di copertura

Per quanto riguarda il solaio sottotetto, che viene considerato accessibile solo per manutenzione, si ottiene:

<b>SOLAIO SOTTOTETTO</b>		
<b>peso proprio</b>		
Pannello sandwich	40	kg/m <sup>2</sup>
<b>permanente non strutturale</b>		
Lastre gessofibra FERMACELL 20mm	23	kg/m <sup>2</sup>
Anticalpestio MAPESILENT ROLL 10mm	0	kg/m <sup>2</sup>
Polistirene XPS FLOORMATE 300-A 30mm	10	kg/m <sup>2</sup>
Lastre nido d'ape FERMACELL 30mm	45	kg/m <sup>2</sup>
<b>sovraccarico variabile</b>		
Accessibile per sola manutenzione	50	kg/m <sup>2</sup>
<b>TOTALE q<sub>sol</sub> =</b>		<b>168 kg/m<sup>2</sup></b>

Tabella 4-2 Carichi del solaio sottotetto

Per quanto riguarda il solaio interpiano, considerando un sovraccarico per civile abitazione, si ottiene:

<b>SOLAIO INTERPIANO</b>		
<b>peso proprio</b>		
Pannello sandwich	40	kg/m <sup>2</sup>
<b>permanente non strutturale</b>		
Pavimentazione legno 8mm	5	kg/m <sup>2</sup>
Isoldrum N sottopavimento 2mm	0	kg/m <sup>2</sup>
Film scaldante Accona 1mm	0	kg/m <sup>2</sup>
Isoldrum Silver termoriflettente 3mm	0	kg/m <sup>2</sup>
Lastre gessofibra FERMACELL 20mm	23	kg/m <sup>2</sup>
Anticalpestio MAPESILENT ROLL 10mm	0	kg/m <sup>2</sup>
Polistirene XPS FLOORMATE 300-A 30mm	10	kg/m <sup>2</sup>
Lastre nido d'ape FERMACELL 30mm	45	kg/m <sup>2</sup>
tramezzi (assunto minore per configurazione interna)	40	kg/m <sup>2</sup>
<b>sovraccarico variabile</b>		
Civile abitazione	200	kg/m <sup>2</sup>
<b>TOTALE q<sub>sol</sub> =</b>		<b>363 kg/m<sup>2</sup></b>

Tabella 4-3 Carichi del solaio interpiano

Infine, per quanto riguarda il sistema di tamponamento collaborante, considerando anche il peso del sistema di post compressione in acciaio, si ottiene:

TAMPONAMENTO		
<b>peso proprio</b>		
Blocchi Porotherm PLANA+ 20-0,08	160	kg/m <sup>2</sup>
Tavolati lignei 50x200mm	6	kg/m <sup>2</sup>
Piatto in acciaio S275 (7850 kg/mc)	4	kg/m <sup>2</sup>
<b>permanente non strutturale</b>		
Irrigidimenti lignei 60x60mm	10	kg/m <sup>2</sup>
Struttura esterna alluminio 60x60x2mm (2650kg/mc)	1,4	kg/m <sup>2</sup>
Struttura interna alluminio 60x60x2mm (2650kg/mc)	1,4	kg/m <sup>2</sup>
Isolante Betonwood Bitum Fiber 40mm* (240kg/mc)	10	kg/m <sup>2</sup>
Pannelli Rockpanel Colours Durable 6mm (1050kg/mc)	7	kg/m <sup>2</sup>
Lastre gessofibra Fermacell 10mm	12	kg/m <sup>2</sup>
<b>TOTALE q<sub>tam</sub> =</b>	<b>212</b>	<b>kg/m<sup>2</sup></b>

Tabella 4-4 Carichi del tamponamento collaborante

Nel modello di calcolo i carichi permanenti e variabili sono stati assegnati attraverso gli elementi solaio, nelle tre tipologie presenti di interpiano, sottotetto e copertura.

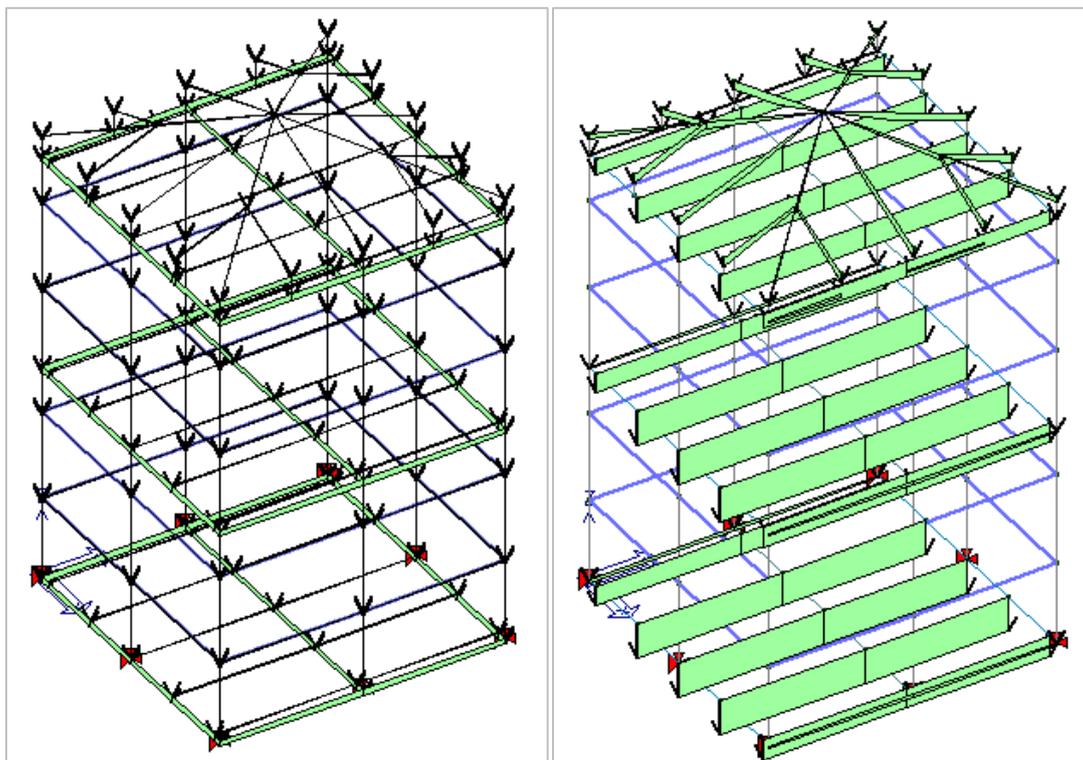


Figura 4-5 A sinistra - peso proprio della struttura / A destra - carico permanente solai-coperture

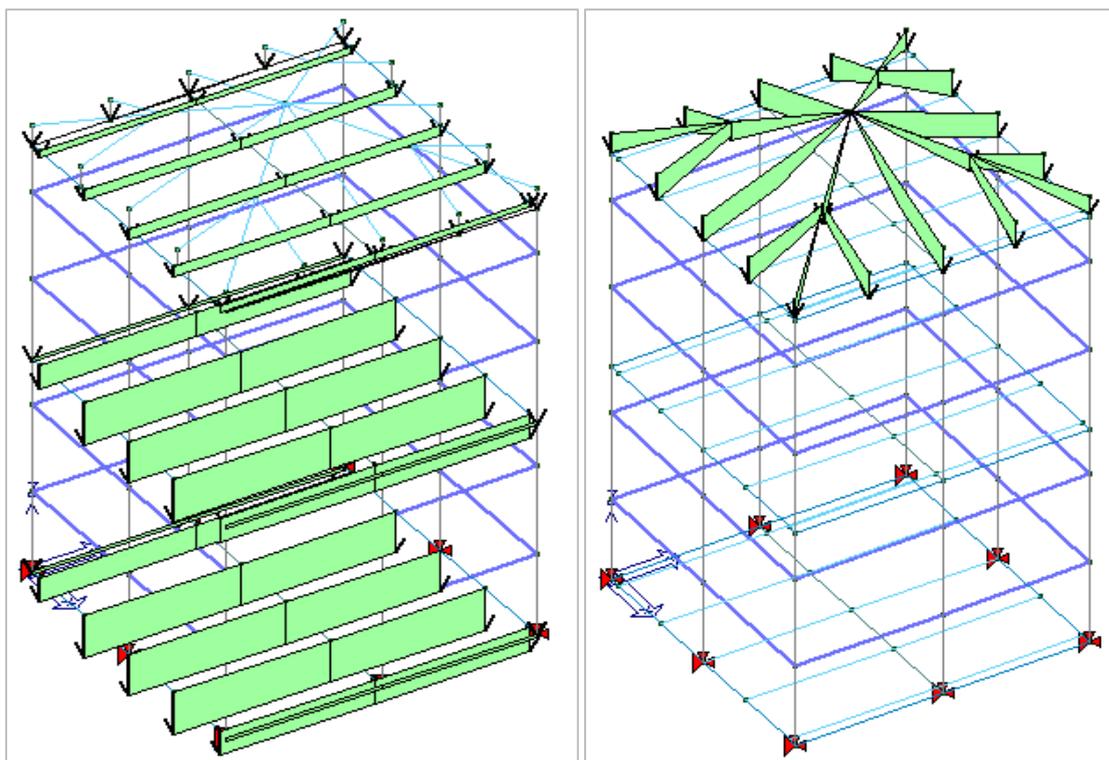


Figura 4-6 A sinistra - carico variabile solai / A destra - carico variabile neve

Le travi di bordo sono state caricate con carichi di tipo lineare corrispondenti al peso del tamponamento e del pacchetto di finitura interno ed esterno.

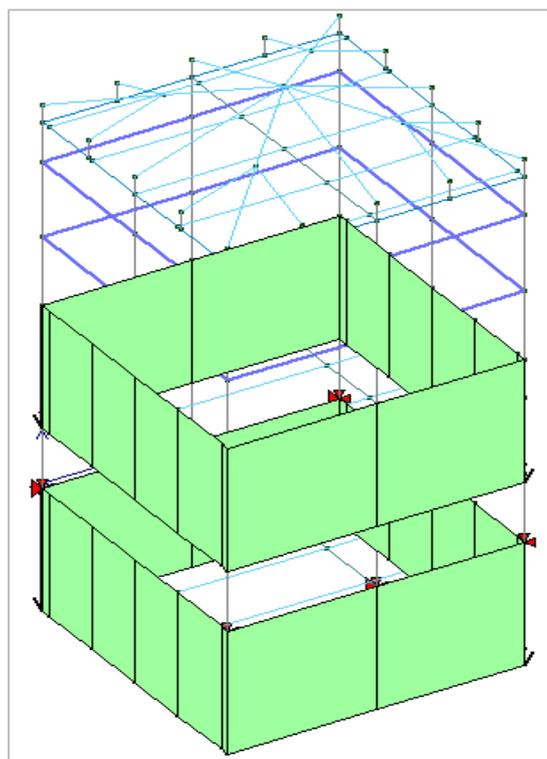


Figura 4-7 Carico permanente muri

#### 4.1.1.4 AZIONE SISMICA

L'azione sismica di progetto sarà di tipo orizzontale, proporzionale alle masse. Per la sua definizione, in accordo con le NTC 2008, si valuta l'effetto della risposta sismica locale (RSL) mediante un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento e sulle condizioni topografiche. Per RSL si intende l'azione sismica quale emerge in “superficie” a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, subite trasmettendosi dal substrato rigido al sito in analisi.

La rappresentazione di riferimento per le componenti dell'azione sismica è lo spettro di risposta elastico, un diagramma che fornisce, al variare del periodo  $T$  – inverso della frequenza –, il valore massimo della risposta (ampiezza del moto) di un sistema (terreno o struttura) soggetto all'azione del sisma, per un fissato valore del rapporto di smorzamento, che è una caratteristica fisica della struttura o del terreno. L'effetto combinato dell'ampiezza dell'accelerazione, del contenuto di frequenze della oscillazione sismica e della durata può essere descritto attraverso lo spettro, che consente dunque di determinare su quali frequenze di vibrazione la sollecitazione sulle strutture risulta massima e sono possibili fenomeni di risonanza, che potrebbero implicarne il collasso.

Il bilancio fra resistenza e capacità dissipativa (duttilità) del sistema strutturale avviene mediante il “fattore di struttura  $q$ ”, che riduce le ordinate dello spettro di risposta elastico, dando luogo allo spettro di progetto. Il fattore di struttura dipende dal livello di duttilità atteso (classe di duttilità), dalla tipologia strutturale e dal rapporto  $\alpha_u / \alpha_1$ , che sintetizza le risorse di plasticizzazione della struttura.

I parametri assunti per la definizione dell'azione sismica sono:

- Vita nominale della costruzione:  $V_N > 50$  anni
- Classe d'uso: II (edifici ordinari), ne segue che il coefficiente  $C_U = 1,0$
- Periodo di riferimento per l'azione sismica =  $V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1,0 = 50$  anni
- Localizzazione del sito: Bologna, Emilia Romagna
- Longitudine: 11.3400 E
- Latitudine: 44.4980 N
- Altezza s.l.m.m. = 50 m
- Categoria di sottosuolo: C: “*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m*”
- Categoria topografica: T1: “*Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$* ”

I parametri per la determinazione del fattore di struttura sono:

- Regolarità in pianta: regolare in pianta (quindi  $\alpha/\alpha_1 = 1,0$ )
- Regolarità in altezza: regolare in altezza (quindi  $KR = 1,0$ )
- Tipologia strutturale: Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (quindi  $q_0 = 2,5$ )
- Fattore di struttura:  $q = q_0 \times KR = 2,5 \times 1 \times 1 = 2,5$

A favore di sicurezza si assume come fattore di struttura  $q = 2,0$ .

#### 4.1.1.5 SOLLECITAZIONI E SPOSTAMENTI

Il programma combina i diversi tipi di carico secondo le regole previste dalla normativa vigente. Le combinazioni previste sono di tipo SLU, SLE, e di tipo sismico, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E valutata dal programma stesso a partire dai parametri illustrati. Le combinazioni sono destinate al controllo di sicurezza della struttura ed alla verifica degli spostamenti e delle sollecitazioni.

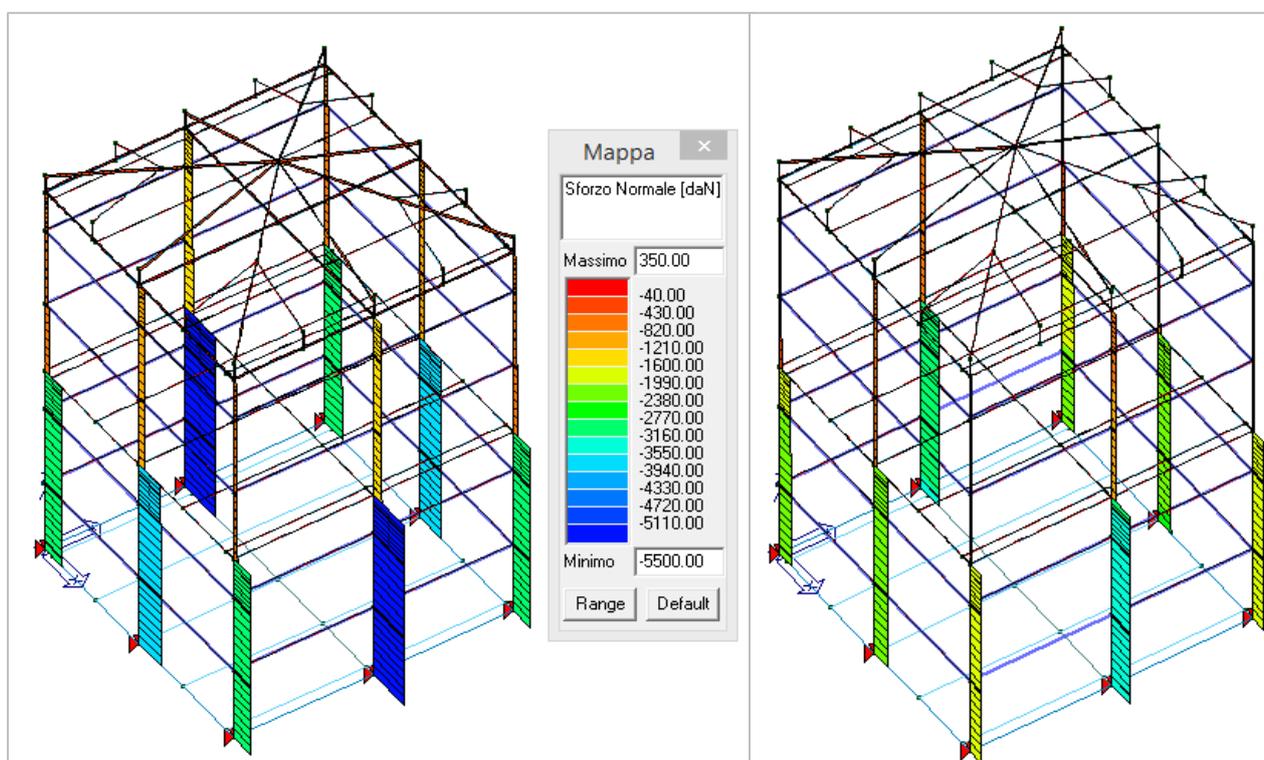


Figura 4-8 Sforzo normale massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica

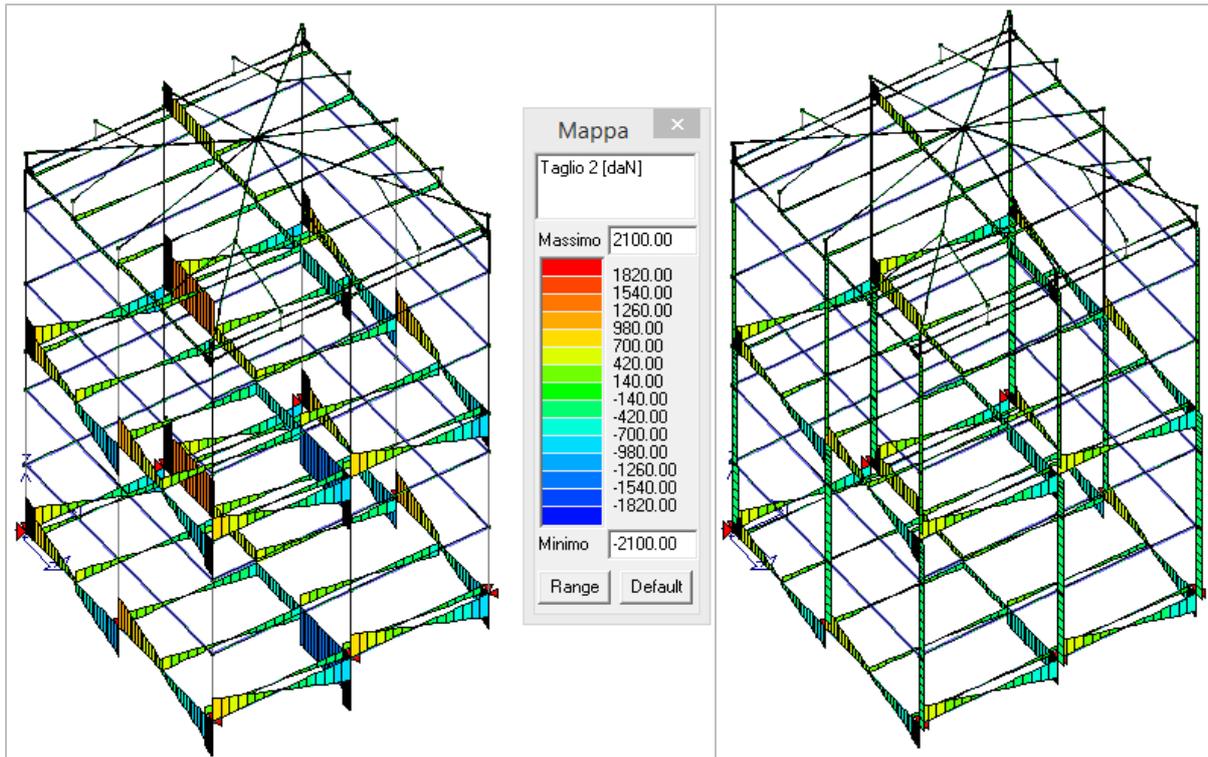


Figura 4-9 Taglio massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica

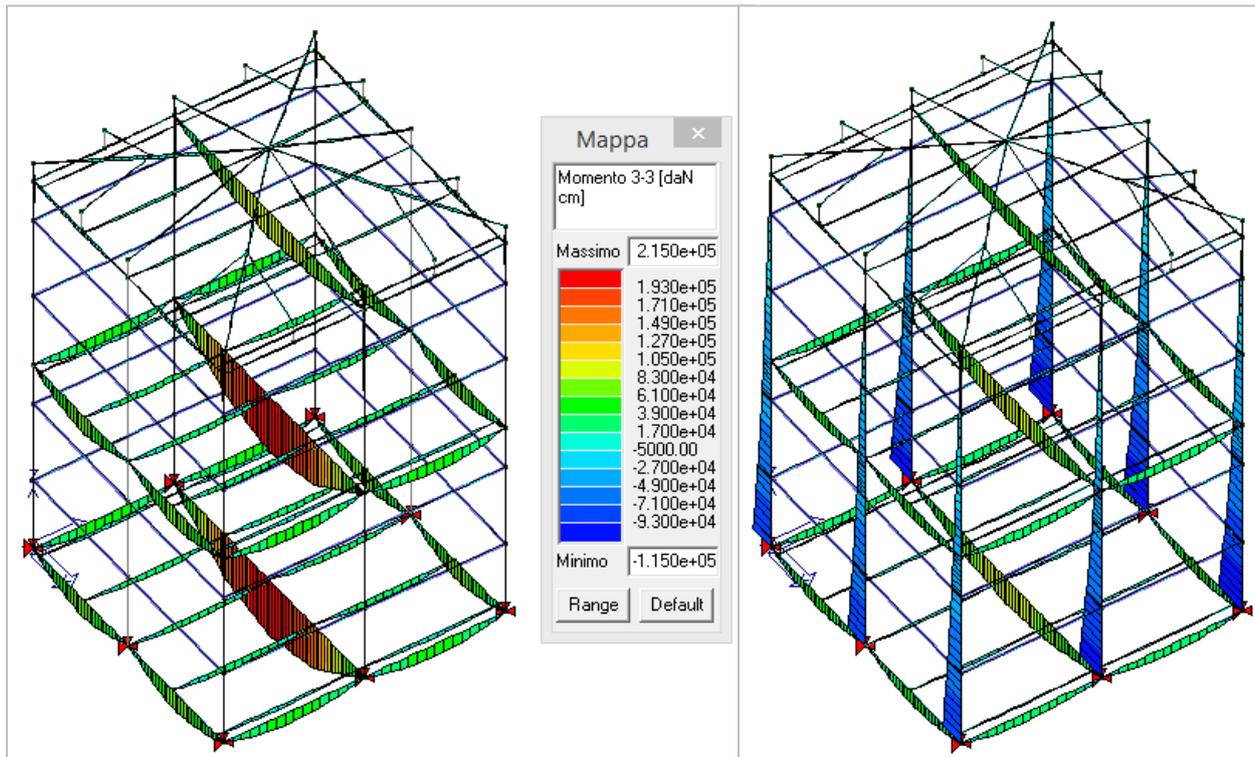


Figura 4-10 Momento massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica

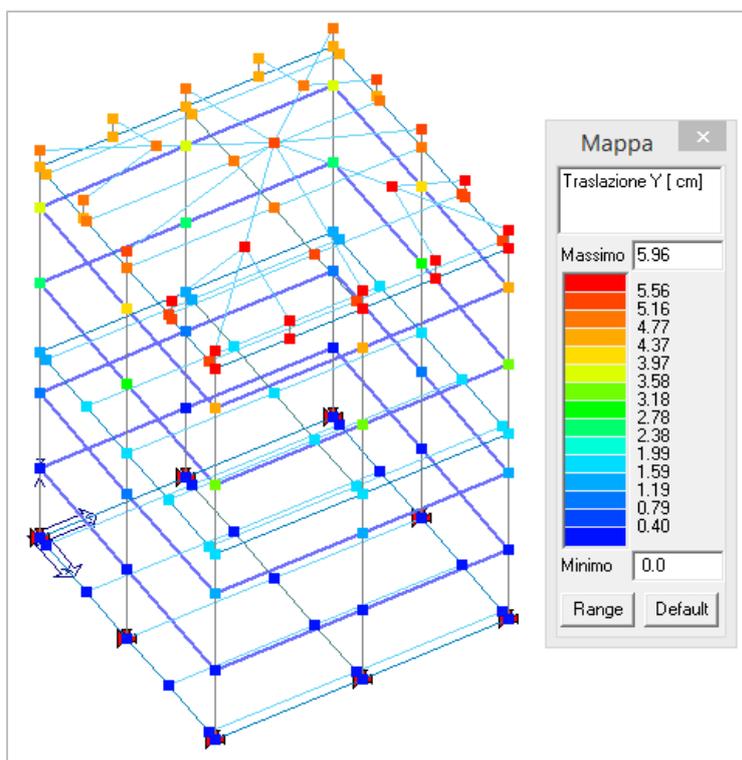


Figura 4-11 Spostamenti massimi in combinazione SLD sismica

#### 4.1.1.6 VALUTAZIONI SULLE VERIFICHE

Le verifiche degli elementi sono condotte in ottemperanza alle NTC 2008, seguendo le indicazioni analitiche riportate nella norma tecnica UNI EN 1995-1-1:2005 “Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici”. Le verifiche sono espresse dal rapporto tra domanda e capacità, affinché la verifica sia positiva il rapporto deve essere inferiore o uguale a 1. La capacità è affetta dal termine  $k_{mod}$ , espressione della classe di servizio dell’elemento e della durata dei carichi applicati.

Si riporta la sintesi dei risultati ottenuti in termini di sfruttamento degli elementi strutturali, espresso in percentuale come il maggiore dei tre rapporti tra le tensioni ideali massime e quelle ammissibili (Figura 4-12).

Con la configurazione del modello di calcolo adottata è stato possibile valutare il comportamento strutturale del telaio ligneo in condizioni statiche e sismiche, ipotizzandone la costruzione in una zona pianeggiante di Bologna. Le sezioni adottate sono tutte verificate, con una percentuale massima di sfruttamento che si attesta sull’85% per i travetti del solaio interpiano. Le travi di spina sono sfruttate nell’ordine del 70%, i pilastri alla base intorno al 65%, mentre per i restanti elementi si hanno percentuali di sfruttamento inferiori.

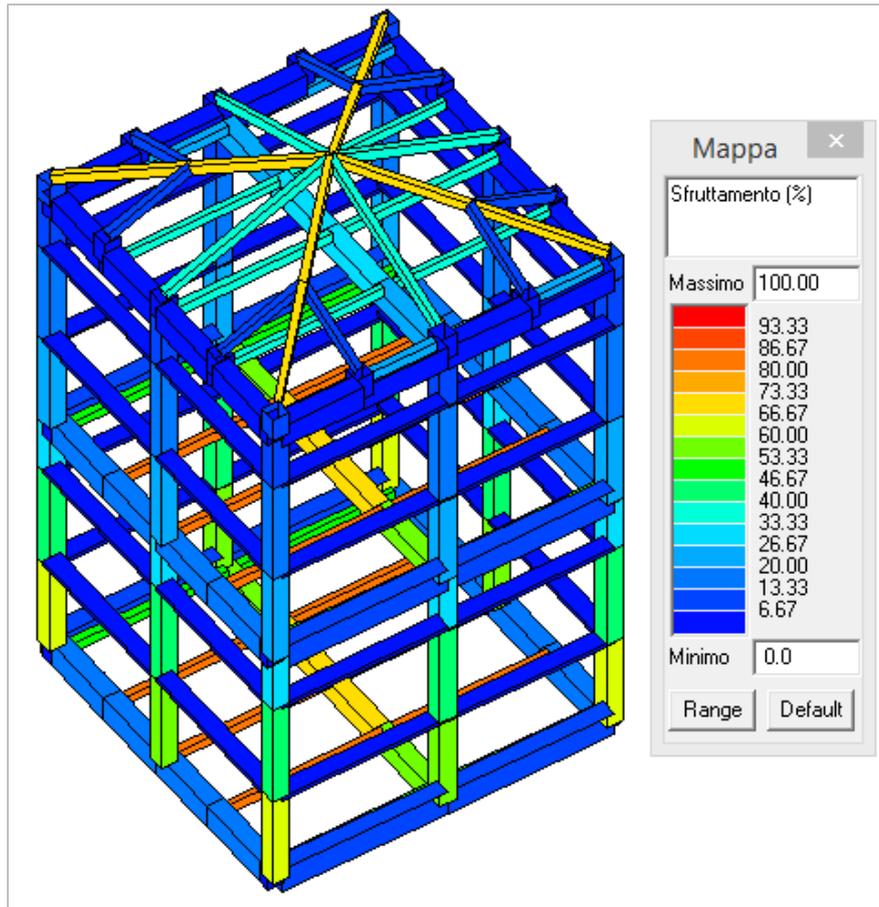


Figura 4-12 Percentuale di sfruttamento degli elementi

Le deformazioni della struttura sotto l'azione orizzontale del sisma calcolate dal programma sono però eccessive, rapportate alle massime consentite da NTC 2008. Secondo il par. 7.3.7, nel caso di costruzioni civili e industriali, gli spostamenti interpiano ottenuti dall'analisi in presenza dell'azione sismica di progetto relativa allo stato limite di danno SLD, per tamponamenti collegati rigidamente alla struttura che interferiscono con la deformabilità della stessa, devono essere inferiori a:

$$d_r < 0,005 h$$

dove:

- $d_r$  = spostamento interpiano, ovvero la differenza tra gli spostamenti al solaio superiore ed inferiore;
- $h$  = l'altezza del piano.

Nel modello in esame gli spostamenti massimi allo SLD si attestano su 1,5 cm per i nodi a livello del primo solaio e 6 cm per i nodi a livello del coperto. Di conseguenza lo spostamento interpiano risulta circa 4,5 cm, pari a 0,0143h, non conforme a quanto richiesto.

Si vuole dunque introdurre il contributo degli elementi di tamponamento collaborante, che nello schema adottato sono presenti solamente in termini di carico trasmesso alle travi sottostanti.

#### 4.1.2 SISTEMA DI TAMPONAMENTO COLLABORANTE

---

Il tamponamento adottato è costituito da blocchi in laterizio assemblati a secco e solidarizzati alla struttura intelaiata attraverso l'ausilio di tiranti metallici.

La ricerca di riferimenti all'interno della letteratura scientifica riguardante le murature, con specifica attenzione verso le caratteristiche meccaniche ed i criteri di verifica dei sistemi assemblati a secco, ha fornito scarsi risultati. Lo scarso interesse e la scarsa conoscenza di questo tipo di sistemi è evidenziata dall'assenza di normative specifiche.<sup>5</sup>

Considerato il carattere innovativo del sistema, la definizione del suo comportamento e la sua risposta alle sollecitazioni sono dunque possibili solamente a livello qualitativo, sulla base dell'esperienza costruttiva acquisita durante la prototipazione in scala.

Sulla scorta dei dati disponibili, risulta evidente un contributo irrigidente dei blocchi in laterizio nei confronti del telaio ligneo, a patto che ne sia garantito il comportamento monolitico. Questo tipo di comportamento, usualmente assicurato dalla presenza dei letti di malta, è qui affidato al sistema di tiranti in acciaio. Per quantificarne il contributo si è scelto di procedere determinando lo sforzo necessario ad impedire scorrimenti tra gli elementi, in modo da scongiurare l'innescarsi di possibili modi di danno per effetto di forze orizzontali.

##### *4.1.2.1 DETERMINAZIONE DELLO SFORZO DI POSTCOMPRESSIONE*

Uno dei meccanismi di danno più gravosi, che si verifica in presenza di sollecitazioni simiche orizzontali, è quello del collasso della parete per fuoriuscita dal suo piano. La struttura in esame trova risorse per resistere all'innescarsi di tale meccanismo attraverso la solidarizzazione tra tamponamento e telaio ligneo, raggiunta con l'applicazione alla muratura a secco dello sforzo di postcompressione esplicito dai tiranti. Sono inoltre presenti i listelli 6x6 cm, internamente ed esternamente, lungo tutto lo sviluppo verticale delle pareti per consentire il fissaggio degli elementi di finitura, che svolgono anche la funzione di parziale contenimento dei blocchi del tamponamento.

Per effettuare una stima dell'entità della trazione da impartire al sistema di tiranti e dimensionarne la sezione resistente, è necessario dunque determinare l'effetto dell'azione sismica agente sul tamponamento collaborante. Si vuole infatti che le forze d'attrito che si innescano sotto la sollecitazione orizzontale del sisma, all'interfaccia tra i blocchi e gli elementi in legno e tra i blocchi stessi, siano sufficienti a non permetterne lo scorrimento relativo. Lo sforzo di postcompressione impartito alla muratura attraverso il sistema di tiranti, consente l'attivarsi di tali forze, nella misura sufficiente a contrastare la spinta orizzontale, scongiurando possibili fenomeni di uscita dal piano.

Per la determinazione dell'azione sismica si considera un sistema di forze proporzionali alla massa del tamponamento, la cui risultante  $F_a$  agente sul baricentro, viene calcolata secondo le formule proposte nel par. 7.2.3 delle NTC 2008:

$$F_a = S_a \times W_a / q_a$$

dove:

- $F_a$  = forza sismica orizzontale agente al centro di massa dell'elemento nella direzione più sfavorevole;
- $W_a$  = peso dell'elemento;
- $S_a$  = accelerazione massima adimensionalizzata;
- $q_a$  = fattore di struttura, assunto da tabella 7.2.I NTC 2008, pari a 2 per pareti interne ed esterne.

L'accelerazione massima adimensionalizzata dell'elemento viene valutata come segue:

$$S_a = \alpha S \left[ \frac{3 \cdot (1 + Z/H)}{1 + (1 - T_a/T_1)^2} - 0,5 \right]$$

dove:

- $\alpha = a_g/g$  rapporto tra  $a_g$  accelerazione massima del terreno su sottosuolo di tipo A allo SLU e  $g$  accelerazione di gravità;
- $S = S_s \cdot S_T$  coefficiente di amplificazione sismica locale, che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche;
- $Z$  = quota del baricentro dell'elemento misurata a partire dal piano di fondazione;
- $H$  = altezza della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione;
- $T_a$  = periodo fondamentale di vibrazione dell'elemento;
- $T_1 = c_1 H^{3/4}$  = periodo fondamentale di vibrazione della costruzione

Con  $c_1 = 0,050$  (assunto da par. 7.3.3.2 NTC 2008) e  $H$  altezza della costruzione, in metri, dal piano di fondazione.

Per la valutazione del primo periodo approssimato di vibrazione dell'elemento nella direzione considerata  $T_a$ , si fa riferimento al periodo proprio di un sistema ad un grado di libertà, schematizzando il comportamento del tamponamento come quello di una trave semplicemente appoggiata con massa distribuita. Si assume infatti che, una volta impresso lo sforzo di postcompressione necessario a scongiurare mutui scorrimenti tra gli elementi, sia lecito considerare la muratura costruita in aderenza con il telaio ligneo, e dunque vincolata alle travi inferiore e superiore.

Si determina quindi  $T_a$  secondo la formula:

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{5 m h^3}{384 E J}}$$

dove:

- $m$  = peso dell'elemento in kg / accelerazione di gravità  $g$ ;
- $h$  = altezza del tamponamento, ossia la luce tra i due appoggi;
- $E$  = modulo elastico a compressione della muratura considerata;
- $J$  = momento d'inerzia della sezione rettangolare della parete reagente, calcolato come  $J = l t^3 / 12$  con  $l$  lunghezza e  $t$  spessore della parete in esame.

Il valore del coefficiente sismico  $S_a$  non può comunque essere assunto minore di  $\alpha S$ .

Si effettua il calcolo per un intero pannello murario al piano primo, si considera:

$$l = 1,80 \text{ m} \quad t = 0,20 \text{ m} \quad h = 2,85 \text{ m}$$

$$m = 800 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,20 \text{ m} \cdot 1,80 \text{ m} \cdot 2,85 \text{ m} = 821 \text{ kg}$$

$$E = 5000 \text{ N/mm}^2 = 5 \cdot 10^8 \text{ kg/m}^2$$

$$J = 1,8 \cdot 0,2^3 / 12 = 0,0012 \text{ m}^4$$

Il periodo fondamentale di vibrazione dell'elemento vale quindi:

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{5 \cdot 821 / 9,81 \cdot 2,85^3}{384 \cdot 5 \cdot 10^8 \cdot 0,0012}} = 0,041 \text{ s}$$

Il coefficiente sismico  $S_a$ , calcolato secondo i parametri per la definizione dell'azione sismica già citati:

$$S_a = 0,167 \cdot 1,5 \left[ \frac{3 \cdot (1 + 4,88/7,6)}{1 + (1 - 0,04/0,229)^2} - 0,5 \right] = 0,61$$

La risultante dell'azione sismica da applicare al pannello vale quindi:

$$F_a = 0,61 \cdot 821/2 = 250 \text{ kg}$$

Affinché non vi sia scorrimento relativo tra i blocchi e gli elementi lignei e tra i blocchi stessi, occorre che l'azione instabilizzante del sisma sia adeguatamente contrastata dall'azione stabilizzante delle forze d'attrito innescate. Imponendo:

$$\begin{aligned} F_{\text{inst}} &= F_{\text{stab}} \\ F_a &= F_{\text{att}} = N_{\text{post}} \cdot k_{\text{attrito}} \end{aligned}$$

Il coefficiente d'attrito minore presente nel sistema in esame è quello tra il laterizio e gli elementi in legno, assunto con il suo valore medio pari a 0,5. Si ha dunque:

$$N_{\text{post}} = F_a / k_{\text{attrito}} = 250/0,5 = 500 \text{ kg}$$

Lo sforzo di postcompressione da imprimere al tamponamento risulta quindi pari a 500 kg, che ripartito per i 6 tiranti presenti equivale ad un tensionamento di circa 85 kg per ogni elemento.

#### 4.1.2.2 VERIFICA ALL'AZIONE FUORI PIANO

La risposta alle azioni fuori piano di un tamponamento costruito in aderenza con il telaio può essere ben interpretata considerando "l'effetto arco", che si sviluppa nello spessore del tamponamento in presenza di travi del telaio in grado di resistere alla spinta generatasi e, allo stesso tempo, in presenza di una connessione trave-tamponamento capace di impedire movimenti fuori piano di quest'ultimo.

Si formano, in sostanza, tre cerniere, una in mezzeria e le altre in prossimità delle travi, che permettono la formazione di uno schema isostatico di arco a tre cerniere. Questo schema può diventare labile se le tre cerniere si allineano, divenendo così un cinematismo, oppure può accadere che si raggiunga la crisi a compressione della muratura conducendo alla plasticizzazione delle tre cerniere.<sup>6</sup>

Nel caso in esame si intende raggiungere questo tipo di comportamento mediante la postcompressione impressa; è lecito pensare che il sistema di tiranti, una volta impartito il tensionamento calcolato in precedenza, sia in grado di garantire aderenza e connessione agli elementi che costituiscono il sistema. Tale ipotesi trova ulteriore fondamento nello schema di funzionamento dell'arco stesso, in grado di resistere ad elevati carichi grazie allo sforzo di compressione che si attiva tra i conci.

La trattazione del comportamento "ad arco" e la relativa formula di verifica della resistenza viene fornita al par. 6.3.2 dell'Eurocodice 6:

$$q_{lat} = f_d (t/h)^2$$

dove:

- $q_{lat}$  = resistenza laterale di progetto per unità di area di muro;
- $f_d$  = resistenza a compressione di progetto della muratura nella direzione della spinta dell'arco;
- $t$  = spessore del muro;
- $h$  = lunghezza (altezza del muro) tra gli appoggi, in grado di resistere alla spinta dell'arco.

La resistenza a compressione caratteristica dichiarata per i blocchi Porotherm PLANA+20-0,08 è pari a  $10 \text{ N/mm}^2$ ; per ottenere la resistenza a compressione di progetto, si divide per il coefficiente di sicurezza  $\gamma_M$ , tabulato in NTC2008 tab. 4.5.II in funzione del tipo di malta. Trattandosi di un sistema di muratura a secco si assume, a favore di sicurezza,  $\gamma_M = 3$ , valido per ogni tipo di malta.

$$q_{lat} = 100/3 \cdot (20/285)^2 = 0,16 \text{ kg/cm}^2$$

Una volta formalizzato il comportamento ad arco della muratura, risulta immediato verificare che la resistenza laterale di progetto  $q_{lat}$  risulti maggiore della forza agente distribuita sulla superficie del muro:

$$q_{sis} = F_a/(l \cdot h) = 250/(180 \cdot 285) = 0,005 \text{ kg/cm}^2$$

La disuguaglianza  $q_{lat} \geq q_{sis}$  risulta ampiamente verificata.

### 4.1.3 VERIFICA DEL TELAIO CON BIELLE COMPRESSE IN MURATURA

Una volta indagato il comportamento monolitico del sistema e verificata la resistenza alle azioni fuori piano, si procede alla valutazione del suo contributo all'interno del modello di calcolo.

In linea con la schematizzazione del sistema telaio-tamponamento come “*mensola reticolare*”, si è scelto di modellare i campi di muratura traducendone il comportamento controventante attraverso delle “*aste compresse*” diagonali intervallate dai ripartitori, modellati a loro volta come “*aste tese*”. Alle bielle compresse, di sezione 20x20 cm, è stato assegnato il materiale muratura, con le caratteristiche meccaniche relative ai blocchi Porotherm PLANA+20-0,08.

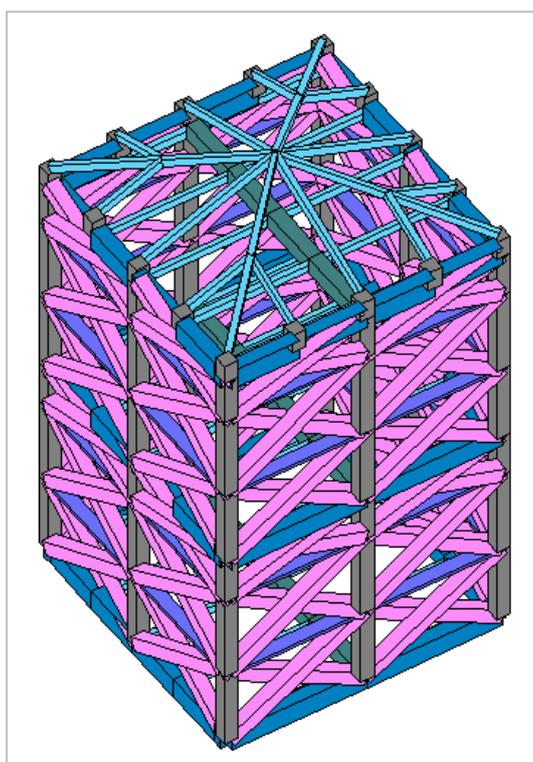


Figura 4-13 Vista del modello della struttura

#### 4.1.3.1 SOLLECITAZIONI E SPOSTAMENTI

Il programma combina i diversi tipi di carico secondo le regole previste dalla normativa vigente. Le combinazioni previste sono di tipo SLU, SLE, e di tipo sismico, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E valutata dal programma stesso a partire dai parametri illustrati. Le combinazioni sono destinate al controllo di sicurezza della struttura ed alla verifica degli spostamenti e delle sollecitazioni.

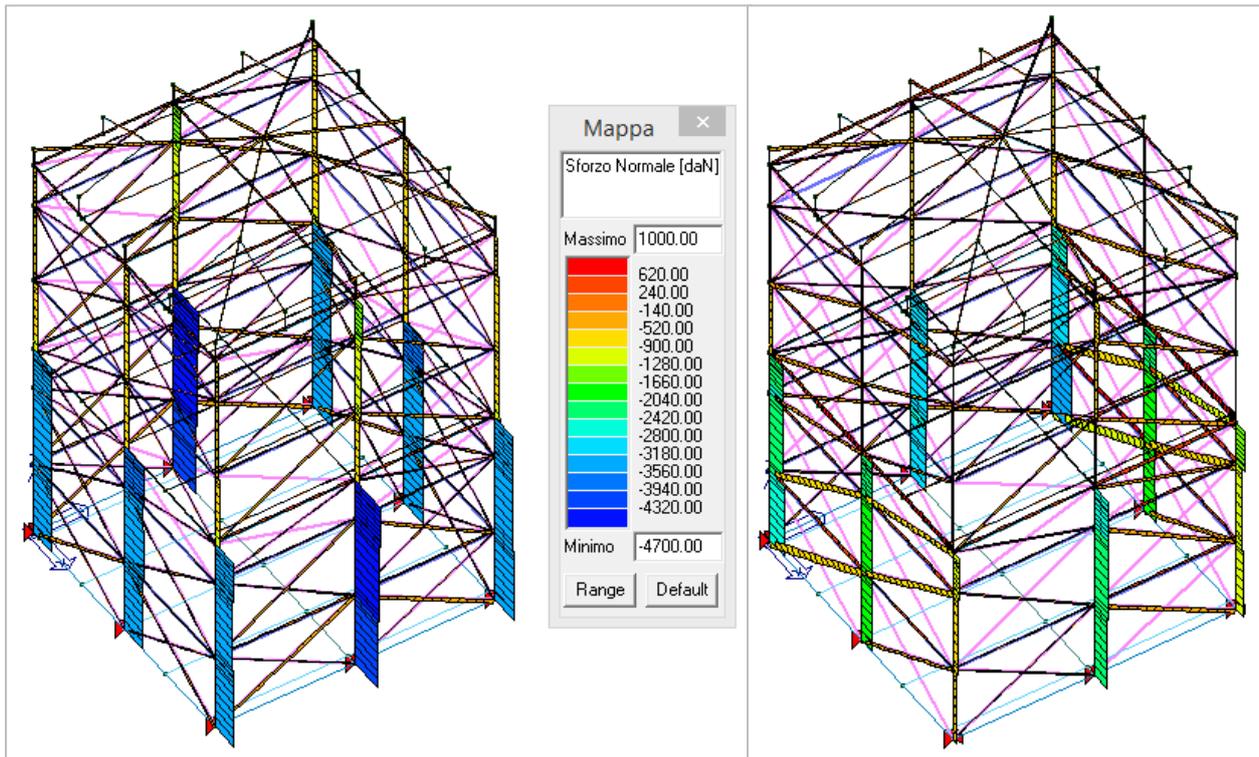


Figura 4-14 Sforzo normale massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica

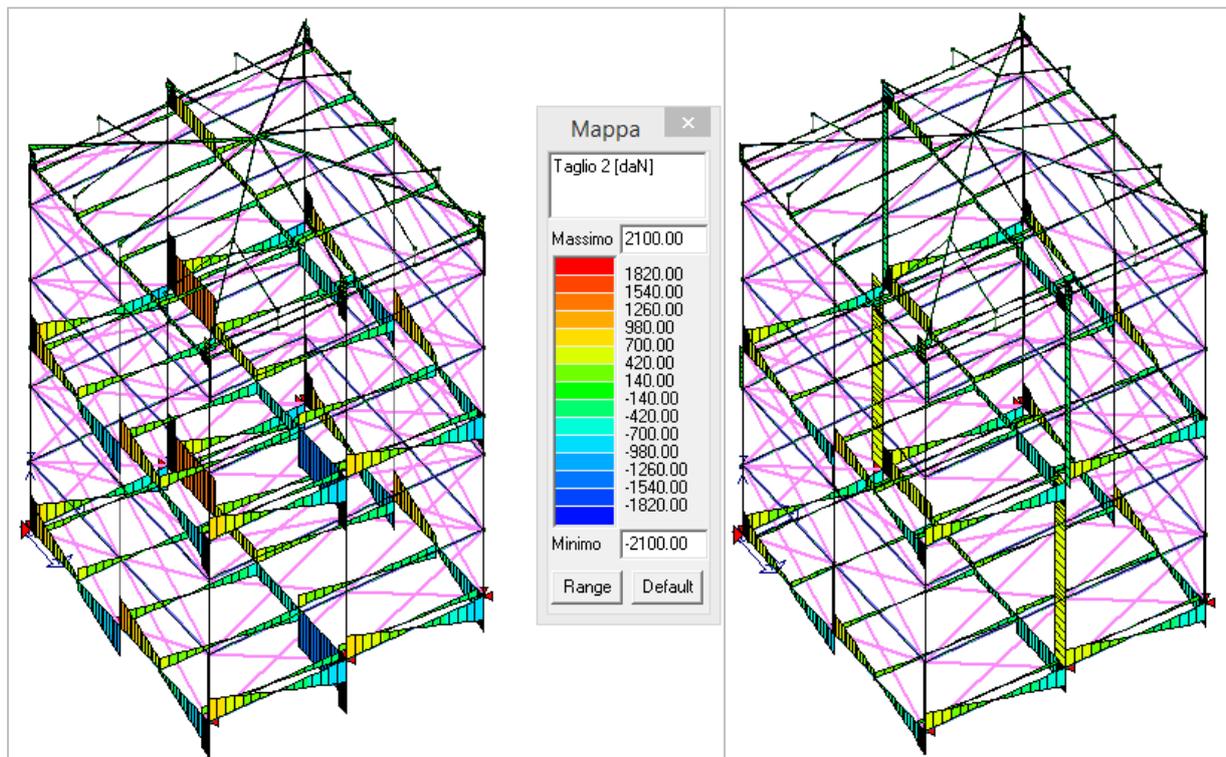


Figura 4-15 Taglio massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica

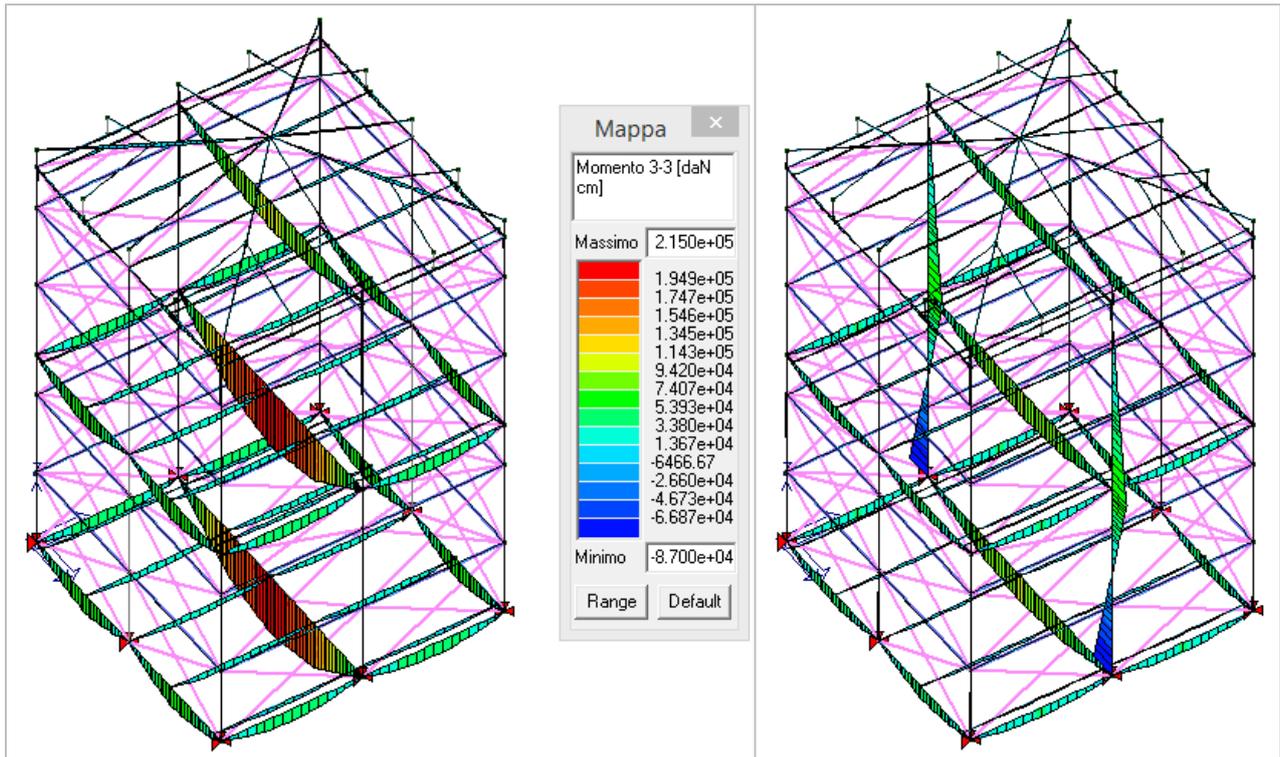


Figura 4-16 Momento massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica

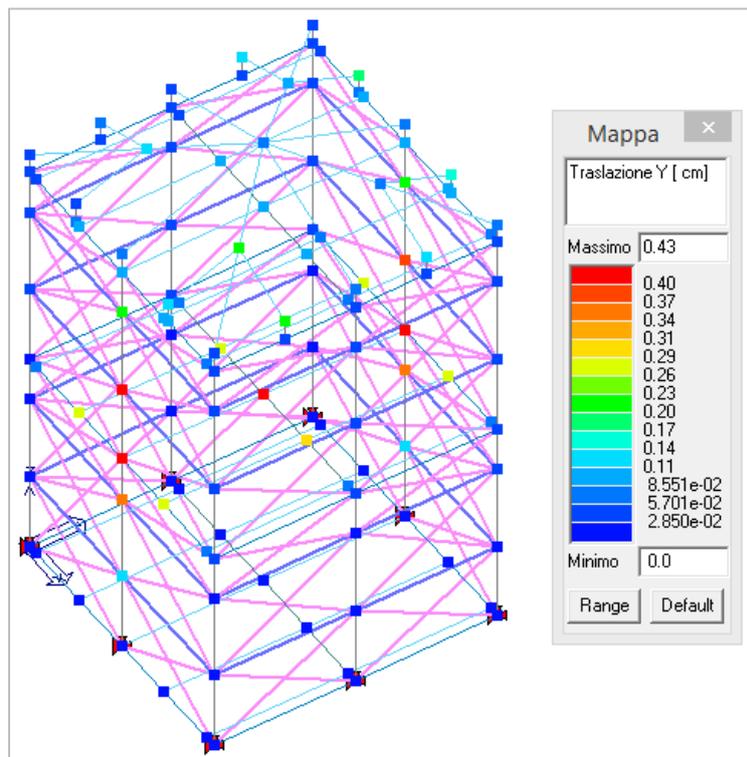


Figura 4-17 Spostamenti massimi in combinazione SLD sismica

#### 4.1.3.2 VALUTAZIONI SULLE VERIFICHE

Le verifiche degli elementi sono condotte in ottemperanza alle NTC 2008, seguendo le indicazioni analitiche riportate nella norma tecnica UNI EN 1995-1-1:2005 "Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici". Le verifiche sono espresse dal rapporto tra domanda e capacità, affinché la verifica sia positiva il rapporto deve essere inferiore o uguale a 1. La capacità è affetta dal termine  $k_{mod}$ , espressione della classe di servizio dell'elemento e della durata dei carichi applicati.

Si riporta la sintesi dei risultati ottenuti in termini di sfruttamento degli elementi strutturali, espresso in percentuale come il maggiore dei tre rapporti tra le tensioni ideali massime e quelle ammissibili (Figura 4-18).

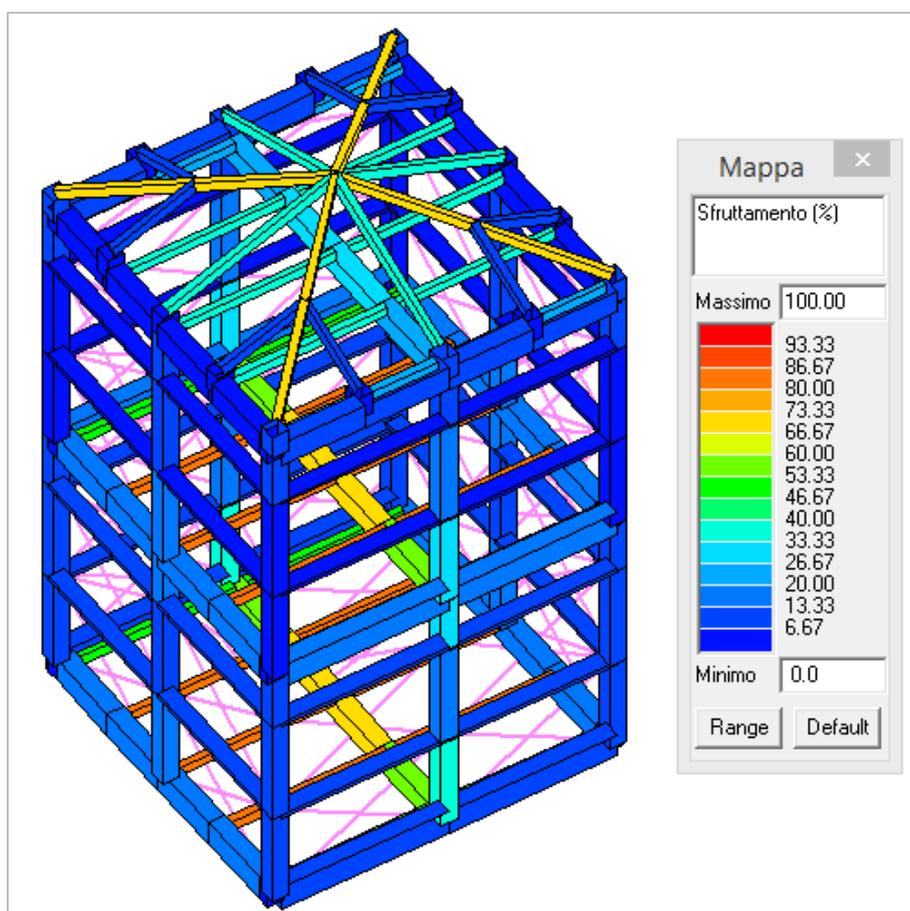


Figura 4-18 Percentuale di sfruttamento degli elementi

Con l'inserimento del contributo del sistema di tamponamento all'interno del modello di calcolo parte delle sollecitazioni viene distribuita agli elementi in muratura. Lo sfruttamento dei pilastri alla base risulta conseguentemente minore, attestandosi al di sotto del 40%. Chiaramente il

beneficio non riguarda gli orizzontamenti, i cui elementi sono sfruttati in modo analogo a quelli del modello senza bielle.

Il beneficio maggiore si ha in termini di deformazioni, che appaiono notevolmente più contenute di quelle calcolate nello schema precedente. Lo spostamento massimo allo SLD si attesta su 0,43 cm, pari a 0,0014h, che soddisfa i requisiti richiesti dalle NTC 2008, con la disuguaglianza  $d_r < 0,005 h$  già introdotta.

Osservando i diagrammi dei momenti della struttura sotto la sollecitazione orizzontale del sisma, si nota come nel precedente modello di calcolo, in assenza del contributo irrigidente dato dalla muratura, lo schema statico dei pilastri sia assimilabile a quello di una mensola, dando conseguentemente luogo a deformazioni molto maggiori, soprattutto in sommità. In seguito all'introduzione dei nuovi elementi biella i pilastri del primo livello presentano un diagramma del tipo “*a farfalla*”, assumendo dunque uno schema statico più vicino al tipo “*incastro-incastro*”. Tale difformità di comportamento è conforme alle aspettative, ma necessita di conferma attraverso sperimentazioni in scala reale, che permettano una più precisa quantificazione del contributo irrigidente dato dal tamponamento collaborante.

I dati emersi dalla modellazione sono qualitativamente in linea con quanto ipotizzato. Ovviamente bisogna precisare che la verifica di un singolo modulo 4x4 con tamponamenti su tutti e quattro i lati non risulta realistica.

Il primo modello presentato, in cui il tamponamento costituisce solo peso, ben rappresenta il massimo sfruttamento del telaio ligneo. Il secondo modello, al contrario, cerca di esemplificare la massima collaborazione della muratura alla struttura intelaiata. Simulazioni effettuate su modelli che prevedevano solamente 1 o al più 2 lati tamponati, in cui si potesse instaurare il meccanismo delle bielle compresse, hanno fornito risultati intermedi tra i due casi riportati analiticamente.

Senza addentrarsi ulteriormente nella modellazione, che presupporrebbe più specifiche conoscenze in merito al reale comportamento dei materiali, si può affermare come il comportamento di un “*aggregato*” di moduli, che possa contare su una “*gabbia*” esterna di muratura postcompressa dovrebbe mostrarsi in linea con i requisiti posti dalla normativa.

## 4.2 FINITURA DELLE SUPERFICI

---

Pur non essendo parte integrante di questa ricerca, che mirava alla definizione delle caratteristiche geometrico costruttive del sistema strutturale INTEGRO BS 400, non si poteva ignorare il tema della finitura esterna ed interna delle pareti. In prima istanza per rispondere a canoni di resa architettonica del sistema che non poteva essere lasciato al grezzo. Secondariamente, ma non meno rilevante, bisognava dare un'indicazione di massima sul comportamento termofisico della parete stessa, proprio per accertare le capacità isolanti e di sfasamento dell'intero pacchetto.

Per affrontare questo tema, e garantire massima versatilità all'utilizzo del sistema, si è cercato di verificarne la compatibilità con soluzioni commerciali di sottostrutture per pareti ventilate. Le performance termofisiche sono state raggiunte inserendo diversi layers di materiale isolante che, oltre a evitare il trafileamento dell'aria, minimizzano o eliminano i ponti termici al variare dei materiali strutturali (legno e laterizio).

Definito il pacchetto di "riferimento" sono stati effettuati i necessari calcoli termofisici in regime statico per garantire l'ottenimento delle performance minime. Ovviamente questo non è l'unico pacchetto di finitura possibile essendo il sistema strutturale in grado di ospitare diverse soluzioni già disponibili in commercio.

### 4.2.1 PARETE VENTILATA ESTERNA

---

A dividere i corsi dall'ambiente esterno vi sono strati di materiali isolanti, una camera d'aria debolmente ventilata e la pannellatura esterna.

Come noto la parete ventilata è una tipologia di facciata caratterizzata dalla presenza di uno strato di ventilazione e generalmente da elevate prestazioni energetiche. Le facciate ventilate sono progettate per dar luogo nell'intercapedine ad un flusso d'aria ascendente, azionato dal differenziale di gradiente termico tra la temperatura dell'aria in intercapedine e quella in ingresso.

Tale fenomeno prende il nome di "effetto camino", la portata viene regolata in funzione delle condizioni ambientali esterne rispetto ad obiettivi che nella stagione calda sono di riduzione del carico termico entrante mentre, nella stagione fredda, riguardano il controllo delle perdite energetiche, dei flussi e dei tassi di vapore d'acqua.

Oltre a manifestare indubbe valenze architettoniche, essendo uno schermo applicato esteriormente all'involucro edilizio, la facciata ventilata può soddisfare tutte le più svariate esigenze di qualificazione architettonica, contando su infinite combinazioni tra colore, forma, dimensione e

geometria. Inoltre, possano essere usati materiali fortemente innovativi, come lastre di gres composite di grandi formati, difficilmente installabili con sistemi costruttivi e di rivestimento tradizionali, oppure materiali di tipo classico tradizionale. Offre altresì la possibilità di nascondere all'interno dell'intercapedine eventuali impianti, sempre ispezionabili grazie alla smontabilità di ogni singola lastra.

Le modalità di messa in opera garantiscono facilità e velocità di posa che, anche grazie al montaggio a secco, è indipendente dalle condizioni meteo. Vi è grande libertà nelle sequenze di montaggio, che rendono ideale l'utilizzo di ponti rampanti, evitando l'utilizzo di ponteggi e garantiscono la possibilità di rimozione e smaltimento del vecchio rivestimento. Tutto questo, in un'ottica di flessibilità dell'involucro esterno che potrebbe essere sostituito o modificato nel corso di vita utile dell'edificio, riduce notevolmente il disagio per chi abita nell'edificio che evita di sentirsi “intrappolato” per mesi dai ponteggi, evita il fastidio delle polveri dovute alla demolizione, riduce i rumori da trapano ai soli fori da effettuare nella soletta per agganciare i profili verticali.

Oltre alla praticità, la parete ventilata garantisce una elevata efficienza energetica nel pieno rispetto delle normative in materia di risparmio energetico e la facile realizzazione di un involucro con parametri termofisici di classe A. La libertà di utilizzare rilevanti spessori di materiale isolante e la continuità e omogeneità dell'isolante stesso permettono una consistente riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, sia in regime invernale che in regime estivo. L'efficienza energetica estiva è garantita dalla microventilazione naturale che si genera nell'intercapedine e dalla protezione del retrostante paramento murario dall'irraggiamento solare diretto.



Figura 4-19 Finitura di facciata ventilata ([https://www.marazzi.it/soluzioni-architettura/marazzi-engineering/facciate-ventilate/facciate\\_ventilate\\_vantaggi/](https://www.marazzi.it/soluzioni-architettura/marazzi-engineering/facciate-ventilate/facciate_ventilate_vantaggi/))



Figura 4-20 Finitura a fasce per facciata ventilate (<http://www.ulmaarchitectural.com/it/facciate-ventilate/progetti/edifici-residenziali/>)

È garantita anche l'efficienza acustica con un generale aumento dei valori di isolamento rispetto a una facciata di tipo tradizionale, grazie alla presenza di una schermatura avanzata. È inoltre possibile l'inserimento nell'intercapedine di un isolamento acustico ulteriore.

L'intero sistema deve essere composto da elementi che possiedano elevata resistenza al fuoco per quanto concerne i rivestimenti, le sottostrutture ed alcune tipologie di isolante che sono fondamentali per fornire massima sicurezza in caso di incendio.

Può essere anche prevista l'integrazione con impianti. Essendo il sistema di rivestimento a parete ventilata una schermatura avanzata, può essere integrato con sistemi fotovoltaici, solari termici, oppure con materiali catalitici e schermature solari per abbattere i consumi energetici per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio. Le intercapedini fungono da cavedi per il passaggio dei principali impianti dell'edificio.

Fissando saldamente i montanti della facciata ventilata alle travi di bordo e controventandoli alla muratura, si ottiene un sistema di facciata che ha un ottimo comportamento alle sollecitazioni sismiche e che contribuisce a mantenere i tamponamenti in muratura correttamente fissati al telaio. Inoltre si ottiene il pieno controllo degli stati tensionali del piano di facciata. Mediante la realizzazione del rivestimento di facciata tramite la messa in opera a secco e l'utilizzo di fissaggi meccanici, gli elementi di rivestimento, di ridotte dimensioni, sono in grado di sfogare le dilatazioni e assecondare i movimenti imposti dall'edificio.

La durabilità nel tempo è una ulteriore caratteristica fondamentale, sia in riferimento agli elementi di rivestimento della facciata stessa, sia in termini di protezione del retrostante paramento murario dall'azione combinata di pioggia e vento. Si ottiene la neutralizzazione degli spruzzi, delle sferzate d'acqua dei ruscellamenti in facciata. Viene mantenuto all'asciutto l'isolante termico con una drastica riduzione del rischio di guasti o degradi precoci

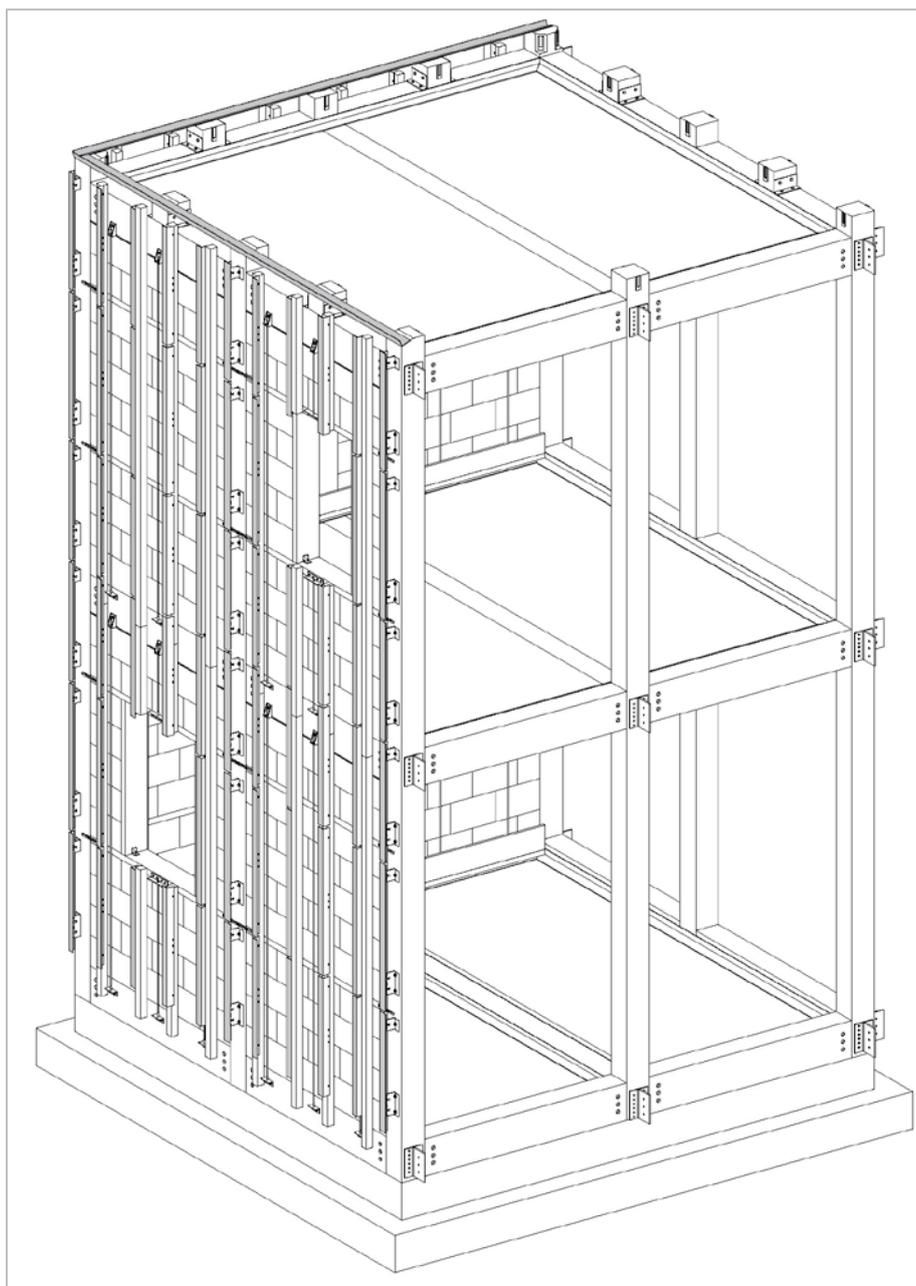
Si ha anche la protezione del retrostante paramento murario dall'irraggiamento solare diretto. In questo modo si ha la corretta generazione di una microventilazione atta a favorire l'evaporazione dell'acqua presente in intercapedine dopo un evento meteorico, smaltire il vapore acqueo proveniente dagli ambienti interni dell'edificio, scongiurare i pericoli di condensa superficiale o interstiziale, ridurre le formazioni gelive, evitando l'insorgere di patologie e danni anzitempo.

In caso di ammaloramento la manutenzione risulta oltremodo semplice. L'indipendenza delle singole lastre garantisce semplici, veloci ed economiche azioni di ispezione e manutenzione sia del rivestimento stesso che del retrostante tamponamento o degli eventuali impianti presenti. Inoltre, il rivestimento è composto da elementi prodotti in serie in stabilimento, di alta qualità e dal comportamento stabile nel tempo. Una facciata ventilata possiede una naturale predisposizione per la manutenzione ordinaria e non, che può essere sfruttata per programmare interventi, controlli e lavaggi a patto che mezzi e strumenti siano definiti in fase progettazione e non improvvisati durante le operazioni.

Il pacchetto che si è scelto di installare, come detto ai soli fini speculativi per quanto riguarda la rappresentazione formale e in funzione di quantificare alcune prestazioni dell'intero pacchetto, è costituito innanzitutto da una sottostruttura in alluminio ALLFACE<sup>7</sup>.

Si prevede l'utilizzo di:

- profili a "L" 60x60x2 mm di cui un'ala si giunta a lato dei morali di irrigidimento;
- profili a "T" 80x40x2mm sorretti dal sistema ALLFACE sui pilastri qualora vi sia la convergenza di due pannelli;
- profili a "L" 60x40x2 mm sorretti dal sistema ALLFACE sui pilastri d'angolo dove non c'è convergenza di più pannelli;
- profili a "L" 60x60x2 mm lunghi 100 mm per le unioni più complicate, ovvero quelle dove due pannelli posti a 90 tra loro convergono nello stesso punto.



*Figura 4-21 Installazione profilo ALLFACE*

Porre esattamente a piombo i profili a "L" sugli irrigidimenti risulta essere un'operazione onerosa a livello di tempi. Per ridurre l'incidenza di tale lavorazione sulle tempistiche di cantiere si può pensare di effettuare le operazioni di taglio e foratura dell'alluminio in officina. A seconda delle esigenze è possibile modificare la distanza tra tamponamento e lato dei profili a contatto con i pannelli esterni in modo da modificare le dimensioni della camera d'aria ventilata e dell'isolamento a cappotto.

L'utilizzo del sistema ALLFACE sui pilastri consente all'isolante di passare tra il profilo e il telaio. Ciò risulta molto importante per l'abbattimento dei ponti termici che si instaurerebbero nelle parti più critiche a livello di coibentazione, ovvero quelle degli elementi strutturali lignei.

In un'ottica di aggregabilità e modularità ogni livello del modulo è stato diviso in 3 fasce orizzontali, la prima e l'ultima di altezza pari a 956 mm, la mediana di 1180 mm; così facendo si ha una ripetitività orizzontale che consente il taglio e la foratura dei pannelli di finitura in officina secondo dimensioni standardizzate.

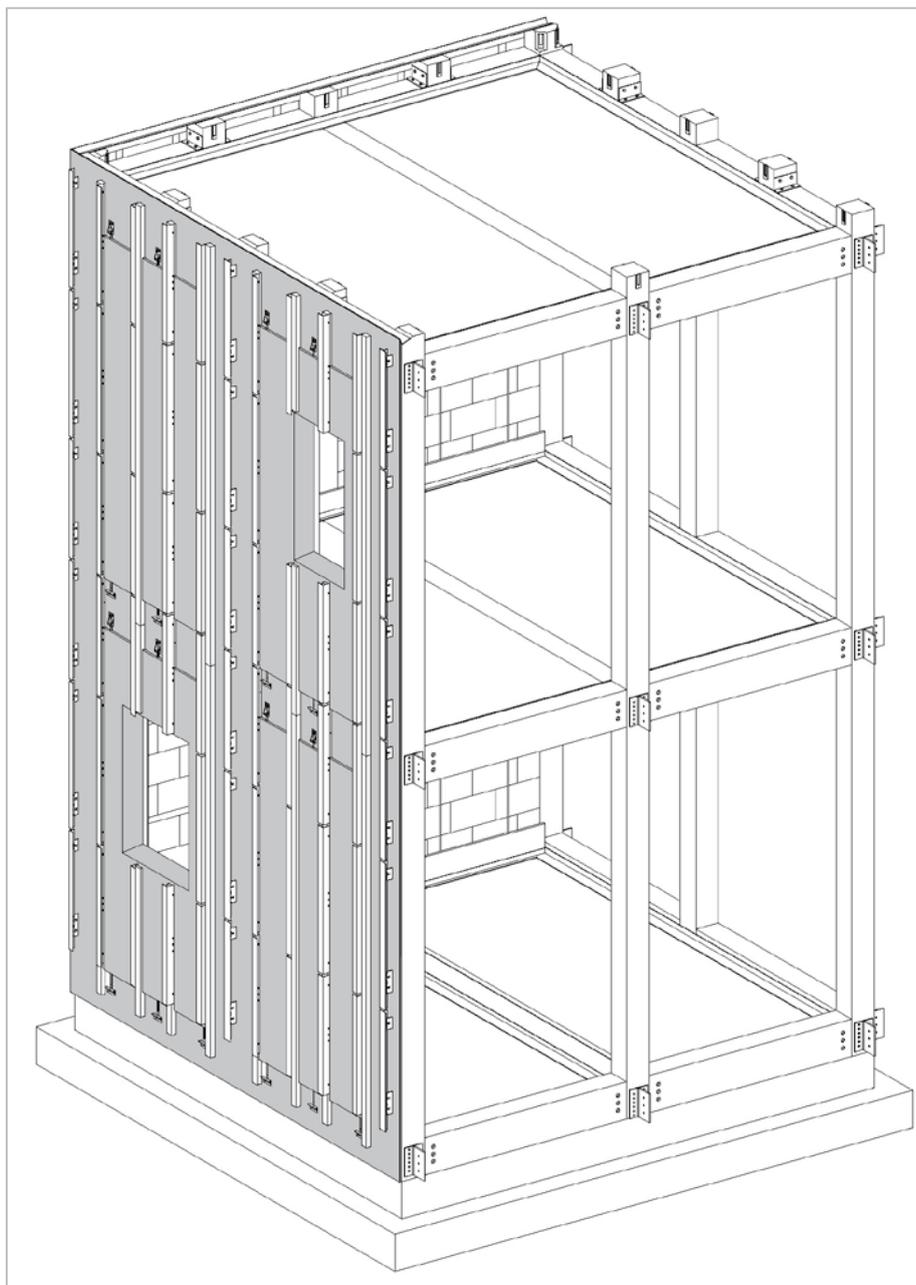


Figura 4-22 Installazione pannelli BETONWOOD BITUM FIBER

La massività dei blocchi consente un ottimo comfort per quanto riguarda le stagioni estive garantendo uno sfasamento dell'onda termica di circa 16h. Introducendo uno strato di isolante che racchiude l'oggetto edilizio è possibile ottenere ottime prestazioni anche nei periodi più freddi e minimizzare, laddove necessario, i ponti termici. A titolo esemplificativo, si è pensato di porre uno strato a spessore variabile di isolante **BETONWOOD BITUM FIBER<sup>8</sup>** ( $\lambda_D = 0,055 \text{ W/mK}$ ) in pannelli rigidi e facilmente lavorabili. Tale materiale, oltre a coibentare l'involucro, svolge l'importante compito di impedire l'entrata dell'aria esterna dalle microfessure che si generano inevitabilmente posando i blocchi a secco.

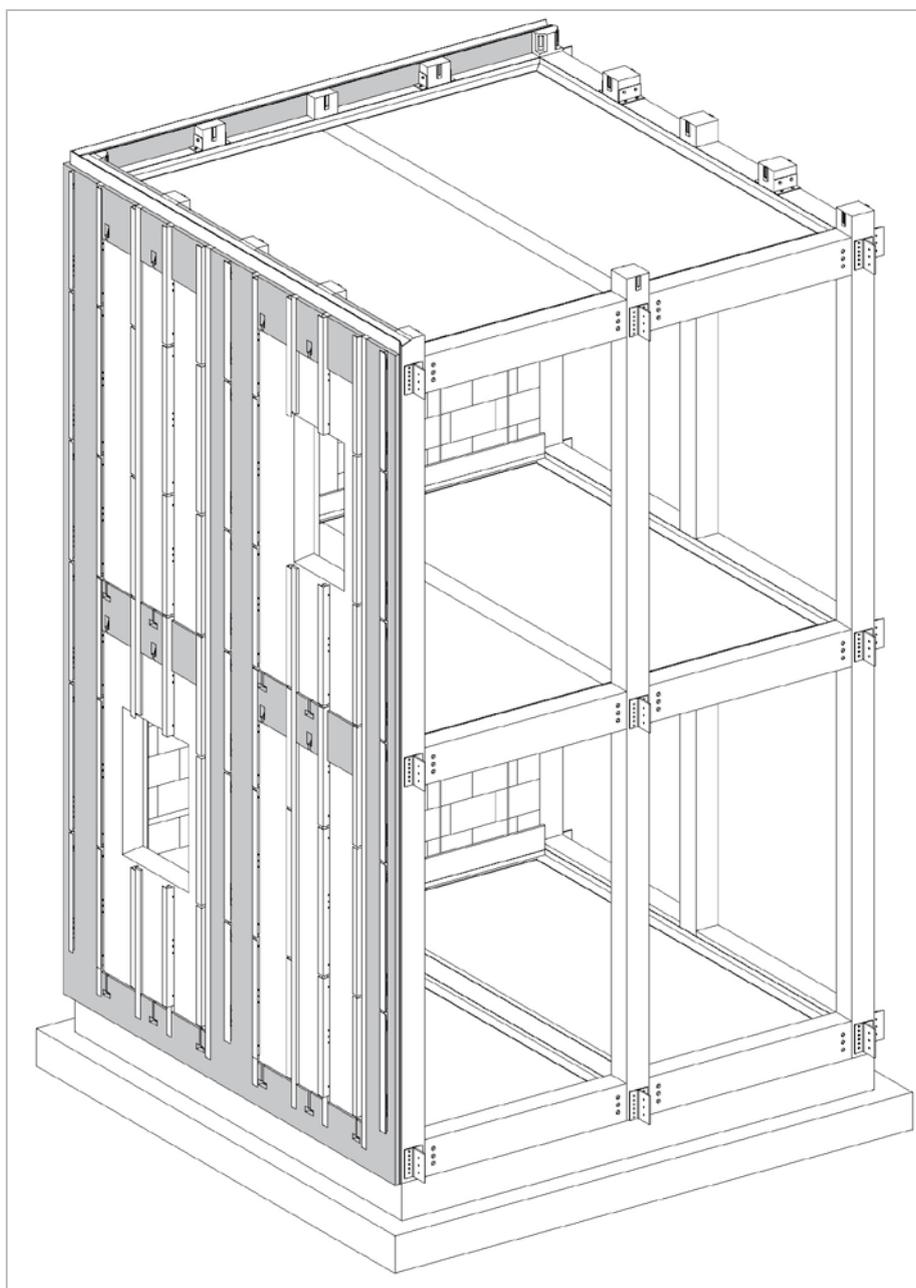


Figura 4-23 Installazione isolante ROCKWOOL ACOUSTIC 225

Limitatamente alle zone in cui è presente il telaio ligneo, tuttavia, occorre andare a correggere i ponti termici, poiché la resistenza termica offerta dal legno risulta inferiore rispetto quella dei blocchi in laterizio. Sopra al precedente strato di isolante si pongono pannelli ROCKWOOL ACOUSTIC 225 PLUS<sup>9</sup>, che presentano proprietà isolanti maggiori ( $\lambda_D = 0,033W=mK$ ).

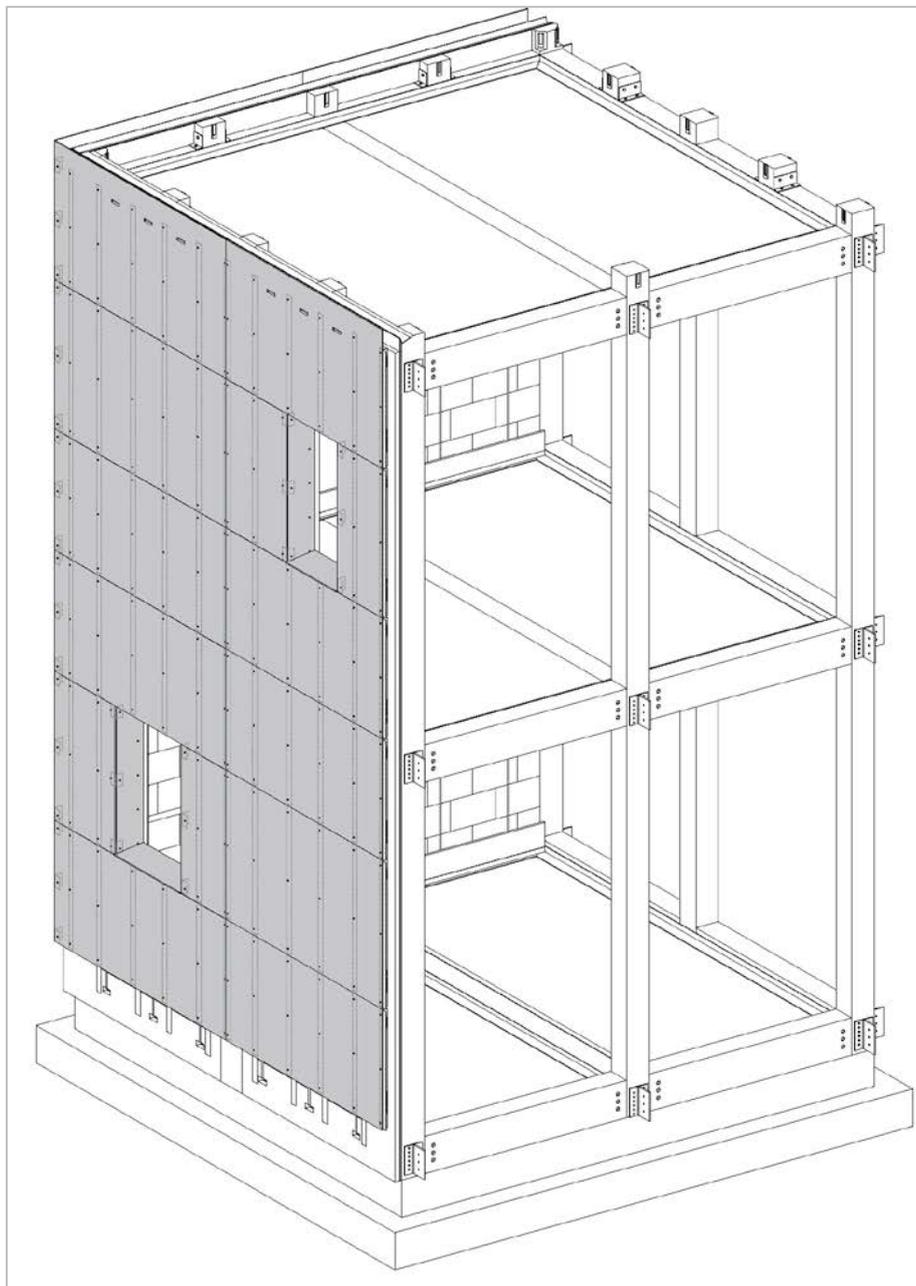


Figura 4-24 Installazione dei pannelli ROCKPAMEL EXTREME 8mm

L'utilizzo dei sostegni in alluminio sugli irrigidimenti lignei consente inoltre la realizzazione di una camera d'aria debolmente ventilata all'esterno del sistema strutturale. Ai fini dei calcoli e per

ottimizzare il flusso d'aria, nell'ipotesi in questione in questione si è considerato uno strato d'aria in movimento con spessore pari a 6 cm.

A protezione degli elementi interni si fissano con rivetti dei pannelli ROCKPANEL XTREME 8 mm<sup>10</sup> (9,6 kg=m<sup>2</sup>), tagliati e forati in officina secondo la posizione che andranno ad occupare. Le operazioni di taglio sono agevolate dalla ripetizione delle fasce orizzontali precedentemente esposte.

Per quanto riguarda la controparete interna, necessaria anche per permettere l'alloggiamento e il passaggio degli impianti elettrici, si è pensato di utilizzare una soluzione a secco realizzata con lastre in cartongesso FERMACELL da 1cm<sup>11</sup> e sottostruttura in alluminio di spessore 6cm. Ai fini dei calcoli non è stata prevista l'interposizione di un ulteriore strato isolante che può comunque essere installato, se necessario.

Con riferimento alla sola stratigrafia esterna si mostra nell'immagine sottostante (Figura 4-25) l'esploso del pacchetto di finitura e la sequenza di montaggio.

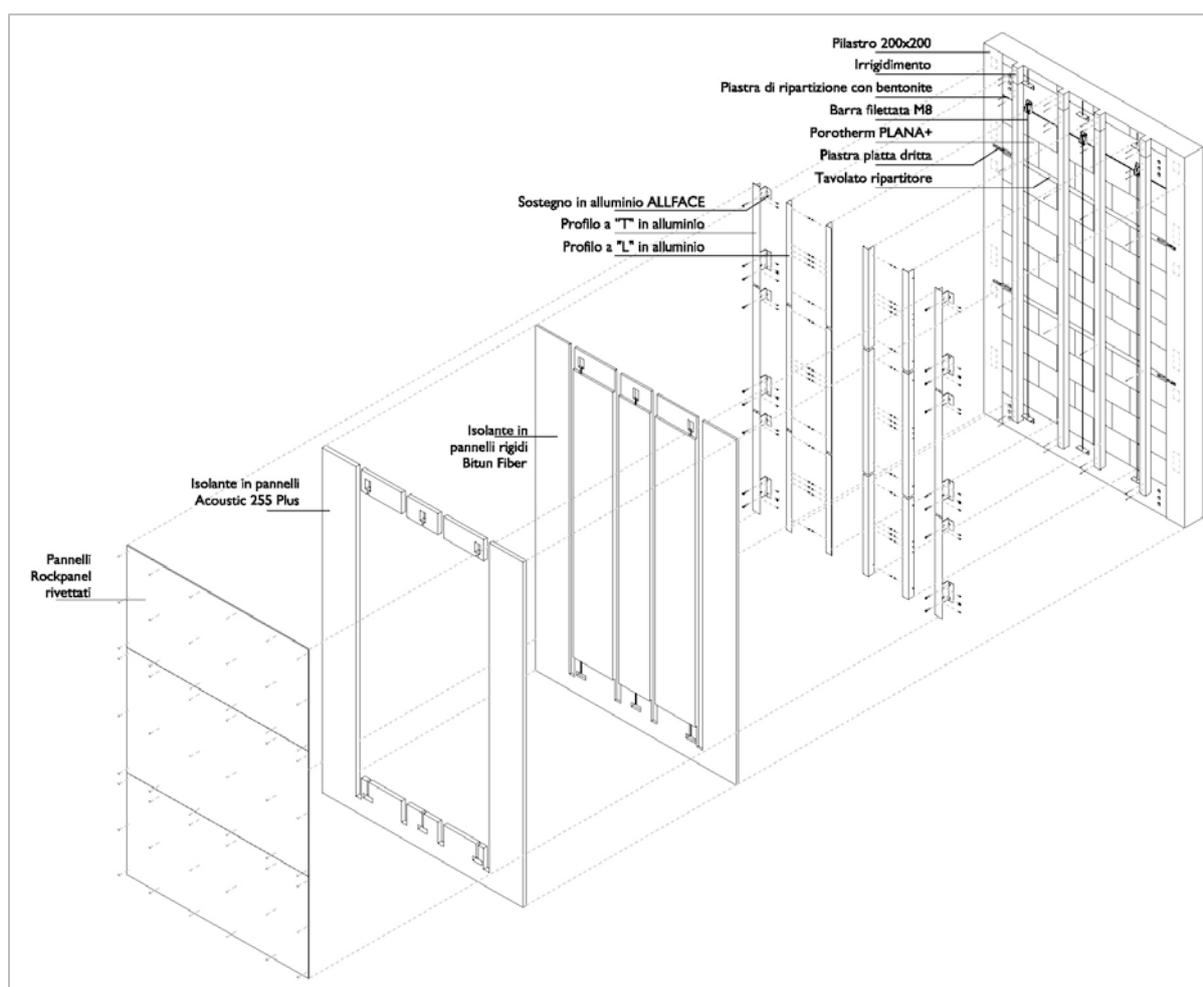


Figura 4-25 Esploso della sottostruttura esterna

Si propone anche il particolare dell'attacco del solaio interpiano (Figura 4-26) con la stratigrafia della parete in corrispondenza della trave. In questa posizione, particolarmente critica per l'instaurarsi del ponte termico, è appunto evidente l'utilizzo del doppio strato isolante.

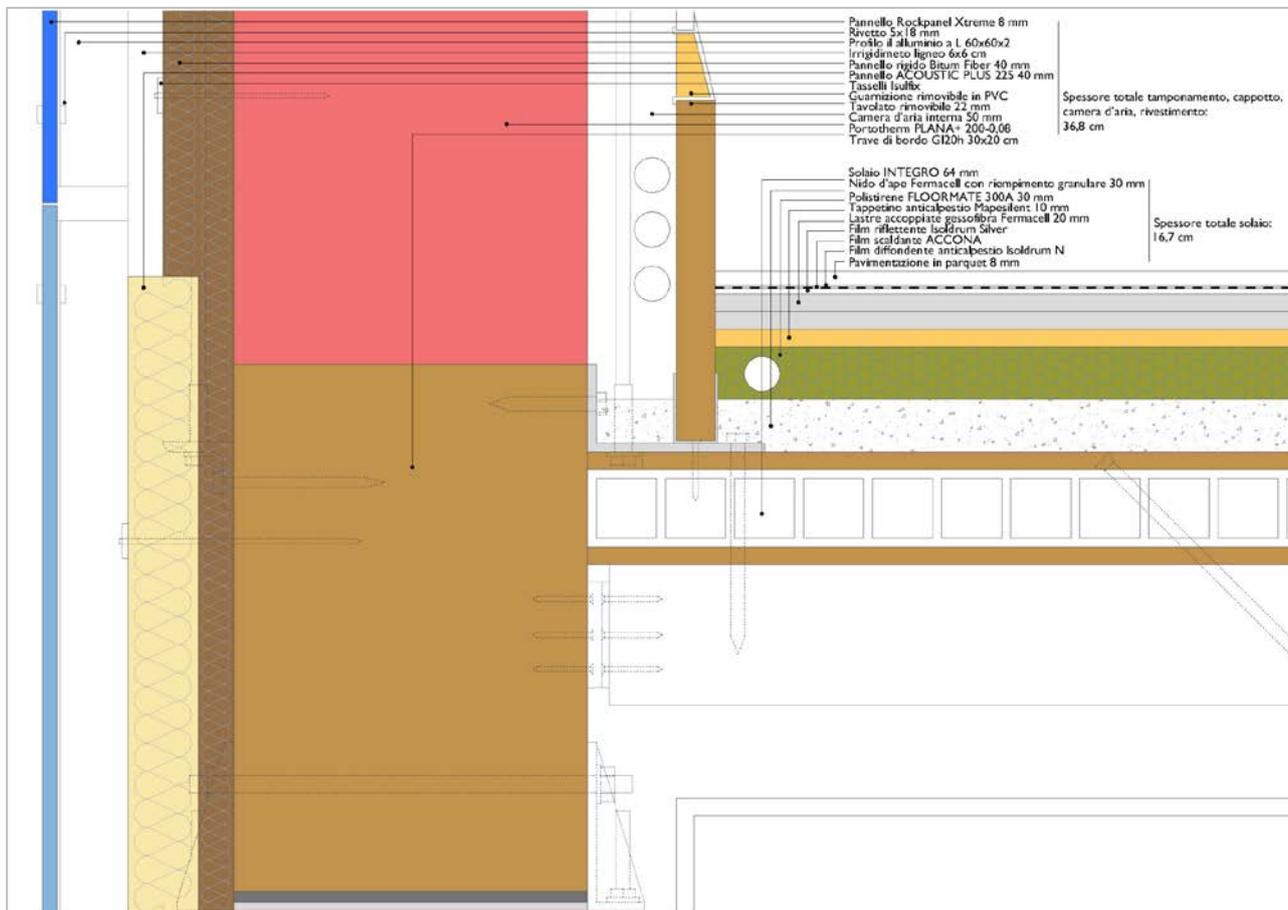


Figura 4-26 Stratigrafia interna ed esterna della parete

## 4.2.2 ANALISI TERMICA DELLA PARETE

Una volta definito il pacchetto di finitura della parete viene qui analizzato il comportamento termico del tamponamento attraverso la definizione della trasmittanza termica, della trasmittanza termica periodica e la verifica, con diagramma di Glaser riferito ai dati climatici dell'area di Bologna, dell'assenza di condensa interstiziale.

La norma UNI EN ISO 6946 prescrive un metodo di calcolo per la determinazione della resistenza termica e della trasmittanza termica idonee per definire il flusso di calore che attraversa i vari componenti edilizi.

La trasmittanza  $U$  [ $W/m^2K$ ] viene definita come: flusso di calore che passa attraverso un'area di  $1 m^2$  con una differenza di temperatura tra interno ed esterno di  $1 K$ .

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{q}{A \times \Delta T}$$

Per quanto riguarda strati omogenei, la resistenza termica totale  $R_T$  [ $m^2K/W$ ], analogamente a quella elettrica, si ricava sommando i contributi forniti da tutti gli strati.

$$R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se}$$

I termini  $R_{si}$  e  $R_{se}$  sono rispettivamente la resistenza termica superficiale interna ed esterna e inglobano al loro interno i sia i fattori legati alla convezione che all'irraggiamento. In condizioni normali i valori sono forniti dalla norma secondo la Tabella 4-5

	Ascendente	Orizzontale	Discendente
$R_{si}$	0,1	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

Tabella 4-5  $R_{si}$  e  $R_{se}$  in funzione della direzione del flusso termico

Le  $R_i$  sono le resistenze termiche dei singoli strati, che si dividono in:

- materiali omogenei;
- intercapedini d'aria.

Per quanto riguarda i materiali omogenei, la resistenza termica è definita in funzione dello spessore dello strato  $d$  [mm] e della conducibilità termica  $\lambda$  [W/mK], i cui valori sono tabulati.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Le intercapedini d'aria si suddividono in:

- non ventilate in cui le aperture non sono maggiori di  $500 \text{ mm}^2$  per metro di lunghezza o queste sono disposte in modo da non permettere un flusso d'aria attraverso l'intercapedine;
- debolmente ventilate, quando le aperture sono comprese tra  $500 \text{ mm}^2$  e  $1500 \text{ mm}^2$  per metro di lunghezza. In questo caso occorre dimezzare i valori della Tabella 4-6;

- fortemente ventilate, quando le aperture sono maggiori di 1500mm<sup>2</sup> per metro di lunghezza. In questi casi viene trascurata la resistenza termica dell'intercapedine e tutti gli strati che la separano dall'ambiente esterno, considerando una resistenza termica superficiale esterna, corrispondente all'aria immobile R<sub>si</sub>.

mm	Ascendente	Orizzontale	Discendente
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Tabella 4-6 Resistenza termica [m<sup>2</sup>K/W] di intercapedini non ventilate

Per eseguire il calcolo della trasmittanza totale R<sub>T</sub> sono stati utilizzati i valori forniti dalle schede tecniche delle aziende produttrici per descrivere l'intero pacchetto (Tabella 4-7):

N.	DESCRIZIONE STRATO (dall'interno all'esterno)	s	Lambda	C	M.S.	P<50*10 <sup>12</sup>	C.S.	R
1	Adduttanza Interna	0		7,700			0	0,130
2	Fermacell Lastre in Gessofibra	10	0,320	32,000	11,50	14,846	1100	0,031
3	Strato d'aria verticale da 5 cm	50	0,278	5,556	0,07	193,000	1008	0,180
4	Porotherm plana 008	200	0,084	0,420	160,00	53,611	1000	2,381
5	Pannello isolante Betonwood Bitumfiber	20	0,050	2,500	4,60	38,600	2100	0,400
6	Isolante Rockwool Acoustic 225	30	0,033	1,100	2,10	193,000	1030	0,909
7	Strato d'aria verticale da 5 cm	50	0,278	5,556	0,07	193,000	1008	0,180
8	Finitura esterna RocKpanel Extreme	8	0,430	53,750	9,60	64,333	670	0,019
9	Adduttanza Esterna	0		25,000			0	0,040

Tabella 4-7 Dati tecnici dei vari elementi componenti il pacchetto di parete

Dove:

- s = Spessore dello strato [mm];
- lambda = Conduttività termica del materiale [W/mK];
- C = Conduttanza unitaria [W/m<sup>2</sup>K];
- M.S. = Massa Superficiale [kg/m<sup>2</sup>];
- P<50\*10<sup>12</sup> = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50% [kg/msPa];

- C.S. = Calore Specifico [J/kgK];
- R = Resistenza termica dei singoli strati [m<sup>2</sup>K/W];

Eseguendo il calcolo della trasmittanza secondo la norma UNI EN ISO 6946 di ottiene:

$$R_T = 4,270 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Da cui:

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,234 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Per uno spessore totale di parete  $S_T = 368 \text{ mm}$ .

Se la trasmittanza termica stazionaria è una prestazione degli elementi edilizi che permette di valutare il livello di isolamento termico che essi sono in grado di offrire in regime invernale, la trasmittanza termica periodica calcolata secondo la norma UNI EN ISO 13786 è un parametro che esprime la capacità di un componente edilizio di attenuare e sfasare nel tempo il flusso termico proveniente dall'esterno che lo attraversa nell'arco delle ventiquattro ore di una giornata.

La fase estiva, sottovalutata nella certificazione energetica italiana degli edifici, comporta elevati consumi per raffrescamento e condizioni di discomfort nei nostri climi temperati, e va quindi assolutamente presa in considerazione. Essendo caratterizzata da carichi termici al contorno variabili nell'arco della giornata e in modo più evidente rispetto all'inverno, la stagione estiva chiama in gioco l'inerzia termica dell'involucro edilizio.

L'inerzia termica è la capacità di un componente edilizio di attenuare le oscillazioni della temperatura ambiente dovuta ai carichi termici interni ed esterni variabili nell'arco del giorno (radiazione solare, persone, elettrodomestici) e di accumulare il calore e rilasciarlo dopo un certo numero di ore nel tempo.

L'inerzia termica dell'intero pacchetto si può descrivere attraverso due principali proprietà termiche dinamiche:<sup>12</sup>

- trasmittanza termica periodica  $Y_{ie} = 0,013 \text{ W/m}^2\text{K}$
- capacità termica areica interna periodica  $C_{ip} = 25,295 \text{ kJ/m}^2\text{K}$

Da questi valori si possono definire sia il parametro adimensionale definito come fattore di attenuazione  $F_d = 0,057$  e il tempo di sfasamento calcolato in ore  $S = 16,53 \text{ h}$ .

In accordo con il metodo dei parametri qualitativi secondo Linee Guida Nazionali sulla Certificazione Energetica degli Edifici per valutare la "Prestazione Energetica Estiva" è possibile, una volta noti i valori di sfasamento e attenuazione, confrontarli con delle classi di riferimento tabellate (Tabella 4-8).

Sfasamento S [h]	Attenuazione Fd	Prestazioni	Qualità prestazionale
$S > 12$	$Fd < 0,15$	Ottime	I
$12 \geq S \geq 10$	$0,15 \leq Fd \leq 0,30$	Buone	II
$10 \geq S \geq 8$	$0,30 \leq Fd \leq 0,40$	Medie	III
$8 \geq S \geq 6$	$0,40 \leq Fd \leq 0,60$	Sufficienti	IV
$6 \geq S$	$0,60 \leq Fd$	Mediocri	V

Tabella 4-8 Metodo dei parametri qualitativi per la valutazione della prestazione energetica estiva

Nel caso in esame si ha:

$$S = 16,53 \text{ h} > 12 \text{ h}$$

$$F_d = 0,057 < 0,15$$

Di conseguenza il sistema strutturale INTEGRO BS 400, associato alla stratigrafia proposta ai fini di queste analisi, mostra una "qualità prestazionale" ottima.<sup>13</sup>

Tenendo inoltre conto della elevata massa superficiale  $M_s = 188 \text{ kg/m}^2$  e volendo valutare le prestazioni acustiche passive del pacchetto secondo la norma UNI EN 12354 "Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti" si può fare riferimento al Rapporto tecnico U20001230 "Acustica in edilizia. Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici. Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale".

Tale Rapporto Tecnico, sviluppato dall'UNI ente normativo italiano, ha lo scopo di adattare le norme Europee alla realtà costruttiva nazionale proponendo un modello di calcolo di più semplice approccio. Le formule semplificate proposte per il calcolo dell'indice del potere fonoisolante  $R_w$  [dB] sono 2:

- Laboratori italiani

$$R_w = 20 \log (M_s) - 2$$

Tale formula è valida per partizioni orizzontali e verticali (singole o doppie) con  $M_s > 80 \text{ kg/m}^2$ . Nel caso di pareti doppie l'intercapedine deve essere priva di riempimento e di spessore uguale o minore di 5 cm.

- Formula CEN

$$R_w = 37,5 \log (M_s) - 44$$

Tale formula è valida per strutture di base monolitiche con  $M_s > 150 \text{ kg/m}^2$ .

Nel caso in esame si ha:

- Laboratori italiani

$$R_w = 20 \log (188) - 2 = 43,47 \text{ dB}$$

- Formula CEN

$$R_w = 37,5 \log (188) - 44 = 41,26 \text{ dB}$$

Le pareti multistrato possono essere interessate anche dal problema della condensa interstiziale: si tratta del fenomeno per cui, in una certa porzione della parete, la portata massica diffusiva di vapore entrante supera la portata massica diffusiva uscente, come conseguenza del fatto che in questa stessa porzione la pressione del vapore  $p_v$  supera la pressione di saturazione dell'acqua  $p_{\text{sat}}$ . Il risultato è un accumulo di vapore che condenserà in questa zona interna alla parete, portando la struttura ad un veloce ed inevitabile degrado, oltre a minare la salubrità degli ambienti interni.

Il fenomeno della condensa interstiziale è dovuto ad un'inopportuna stratificazione della parete, tale da non permettere un sufficiente passaggio di vapore dall'ambiente più caldo, dove la  $p_{\text{sat}}$  dell'acqua è maggiore, a quello più freddo, dove la  $p_{\text{sat}}$  dell'acqua è minore. La condensazione del vapore d'acqua si verifica quando la pressione parziale del vapore d'acqua raggiunge la pressione di saturazione. Quest'ultima è funzione della temperatura di rugiada a una determinata pressione. A parità di temperatura, più è alto il contenuto di vapore, maggiore è l'umidità relativa, maggiori sono i rischi di formazione di condensa.

Al fine di verificare l'insorgere o meno della condensa occorre controllare che la temperatura superficiale di ogni strato sia maggiore della relativa temperatura di condensazione, ovvero che la pressione parziale del vapore sia maggiore della pressione di saturazione.

In letteratura i valori della resistenza al flusso di vapore si trovano spesso espressi in forma adimensionale mediante il parametro  $\mu$ , dato dal rapporto tra la resistenza al flusso di vapore del materiale in esame e quella di riferimento, assunta pari alla resistenza alla diffusione del vapore offerta dall'aria a parità di spessore ( $\mu_{\text{aria}} = 1$ ). Ad esempio una resistenza  $\mu = 10$  significa che il materiale in esame ha un valore di permeabilità 10 volte inferiore a quello dell'aria. La convenienza

nell'adozione dei parametri  $\mu$ , avendo a che fare con valori molto piccoli della permeabilità, consiste nella maggiore semplicità dei calcoli e quindi nel minor rischio di commettere errori con le unità di misura.

Il flusso di vapore ha luogo quando si crea un differenziale di pressione e il verso va dagli ambienti più caldi a quelli più freddi. Al maggior contenuto di vapore dei primi, corrisponde una maggiore pressione, quindi si verifica generalmente un flusso dall'interno verso l'esterno.

Per valutare il rischio di condensa si ricorre al Diagramma di Glaser. Questo permette la rappresentazione congiunta dei valori della temperatura all'interno della struttura e dei relativi valori di pressione di saturazione da confrontare con i valori delle pressioni parziali.

Per prima cosa si calcolano la densità di flusso termico  $q$  e la portata massica diffusiva per unità di superficie  $j$  che attraversano la parete.

$$q = \frac{\Delta T}{R_T}$$

$$j = \frac{\Delta p}{R_d}$$

$R_T$  è la somma delle resistenze termiche in serie.  $R_d$  [Pa s/Kg] è la somma delle resistenze diffusive in serie di ogni strato ( $R_d = s_i/\delta_{v,1} = s_i \times \mu_i/\delta_{v,0} = s_i \times \mu_i/670 \times 10^{-9}$ ), considerando trascurabili le resistenze convettive interne ed esterne.

Il calcolo di  $j$  richiede la determinazione delle pressioni di vapore interna  $p_{v,i}$  ed esterna  $p_{v,e}$ .

$$p_{s,i} = \varphi_i \times p_{sat}(T_i)$$

$$p_{s,e} = \varphi_e \times p_{sat}(T_e)$$

Noti  $q$  e  $j$  è possibile calcolare i valori di  $T$  e  $p_v$  a valle delle singole resistenze termiche e diffusive rispettivamente.

$$T_i = T_{i-1} - R_{t,i-1} \times q$$

$$p_{s,i} = p_{s,i-1} - R_{d,i} \times j$$

Si confrontano infine i valori delle pressioni e delle corrispondenti pressioni di saturazione con i valori tabellati in funzione della temperatura (Tabella 4-9).

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
24,0	2,991	3,009	3,028	3,046	3,065	3,083	3,102	3,121	3,140	3,159
23,0	2,814	2,831	2,849	2,866	2,884	2,901	2,919	2,937	2,955	2,973
22,0	2,646	2,663	2,679	2,696	2,712	2,729	2,746	2,763	2,780	2,797
20,0	2,338	2,352	2,367	2,382	2,397	2,412	2,427	2,442	2,457	2,472
19,0	2,196	2,209	2,223	2,237	2,251	2,266	2,280	2,294	2,309	2,423
18,0	2,061	2,074	2,087	2,104	2,114	2,127	2,141	2,154	2,168	2,182
17,0	1,934	1,947	1,959	1,972	1,984	1,997	2,010	2,022	2,350	2,048
16,0	1,814	1,826	1,838	1,850	1,861	1,873	1,885	1,898	1,910	1,922
15,0	1,701	1,712	1,723	1,734	1,746	1,757	1,768	1,780	1,791	1,803
14,0	1,594	1,005	1,615	1,626	1,636	1,647	1,658	1,668	1,679	1,690
13,0	1,493	1,503	1,513	1,523	1,533	1,543	1,553	1,563	1,574	1,584
12,0	1,398	1,408	1,417	1,426	1,436	1,445	1,455	1,464	1,474	1,484
11,0	1,300	1,317	1,326	1,335	1,344	1,353	1,362	1,371	1,380	1,389
10,0	1,224	1,232	1,241	1,249	1,257	1,266	1,274	1,283	1,291	1,300
9,0	1,145	1,152	1,160	1,168	1,176	1,184	1,192	1,200	1,208	1,216
8,0	1,070	1,077	1,084	1,092	1,099	1,107	1,114	1,220	1,129	1,720
7,0	0,999	1,006	0,013	1,020	1,027	1,034	1,041	1,048	1,055	1,062
6,0	0,933	0,939	0,946	0,952	0,959	0,965	0,972	0,979	0,986	0,992
5,0	0,671	0,877	0,883	0,889	0,895	0,901	0,907	0,914	0,920	0,926
4,0	0,812	0,818	0,823	0,829	0,835	0,841	0,847	0,853	0,858	0,864
3,0	0,757	0,762	0,768	0,773	0,779	0,784	0,790	0,795	0,801	0,806
2,0	0,705	0,710	0,715	0,720	0,726	0,731	0,736	0,741	0,748	0,752
1,0	0,657	0,662	0,666	0,671	0,676	0,681	0,686	0,690	0,695	0,700
0,0	0,611	0,616	0,620	0,621	0,629	0,634	0,638	0,643	0,647	0,652
-1,0	0,563	0,568	0,572	0,577	0,582	0,587	0,592	0,596	0,601	0,606
-2,0	0,518	0,522	0,527	0,531	0,535	0,540	0,544	0,549	0,554	0,558
-3,0	0,476	0,480	0,484	0,488	0,492	0,497	0,501	0,505	0,509	0,514
-4,0	0,438	0,441	0,445	0,449	0,453	0,457	0,460	0,464	0,468	0,472
-5,0	0,402	0,405	0,409	0,412	0,416	0,419	0,423	0,427	0,430	0,434
-6,0	0,369	0,172	0,375	0,378	0,382	0,385	0,388	0,392	0,395	0,398
-7,0	0,338	0,141	0,344	0,347	0,350	0,353	0,356	0,359	0,363	0,388
-8,0	0,310	0,313	0,316	0,318	0,321	0,324	0,327	0,330	0,332	0,315
-9,0	0,284	0,286	0,289	0,292	0,294	0,297	0,299	0,302	0,305	0,307
-10,0	0,260	0,262	0,265	0,267	0,269	0,272	0,274	0,277	0,279	0,281

Tabella 4-9 Pressione di saturazione del vapore  $P_{sat}$  [KPa] in funzione della temperatura.

Eseguendo i calcoli con il software commerciale gratuito Termus G<sup>14</sup> in cui sono stati inseriti i dati di Tabella 4-10, si ottiene, sempre con riferimento alla zona climatica di Bologna, il diagramma delle pressioni (Figura 4-27)

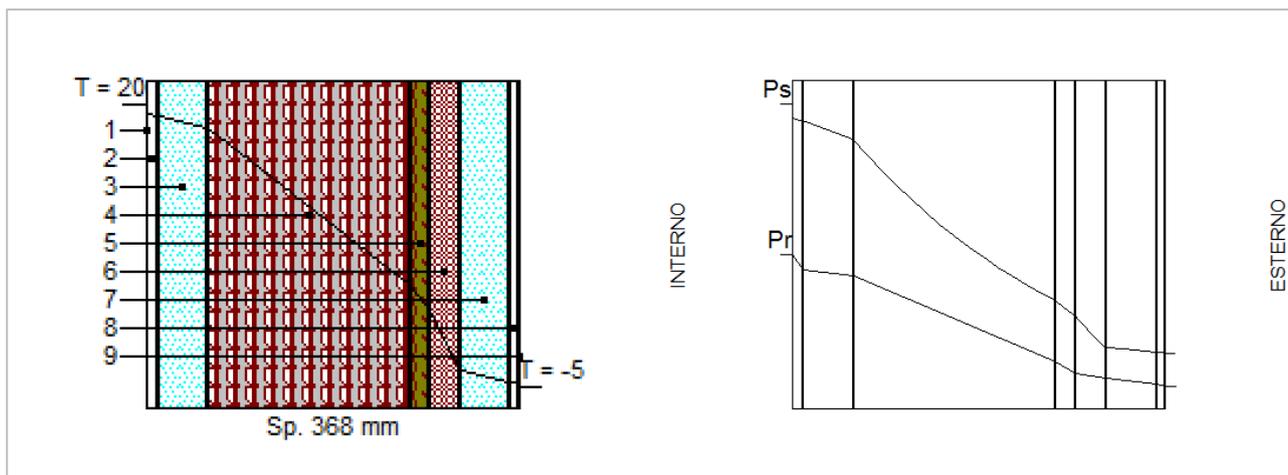


Figura 4-27 Diagramma delle pressioni per la parete

$T_i$ [°C]	$P_{si}$ [Pa]	$P_{ri}$ [Pa]	$U_{Ri}$ [%]	$T_e$ [°C]	$P_{se}$ [Pa]	$P_{re}$ [Pa]	$U_{Re}$ [%]
20,0	2337	1168	50,0	-5,0	401	148	37,0

Tabella 4-10 Valori del diagramma delle pressioni

Dove:

$T_i$  = Temperatura interna;

$P_{si}$  = Pressione di saturazione interna;

$P_{ri}$  = Pressione relativa interna;

$U_{Ri}$  = Umidità relativa interna;

$T_e$  = Temperatura esterna;

$P_{se}$  = Pressione di saturazione esterna;

$P_{re}$  = Pressione relativa esterna;

$U_{Re}$  = Umidità relativa esterna.

La verifica igrometrica è stata eseguita secondo UNI EN ISO 13788 che risulta la norma più aggiornata in ambito di formazione di condensa in strutture edilizie (Tabella 4-11). Scopo della ISO 13788 è fornire procedure di calcolo per valutare la capacità di un componente edilizio di evitare problemi dovuti a umidità superficiale critica ed a condensa interstiziale. Le ipotesi fondamentali delle procedure di calcolo sono di operare in regime stazionario e su base mensile. Rispetto alle norme precedenti, oltre alla verifica interstiziale, introduce la procedura di verifica dell'umidità superficiale critica

	$U_{Ri}$	$T_i$	$U_{Re}$	$T_e$
<b>Gen.</b>	58,2	20,0	89,5	2,1
<b>Feb.</b>	58,2	20,0	86,8	4,6
<b>Mar.</b>	54,6	20,0	71,9	9,4
<b>Apr.</b>	56,5	20,0	67,0	14,2
<b>Mag.</b>	71,4	18,2	67,9	18,2
<b>Giu.</b>	64,7	22,9	64,7	22,9
<b>Lug.</b>	56,6	25,4	56,6	25,4
<b>Ago.</b>	60,5	24,9	60,5	24,9
<b>Set.</b>	64,0	21,2	64,0	21,2
<b>Ott.</b>	62,8	20,0	74,5	14,9
<b>Nov.</b>	60,5	20,0	85,0	8,7
<b>Dic.</b>	57,7	20,0	86,1	4,0

Tabella 4-11 Verifica igrometrica annuale

Rispetto alle condizioni climatiche del comune di Bologna il pacchetto in esame risulta verificato rispetto alla formazione di condensa interstiziale. Anche la verifica dell'umidità superficiale critica risulta superata con un valore massimo ammissibile di  $U = 0,9476 \text{ W/m}^2\text{K}$  in gennaio che risulta il mese più critico.

I valori relativi ai calcoli mensili sono raccolti in Tabella 4-12 da cui sono stati ricavati i diagrammi delle pressioni mensili (Figura 4-28).

	$T_i$ [°C]	$P_{si}$ [Pa]	$P_{ri}$ [Pa]	$U_{Ri}$ [%]	$T_e$ [°C]	$P_{se}$ [Pa]	$P_{re}$ [Pa]	$U_{Re}$ [%]
<b>Gen.</b>	20,0	2337,0	1360,1	58,2	2,1	710,4	635,8	89,5
<b>Feb.</b>	20,0	2337,0	1360,1	58,2	4,6	847,8	735,9	86,8
<b>Mar.</b>	20,0	2337,0	1276,0	54,6	9,4	1178,8	847,6	71,9
<b>Apr.</b>	20,0	2337,0	1320,4	56,5	14,2	1618,6	1084,5	67,0
<b>Mag.</b>	18,2	2088,9	1491,5	71,4	18,2	2088,9	1418,4	67,9
<b>Giu.</b>	22,9	2790,9	1805,7	64,7	22,9	2790,9	1805,7	64,7
<b>Lug.</b>	25,4	3242,1	1835,0	56,6	25,4	3242,1	1835,0	56,6
<b>Ago.</b>	24,9	3147,1	1904,0	60,5	24,9	3147,1	1904,0	60,5
<b>Set.</b>	21,2	2516,3	1610,4	64,0	21,2	2516,3	1610,4	64,0
<b>Ott.</b>	20,0	2337,0	1467,6	62,8	14,9	1693,5	1261,6	74,5
<b>Nov.</b>	20,0	2337,0	1413,9	60,5	8,7	1124,4	955,7	85,0
<b>Dic.</b>	20,0	2337,0	1348,4	57,7	4,0	812,8	699,9	86,1

Tabella 4-12 Valori delle pressioni di saturazione mensili

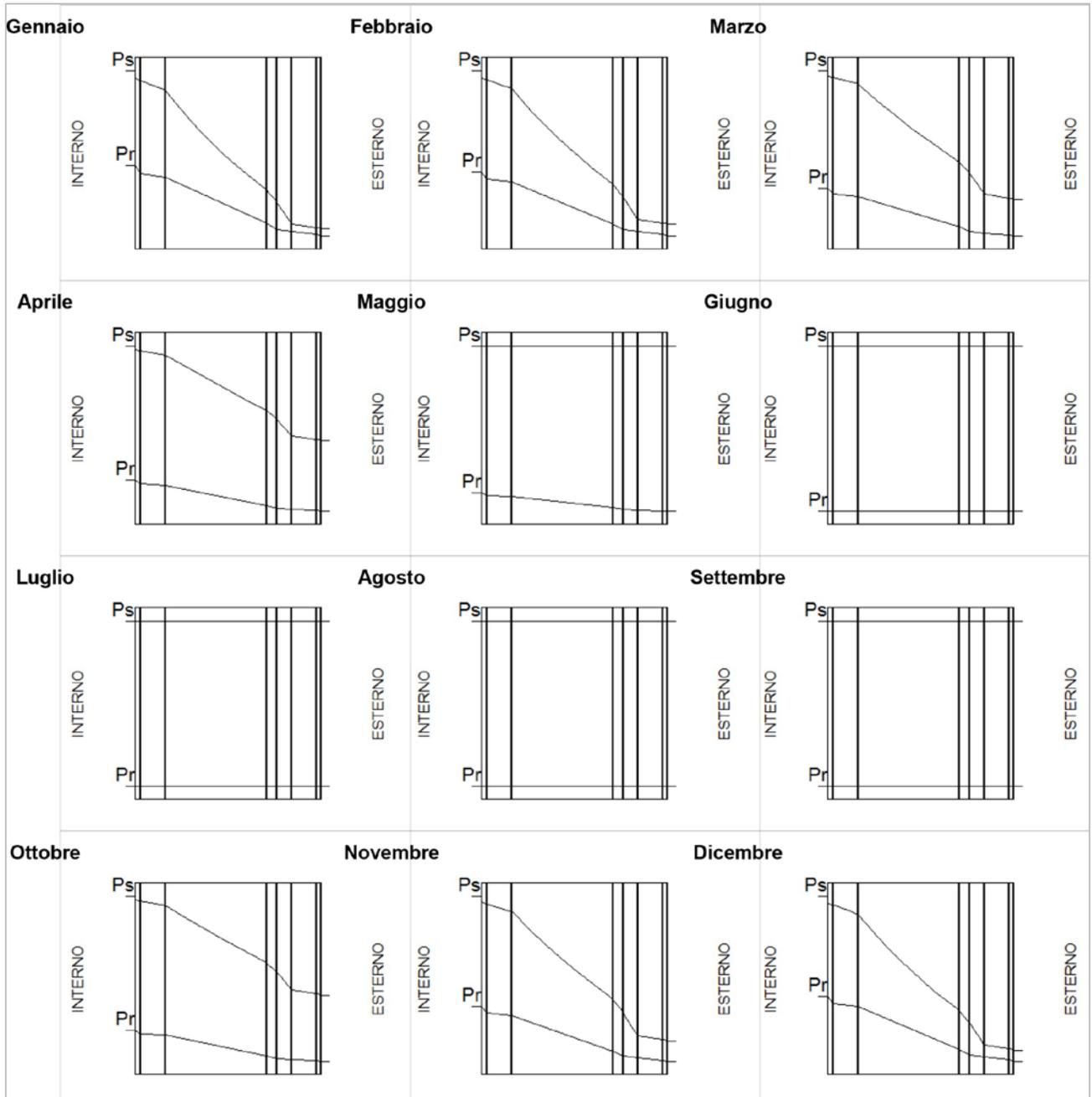


Figura 4-28 Diagrammi delle pressioni mensili

### 4.3 PROGETTAZIONE PARAMETRICA

---

Nei capitoli precedenti è stato analizzato dal punto di vista tecnico il sistema strutturale INTEGRO BS 400, evidenziandone tutte le caratteristiche intrinseche. Dato il carattere modulare con cui è stato ideato e sviluppato, si vuole ora verificare come queste caratteristiche possano essere applicate allo sviluppo di un progetto architettonico di un edificio residenziale.

Non è stato scelto un approccio puramente compositivo di ricerca di una forma architettonica, ma l'indagine si è focalizzata sullo sviluppo di un metodo, attraverso il quale si potessero esplorare nuovi approcci al processo di progettazione architettonica. Si è affrontato cioè il problema progettuale da un punto di vista alternativo, che colloca in una prospettiva diversa i ruoli consolidati di processo e di risultato, focalizzando l'attenzione sul primo piuttosto che sul secondo.

*“Qui, l’investimento principale è in una progettazione metodologica, intellettuale.”<sup>15</sup>*

I metodi e processi progettuali noti e consolidati dell'architettura contemporanea si basano principalmente su approcci di progettazione che sono caratterizzati da una relazione gerarchica che privilegia la definizione della forma alla sua successiva materializzazione. Questi approcci, però, possono definire le proprietà e le logiche dei sistemi costruttivi adottati ma non interagire con esse.

In questo caso invece, il punto di partenza della progettazione è proprio il sistema elaborato in precedenza. Saranno pertanto proprio le caratteristiche intrinseche di questo che dovranno divenire gli elementi per dare il via ad un percorso esplorativo di ricerca processuale. Focalizzandosi sul metodo si potranno ottenere soluzioni inattese, al punto da rendere del tutto imprevedibile, o quantomeno sfumato, il prodotto finale cercato. Il progetto finale non sarà quindi il prodotto di un processo compositivo in cui il sistema costruttivo si pone a supporto della forma, ma piuttosto la ricerca formale sarà sostenuta da una serie di ricerche analitiche iterative, definite a partire dalle caratteristiche ritenute centrali del sistema stesso, e sarà dunque piena espressione delle potenzialità di quest'ultimo.

*“Quando il risultato guida il processo andremo sempre e solo dove siamo già stati. Se, invece, il processo guida il risultato, potremmo non sapere dove stiamo andando ma sapremo di essere nella direzione giusta.”<sup>16</sup>*

## 4.3.1 METODO COMPUTAZIONALE

Lo sviluppo di un processo compositivo, basato sui presupposti sopra descritti viene qui affrontato attraverso un approccio computazionale. In primo luogo si individua il problema e poi lo si sviluppa attraverso un software, in cui la complessità delle informazioni prese in considerazione è organizzata in un sistema definito di relazioni tra le parti, che sono controllate e gestite attraverso strumenti digitali di progettazione parametrica in grado di fornire un ampio spettro di soluzioni compatibili. L'utilizzo di un supporto software è stato quindi fondamentale per riuscire ad avere un completo controllo sul processo, per riuscire a gestire e ordinare tutte le informazioni e le soluzioni ottenute.

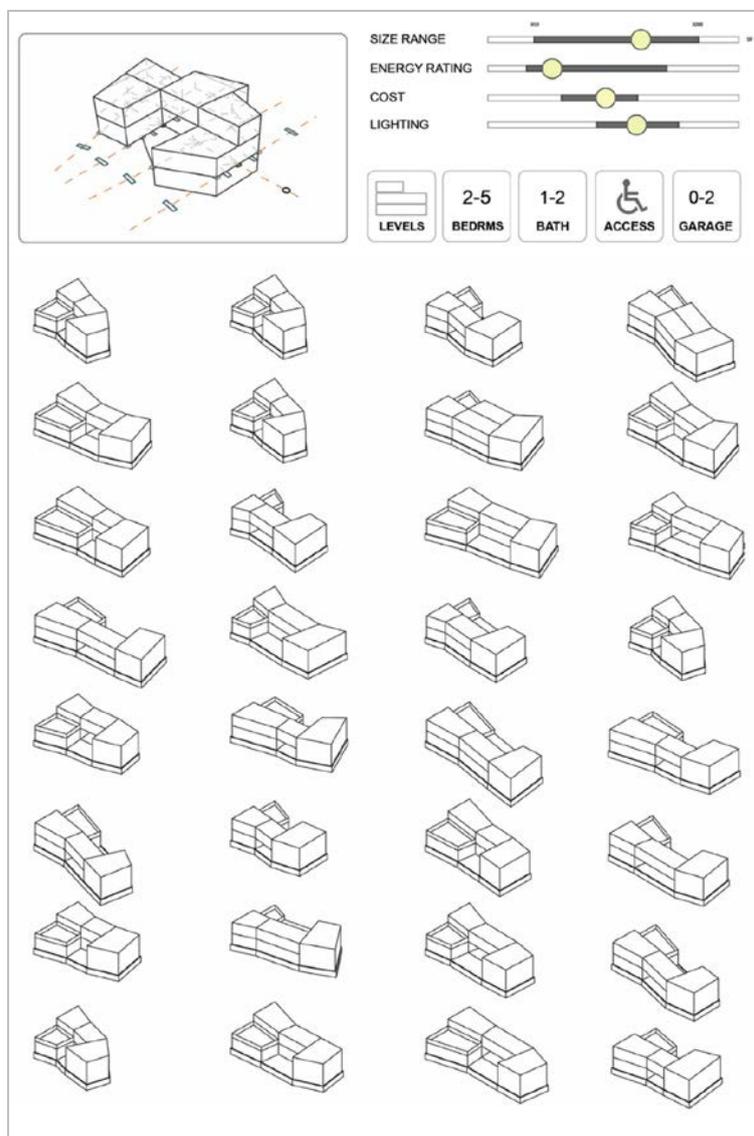


Figura 4-29 Esempio di progettazione parametrica. Elenco di soluzioni candidate a partire da un modello parametrico flessibile (FPM Flexible Parametric Model) - Image by Cory Mogk su Dreamcatcher Home Design

Nello specifico il “*Computational thinking*”, tradotto in approccio computazionale, si può descrivere come una “*strumentalizzazione del calcolo*”, che genera una o più soluzioni a partire da un problema aperto.

Il problema fornisce delle risposte coerenti e significative a partire da una molteplicità di variabili, le quali devono essere discretizzate, generalizzate e rappresentate sotto forma di dati gestibili dal software. L’impostazione del problema richiede la decomposizione dell’intero processo decisionale che guida il progetto, nonché la discretizzazione delle variabili in gioco, e garantisce che le possibili soluzioni siano basate esclusivamente sui parametri e sulle limitazioni imposti attraverso il problema stesso.

Con questo metodo si mira quindi a migliorare la qualità e lo scambio dei dati tra le parti, escludendo a priori la presenza di errori e sviluppando un alto numero di soluzioni, altrimenti non gestibili in un processo manuale. Si riesce così ad aumentare l’efficienza del processo progettuale e ad assicurare che il risultato finale sia conforme agli obiettivi preposti (Figura 4-29).

Infine è importante sottolineare che la tecnologia per la modellazione digitale e gli strumenti parametrici, che al giorno d’oggi hanno un grandissimo impatto sulla pratica professionale, consentono di assumere un approccio di carattere maggiormente scientifico-matematico nella definizione del progetto di architettura. Vengono facilitate, di conseguenza, la comprensione delle dinamiche coinvolgenti l’oggetto di interesse, con vantaggi immediati in termini di controllo delle geometrie in base ai parametri richiesti.

#### 4.3.1.1 GLI STRUMENTI UTILIZZATI

Per strumenti parametrici si intende un folto gruppo di software per la programmazione digitale. Per lo sviluppo di questo lavoro si è utilizzato “*Grasshopper®*”, un plug-in open source del programma CAD Rhinoceros 3D<sup>17</sup> per la modellazione virtuale. La particolarità di Grasshopper consiste nell’aver tradotto la sintassi della programmazione in un’interfaccia visuale. Il Linguaggio di Programmazione Visuale o “*Visual Programming Language*”<sup>18</sup> è un linguaggio che consente la programmazione tramite la manipolazione grafica di elementi e non tramite sintassi scritta. In questo modo il programma introduce un’esperienza alternativa di interazione con il software in modo da configurare e manipolare il sistema dei legami parametrici, che organizza le differenti caratterizzazioni di un modello, esclusivamente attraverso un diagramma grafico. La forma quindi non è più ottenuta secondo la logica additiva tipica dei CAD o la modellazione virtuale come avviene con i software di modellazione 3D, ma è generata attraverso una sequenza ordinata di istruzioni ovvero un algoritmo<sup>19</sup>

L'algoritmo costituisce lo strumento pratico secondo cui opera il programma. Nel suo senso più ampio, il concetto di algoritmo è applicabile a tutte le discipline e non si riferisce solamente al campo informatico. Ci si riferisce, in generale, ad un procedimento che sia in grado di risolvere un problema attraverso un numero determinato e finito di passi elementari ed è alla base della nozione teorica di calcolabilità. Ne segue che un problema è calcolabile quando è risolvibile mediante un algoritmo.

Dalla precedente definizione si evincono alcune proprietà necessarie, senza le quali un algoritmo non può essere definito tale:

- Atomicità: i passi costituenti devono essere elementari, ovvero non ulteriormente scomponibili;
- Non ambiguità: i passi costituenti devono essere interpretabili in modo diretto e univoco;
- Finitezza: l'algoritmo deve essere composto da un numero finito di passi e richiedere una quantità finita di dati in ingresso;
- Terminazione: l'esecuzione deve avere termine dopo un tempo finito;
- Effettività: l'esecuzione deve portare a un risultato univoco;
- Determinismo: a ogni passo, il successivo deve essere uno e uno solo, ben determinato;

Con particolare riferimento all'informatica, preso un problema da automatizzare, la programmazione consiste essenzialmente nella traduzione di un algoritmo per la soluzione di tale problema in programma, scritto in un certo linguaggio, che può essere effettivamente eseguito da un calcolatore.

Ciò che è possibile fare attraverso il software Grasshopper consiste nel rappresentare l'algoritmo graficamente sotto forma di una sorta di diagramma di flusso e quindi di "vedere" nella sua globalità il problema discretizzato come un elenco interconnesso e finito di istruzioni univocamente interpretabili, la cui esecuzione fornisce risultati precisi, gli "output", a seconda dei dati di ingresso, gli "input".

Si ottiene così un sistema costituito da uno scheletro principale che si adatta alle condizioni specifiche definite dai dati di input, dalle variabili che possono oscillare fra limiti definiti o dalla impostazione di determinati parametri. In questo modo il campo delle possibilità che si aprono è multiforme e complesso e il processo di progressiva differenziazione si traduce una ricerca stocastica, casuale, che genera le diverse soluzioni possibili.

Tutte le soluzioni trovate saranno candidate alla definizione della forma finale del progetto e saranno il prodotto di un processo che esamina l'informazione e la forma separatamente. La forma in

divenire che si trasforma nel corso dell'approccio progettuale e di ricerca qui seguito, è quindi sempre generata dalle possibilità e dai vincoli della sua effettiva materializzazione, in quanto le sue proprietà e la portata della fluttuazione delle sue variabili sono integrate al sistema strutturale definito in precedenza. Il processo offre quindi l'opportunità di raggiungere una totale sinergia tra modello costruttivo e forma finale.

A questo punto è necessario specificare un glossario minimo con alcuni termini che verranno più volte utilizzati nel prosieguo:

- Input: costituiscono il set di dati a fondamento del problema, ovvero l'insieme di informazioni di partenza. In questo caso risultano dall'analisi del relativo sistema materiale (il sistema costruttivo) e cioè dall'analisi della materialità, delle proprietà fisiche, dei vincoli e delle logiche dei processi produttivi e di assemblaggio.
- Variabile: una variabile è una quantità che assume liberamente tutti i valori in un certo range ed è direttamente modificabile.
- Parametro: indica una grandezza caratteristica del sistema. Spesso confuso con il termine "variabile", ma è più specifico. Il termine deriva dal greco "para" = prima + "metron" = metro e infatti si riferisce a qualcosa che viene prima della misura. È una quantità che può assumere anch'essa diversi valori, ma uno alla volta, diventando una costante; cioè si fissa un valore del parametro tra quelli possibili, e si studia il problema che ne risulta. Qui i parametri vengono assegnati sempre a partire dal sistema costruttivo ma anche considerando aspetti quali criteri normativi, prestazionali, criteri spaziali, o il rispetto di leggi per l'adattamento del sistema alle più eterogenee influenze esterne.
- Condizioni: il corpo dell'algoritmo è strutturato in modo che vengano rispettate determinate regole e limitazioni che io chiamerò "condizioni".
- Iterazione: ripetizione di una serie di step. Un'iterazione crea una variazione ad ogni passo attraverso lo stesso set di istruzioni ripetuto.
- Output: il risultato o l'insieme dei risultati prodotti.

#### *4.3.1.2 UNO STRUMENTO NEUTRALE*

Bisogna precisare che l'approccio computazionale come sopra descritto non è per nulla volto a rimpiazzare il progettista con il progetto guidato dal computer, ma piuttosto lo si deve intendere come uno strumento "neutrale" di indagine ed approfondimento, un valido aiuto nella gestione dei dati complessi ed eterogenei coinvolgenti il progetto.

Infatti a causa del fatto che la maggior parte delle variabili della progettazione hanno bisogno di essere definite all'inizio dei processi di ricerca computerizzata della forma, questi ultimi assumono un carattere analitico, piuttosto che uno di processo progettuale generativo.

Il risultato finale ottenuto in questo capitolo, è una sorta di software di supporto alla progettazione diviso in tre step posti tra di loro in una rigida gerarchia sequenziale. Le tre parti sono costituite da tre algoritmi di diverso tipo ciascuno dei quali si interfaccia con tematiche differenti che spaziano dalla ricerca di forma, all'analisi funzionale, all'analisi della compatibilità tipologica. Sebbene il lavoro sia diviso in parti, se si considerano congiuntamente i tre algoritmi, assieme alle relative scelte degli input, dei parametri e delle variabili imposte, si può vedere che l'intero processo costituisce l'"anima di un software" unico.

Nel suo complesso infatti il processo porterà alla definizione di una serie di informazioni catalogate sotto forma di abaco da cui il progettista potrà attingere per la definizione finale e la restituzione del progetto di un edificio residenziale.

Ciascuna parte affronta diversi temi, ognuno relativo ad una specifica fase del processo:

1. Algoritmo per l'aggregazione dei moduli: si sviluppa in riferimento al concetto di modulo. A partire dalle caratteristiche geometriche del sistema strutturale si individua un modulo e si studiano le possibilità di aggregazione di questo.
2. Algoritmo per lo studio funzionale: si studia la disposizione funzionale degli ambienti all'interno di una unità abitativa, costituita da un certo numero di moduli base.
3. Algoritmo per la compatibilità tipologica: mostra come il sistema costruttivo sia adattabile a diverse situazioni in base alle caratteristiche dell'edificio stesso.

---

#### 4.3.2 ALGORITMO PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI

---

Attraverso l'analisi del sistema INTEGRO BS 400 si è arrivati alla definizione di un'unità modulare base. Si è già visto come siano state definite, secondo precisi parametri, le dimensioni dell'elemento modulare e della parete stessa attraverso il dimensionamento del mattone-modulo e la definizione di un interasse da pilastro a pilastro conforme alla destinazione d'uso stabilita. Si è arrivati dunque a definire un'unità modulare, una cellula elementare che delimita un ambiente abitabile minimo, il quale è individuato da un parallelepipedo di base quadrata, di lato 4m e di altezza 3m (Figura 4-30). Si tratta di una "cellula", la cui ripetizione e aggregazione porterà alla definizione

dell'organismo architettonico. Lo studio delle possibilità di aggregazione di tale modulo costituisce il fulcro del primo dei tre passaggi sviluppati attraverso la modellazione algoritmica.

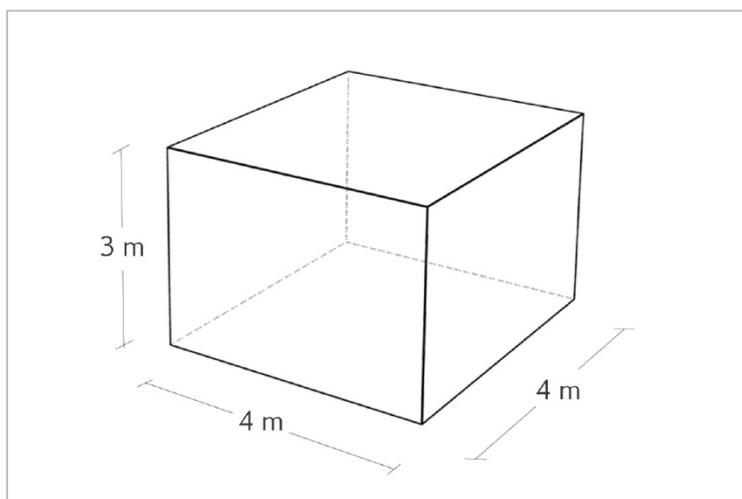


Figura 4-30 Caratteristiche geometriche del modulo base

Il modulo individuato è l'input del problema mentre le aggregazioni possibili fra più moduli saranno l'output. Queste costituiranno la forma di un'unità abitativa, cioè di un singolo appartamento, che infatti non è altro che uno spazio architettonico composto da uno o più ambienti tra loro legati ma indipendenti.

Studiare qualitativamente e quantitativamente le possibilità di aggregazione degli elementi modulari può rivelarsi un lavoro molto complesso e variegato. Il primo passo è stato quindi quello di limitare il campo d'azione in cui si possono muovere le geometrie: il meccanismo di aggregazione dei moduli non è completamente libero nello spazio, ma è guidato da una serie di regole, che verranno chiamate "condizioni", le quali derivano dalle caratteristiche del sistema costruttivo e dai principi che guidano il progetto i quali sono l'economicità, la fattibilità, la sostenibilità. Il sistema costruttivo prevede un telaio strutturale puntiforme e di luce fissa a 4m, pertanto si avranno sempre moduli uguali fra di loro affiancati l'uno all'altro senza slittamenti, variazioni d'angolo o compenetrazioni. Questa caratteristica pone un forte limite dal punto di vista compositivo ed è perfettamente in linea con il principio di fattibilità economica e costruttiva cui il progetto si vuole attenere, perché in questo modo tutti gli elementi che compaiono nel progetto saranno uguali l'uno all'altro, seriali e componibili sempre nel medesimo modo.

Questi presupposti si trasformano, all'interno del software, in una precisa legge di aggregazione del modulo base. Due moduli, infatti, si potranno affiancare solo ed esclusivamente in modo che una faccia laterale del primo coincida perfettamente con una faccia laterale del secondo, in modo che tutti e quattro gli spigoli della prima faccia coincidano con quelli della seconda.

Inizialmente si è tentato un approccio più compositivo, di "*formfinding*", in cui l'aggregazione dei moduli avveniva in modo puramente casuale attraverso una ricerca iterativa e stocastica. L'incertezza del risultato era troppo alta e spesso la convergenza verso soluzioni accettabili risultava troppo lunga. Il metodo cercato invece, doveva essere tale da produrre un tool utile al progettista e di supporto vero e concreto alla progettazione; quindi avrebbe dovuto produrre un insieme di soluzioni univoche, non ambigue e di numero finito.

Il modo migliore per calcolare le soluzioni al problema è stato ritenuto quello di utilizzare un algoritmo iterativo, tramite il quale si è riusciti a compilare un abaco dei risultati completo, contenente tutte le soluzioni possibili. Un algoritmo iterativo è una tipologia di algoritmo costituito da una sequenza di azioni che viene ripetuta, finché è necessaria la ripetizione stessa ma per un numero finito di volte. Ad ogni iterazione l'algoritmo svolge un compito e crea una variazione. Nello specifico, dato un cubo di partenza, ad ogni iterazione si aggiunge un cubo e lo si colloca in tutte le posizioni possibili che sono tante quante sono le facce esterne della geometria precedente. Ogni geometria in output costituisce l'input per l'iterazione successiva.

Rispetto all'alta controllabilità di questo procedimento, l'aspetto negativo di questo metodo è che gran parte delle soluzioni trovate sono duplicati. La percentuale dei duplicati sul numero di soluzioni totali varia, a seconda dell'iterazione, dal 66 al 77%. Questi output è necessario escluderli manualmente e di conseguenza al termine di ogni iterazione vi è una parte di analisi delle soluzioni, dalle quali si individua una lista ridotta di soluzioni effettive. Ciascun elemento di questa lista costituirà l'input per l'iterazione successiva che verrà ripetuta tante volte quante sono le soluzioni della precedente.

Si è deciso di elaborare le iterazioni fino alla settima, in modo da ottenere i risultati per l'aggregazione fino ad un totale di 7 moduli base. Questo sostanzialmente per due motivi. A 7 cubi corrisponderebbero infatti unità abitative di 112mq che costituisce il taglio massimo di appartamento ipotizzabile. Inoltre per elaborare l'ottava iterazione significherebbe avere 1670 soluzioni da gestire e analizzare, da cui escludere i duplicati, e potrebbe rivelarsi una mole di lavoro onerosa se non supportata da un calcolatore.

#### 4.3.2.1 L'ALGORITMO

Di seguito si descrive l'algoritmo, senza entrare nel dettaglio ma con l'indicazione dei principali componenti utilizzati e la descrizione step-by-step della struttura effettiva dell'algoritmo (Tabella 4-13).

Algoritmo per l'aggregazione del modulo		
Caratteristica	Valore	Descrizione
Input	Modulo	Si tratta di una geometria identificata da un volume di 4x4x3 m; ovvero un singolo blocco
Condizioni	Facce coincidenti	La legge di aggregazione del modulo base impone che due moduli si possano affiancare solo ed esclusivamente in modo che una faccia laterale del primo coincida perfettamente con una faccia laterale del secondo
	Nessuna sovrapposizione	
Parametro	N° Blocchi	Numero intero che varia da 1 a 7  Il parametro, che è possibile impostare all'inizio di ogni iterazione, caratterizza l'iterazione stessa. Si studiano le aggregazioni di moduli a partire dal caso banale in cui vi è un singolo modulo fino ad un massimo di 7 moduli
Variabile	N° Posizioni	Numero intero che varia da 0 a X
		X coincide con il numero di facce libere della geometria di partenza
		È la variabile di ogni iterazione. Ad ogni valore assunto corrisponde un nuovo output
Output	Geometria di aggregazione	Geometria che costituisce i risultati dell'operazione
		Ogni geometria trovata rappresenta la "configurazione" che potrà assumere una unità abitativa

Tabella 4-13 Schema del primo algoritmo

La prima iterazione è elementare e si riduce alla collocazione nello spazio di un singolo modulo, il box di dimensioni 4x4x3m attraverso il componente "Center Box". I dati in input sono quindi un punto base e una geometria dimensionata. Questa geometria costituisce il dato di output e sarà poi il dato di input per l'iterazione successiva.

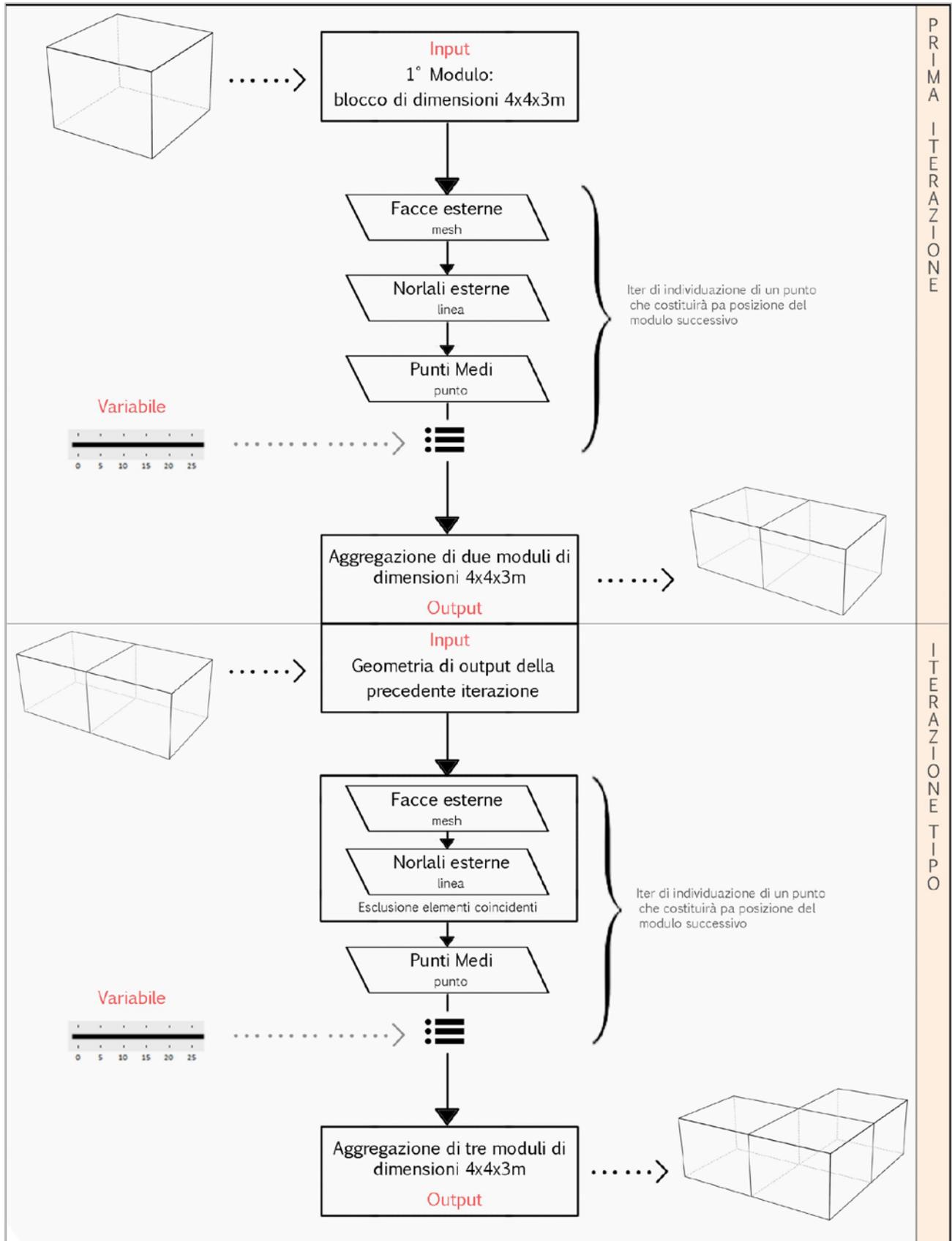


Figura 4-31 Diagramma di flusso dell' algoritmo iterative di aggregazione dei moduli

La seconda iterazione e quelle successive sono invece più elaborate e sono tutte identiche tra loro. Inizialmente il programma esamina la geometria importata. Il modulo viene diviso nelle sue sei facce attraverso il componente "*Deconstruct Brep*", le quali vengono inserite in una lista. Da questa lista di superfici piane il programma sceglie solamente le quattro facce laterali su cui lavorare ed esclude le due facce superiore e inferiore. A ciascuna delle quattro facce scelte il programma associa attraverso il comando "*Face Normals*" il relativo vettore normale con punto di applicazione nel baricentro, rivolto verso l'esterno del volume del box. Si modifica il modulo del vettore in modo che abbia una lunghezza pari a 4m, ovvero pari allo spigolo della base del modulo stesso. Si hanno a questo punto quattro linee e di queste si individuano i punti medi attraverso "*Point on Curve*". Ciascuno di questi ultimi punti trovati individuerà una possibile posizione del baricentro per il secondo box. Uno "*slider*" sceglie di volta in volta un singolo punto della lista e l'informazione è inviata mediante le coordinate del punto ad un secondo componente "*Center Box*", che associa al punto il secondo box. Al variare dello "*slider*" varia il punto scelto, quindi la posizione del secondo box e, di conseguenza, la geometria di output. Alla fine della seconda iterazione si otterrà quindi una geometria costituita da due box affiancati, il primo, quello di partenza, in posizione fissa e il secondo in posizione variabile. Questa geometria costituisce il dato di input per l'iterazione successiva. La terza e le successive iterazioni saranno uguali a quella precedente. (Figura 4-31)

L'algoritmo è quindi di tipo sequenziale e iterativo. Per poter analizzare il caso in cui ci sono 5, 6 o 7 blocchi, è necessario passare attraverso gli step in cui vi sono 1, 2 o 3 blocchi. Tuttavia per ovviare al fatto che un algoritmo di questo tipo potrebbe essere scomodo da utilizzare, vi sono numerose tecniche che permettono di raggruppare in un unico componente l'intero algoritmo e di utilizzarlo in modo nettamente più veloce e chiaro. Si è quindi creato un "*cluster*", il quale mette maggiormente in evidenza quali sono gli elementi fondamentali dell'algoritmo (input, variabili, parametro e output). Il componente permette di scegliere il numero di blocchi, ovvero di impostare un parametro ben preciso. Di fatto, se si imposta ad esempio il parametro a 4 unità di blocchi, il programma rimanda direttamente alla quarta iterazione, passando automaticamente attraverso le iterazioni precedenti. Una volta impostato il parametro, si possono generare tutte le possibili combinazioni di aggregazione con il numero di cubetti scelto.

#### 4.3.2.2 OUTPUT: I POLIMINI

Il risultato delle successive iterazioni sono delle figure geometriche ben precise che in matematica hanno un nome e una caratterizzazione: i polimini. Questi sono un sottogruppo delle poliforme che sono figure piane e non tridimensionali, ma il principio resta lo stesso.

Una poli-forma è una figura piana che è composta da due o più copie connesse di un dato poligono di base. Quasi sempre si tratta di un poligono convesso che può generare una tassellazione regolare del piano. Si possono costruire poliforme con quadrati, con triangoli isosceli, con triangoli rettangoli di angoli 30-60-90 gradi, con esagoni regolari e altre figure geometriche. Tra le poli-forme la più utilizzata è proprio il polimino che offre anche gli spunti più interessanti dal punto di vista combinatorio. Lo studio dei polimini consiste nello stabilire il numero di differenti tipi che si possono ottenere in funzione del numero (n) di celle formate dal quadrato di base e dalle regole di costruzione. Purtroppo, come ho accennato sopra, non esiste una formula generale per farlo, anche se esistono diversi algoritmi (uno dei quali è quello descritto sopra) che permettono una stima affidabile. In generale si è stimato che il numero di n-polimini cresce esponenzialmente all'aumentare di (n).

Fu il californiano Solomon W. Golomb<sup>20</sup> ad assegnare il nome a questa famiglia di figure, in una conferenza che tenne nel 1953. Il termine fu poi reso popolare da Martin Gardner. Proprio perché non vi è una soluzione univoca, le poli-forme sono una ricca fonte di problemi, rompicapi e giochi matematici, in gran parte basati sulla possibilità di tassellare figure assegnate o l'intero piano. La storia di questi passatempi logico-matematici attraversa tutto il Novecento, e coinvolge figure di esperti di matematica ricreativa e creatori di rompicapi, come l'inglese Henry Dudeney<sup>21</sup> nella prima metà del secolo o l'americano Martin Gardner<sup>22</sup> nella seconda. Di giochi con i polimini infatti si ha notizia già nel 1907, quando Dudeney ne pubblicò uno nei *Canterbury Puzzles*. Si trattava di un gioco con i pentamini, ma allora fu presentato come un problema di dissezione di un rettangolo.<sup>23</sup> Martin Gardner rese popolare il rompicapo del pentamino, che è il polimino composto da cinque quadrati identici connessi tra di loro lungo dei lati, chiedendo di riempire diversi rettangoli di area 60 utilizzando un insieme di tutti i 12 pentamini esistenti. Il più tipico rompicapo di questo tipo consiste nel tassellare un rettangolo di 6×10 quadrati: esistono 2339 soluzioni (Figura 4-32). L'esempio sicuramente più noto è certamente il videogame "Tetris"<sup>24</sup> i cui elementi base sono appunto dei tetramini, ciascuno composto da quattro blocchi. Il termine Tetris deriva appunto da tetramino. I tetramini cadono giù uno alla volta e il compito del giocatore è ruotarli e/o muoverli in modo che creino una riga orizzontale di blocchi senza interruzioni. Quando la riga è stata creata, i mattoni spariscono e i pezzi sovrastanti, se presenti, cadono a formare nuove linee.

Le forme dei tetramini sono il risultato di tutte le possibili combinazioni che si possono ottenere disponendo 4 quadrati, ciascuno dei quali ha almeno un lato in comune con almeno uno degli altri tre quadrati. Le sette possibili combinazioni in Tetris sono chiamate come le corrispondenti lettere dell'alfabeto che più si avvicinano alla forma del pezzo: I, T, O, L, J, S, e Z.

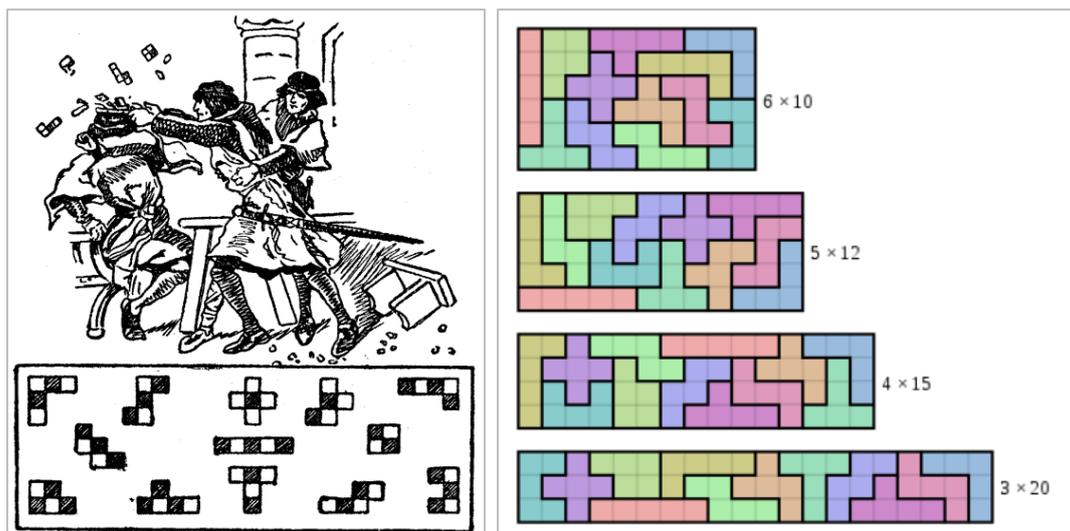


Figura 4-32 A sinistra: "The Broken Chessboard" di Henry Ernest Dudeney da "The Canterbury Puzzles"

A destra: Utilizzo dei pentamini nella tassellazione del rettangolo di Martin Gardner (<https://plus.maths.org/content/five-martin-gardner-eye-openers-involving-squares-and-cubes>)

I polimini sono classificati in base al numero di quadrati, come segue (Tabella 4-14):

N°	Nome	liberi	forati	non forati	unilaterali	fissi
1	<b>Monomino</b>	1	0	1	1	1
2	<b>Domino</b>	1	0	1	1	2
3	<b>Tromino</b>	2	0	2	2	6
4	<b>Tetromino</b>	5	0	5	7	19
5	<b>Pentomino</b>	12	0	12	18	63
6	<b>Hexomino</b>	36	0	35	60	216
7	<b>Heptomino</b>	108	1	107	196	760
8	<b>Octomino</b>	369	6	363	704	2725
9	<b>Nonomino</b>	1285	37	1248	2500	9910
10	<b>Decomino</b>	4655	195	4460	9189	36446
11	<b>Undecomino</b>	17073	979	16094	33896	135268
12	<b>Dodecomino</b>	63600	4663	58937	126759	505861

Tabella 4-14 Classificazione dei polimini

Con riferimento alla tabella si hanno:

- N° = numero di quadrati base
- Nome = denominazione del polimino.
- polimini liberi = un polimino si dice libero quando non si ricava da una trasformazione rigida (traslazione, rotazione o riflessione) di un altro polimino.

- polimini forati = sono quei polimini che presentano un vuoto al loro interno.
- polimini non forati = sono polimini "aperti", che non presentano un vuoto al loro interno.
- polimini unilaterali = polimini che non si ricavano da una riflessione di un altro polimino.
- polimini fissi = tutti i polimini che non possono essere né traslati, né ruotati, né riflessi.

Per ogni singola iterazione il programma ha prodotto un grande numero di soluzioni rappresentate da polimini di diverso ordine, ciascuna numerata in modo preciso attraverso un codice di identificazione. A partire da queste si è dovuto proseguire con un'operazione manuale di scrematura per escludere le soluzioni presenti in duplicato e classificare quelle uniche. Si sono dunque isolate, per ogni iterazione, le soluzioni riguardanti i polimini liberi. L'insieme delle soluzioni idonee sarà costituito da geometrie tutte diverse l'una dall'altra e tali per cui nessuna sia il risultato di una trasformazione rigida (rotazione, traslazione, riflessione) a partire da un'altra soluzione che di conseguenza vengono scartate.

L'intera operazione segue sempre un andamento iterativo. Trovati i risultati del primo step si isolano le soluzioni uniche e solamente con queste si procede con il secondo step aggiungendo ad ognuna un modulo. Di nuovo si avrà una grande mole di soluzioni le quali saranno scremate e ridotte a soluzioni uniche. Nuovamente solo su queste si procede con l'aggiunta di un ulteriore modulo. Si potrebbe continuare in questo modo all'infinito tuttavia, tenendo conto che il lavoro di "scrematura" delle soluzioni generali si fa già abbastanza oneroso alla settima iterazione, è opportuno porre un limite che in questo caso si riferisce alla dimensione massima desiderata per un'unità abitativa. I risultati delle prime sette iterazioni sono riportati in appendice mentre di seguito sono riportati in tabella solo i risultati più significativi<sup>25</sup>. (Tabella 4-15)

iterazione	n° blocchi	n° iterazioni	n° soluzioni accettabili	n° soluzioni scartate	n° valori S/V	S/V (mq)
<b>I</b>	1	1	1	0	1	1,67
<b>II</b>	2	4	1	3	1	1,42
<b>III</b>	3	6	2	4	1	1,33
<b>IV</b>	4	16	5	11	2	1,29
						1,17
<b>V</b>	5	48	12	36	2	1,27
						1,17
<b>VI</b>	6	142	35	47	3	1,25
						1,17
						1,08
<b>VII</b>	7	472	108	364	3	1,24
						1,17
						1,1

Tabella 4-15 Tabella riassuntiva delle prime sette iterazioni per la ricerca dei polimini

#### 4.3.2.3 CONDIZIONI DI SCELTA: IL RAPPORTO S/V

Ora si è dunque stesa una lista di soluzioni univoche, finite, discrete, ma fra queste quali sono le soluzioni "migliori" per lo scopo prefissato?

Una delle caratteristiche chiave dell'unità immobiliare da analizzare, che deriva direttamente della sua forma, è la compattezza. La compattezza si misura con il rapporto S/V tra la superficie esposta all'esterno ed il volume dell'unità abitativa. Minore è, a parità di volume, la superficie verso l'esterno, più un edificio è compatto. Questo parametro influenza le prestazioni energetiche dell'unità abitativa, quindi più questa è compatta, con un rapporto S/V piccolo, tanto migliore possiamo considerarla dal punto di vista energetico.

La figura solida per la quale il parametro della compattezza è il massimo possibile, è la sfera, ma è evidente che una figura del genere non è utilizzabile in edilizia. La forma geometrica che più si avvicina alla sfera per caratteristiche di compattezza e maggiormente utile allo scopo della progettazione parametrica di unità abitative è il cubo. La forma cubica, inoltre, è quella ideale nel caso di pareti con la stessa trasmittanza termica. Viceversa, nella realtà, la copertura per esempio, è caratterizzata da una trasmittanza diversa da quella delle altre pareti, pertanto, al fine di ottenere un equilibrio termico complessivo, si opta per una forma parallelepipedica con pareti diversamente caratterizzate a seconda delle esposizioni.

Dunque, per tutte le soluzioni trovate si è calcolato il rapporto S/V e si sono diversificate le soluzioni classificandole tra "migliori" o "peggiori". Questa operazione non deve essere fatta sulla totalità delle soluzioni trovate, ma per gruppi, confrontando fra di loro solo le soluzioni di una stessa iterazione, perché avranno lo stesso volume. Questo accorgimento è necessario, perché se in un cubo si aumentano le dimensioni di uno spigolo, la superficie aumenta secondo i quadrati, mentre i volumi aumentano secondo i cubi. Il rapporto superficie volume, pertanto, diminuisce (Figura 4-33).

Si nota infatti che il rapporto S/V di un singolo modulo 4x4x3m sarà più alto rispetto al rapporto S/V di una figura costituita da più moduli aggregati, ed erroneamente si potrebbe pensare che la prima figura è peggiore della seconda, ma non è così, perché il singolo cubo è sicuramente la soluzione più compatta in confronto a tutte le altre.

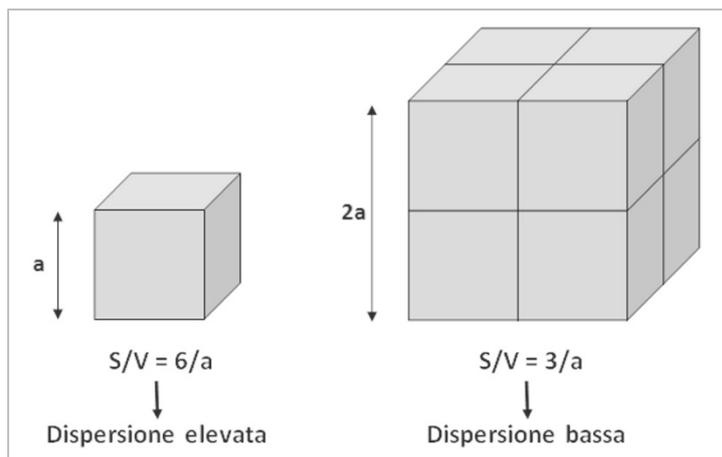


Figura 4-33 Relazione fra rapporto S/V e dimensioni

Solamente sulle soluzioni uniche quindi si calcola e si analizza il rapporto superficie-volume in modo da catalogarle secondo "classi di prestazione". Si rileva che dalla prima alla terza iterazione si ha sempre un unico valore di S/V. Se per la prima e la seconda iterazione è ovvio, poiché la soluzione è unica, per la terza iterazione si hanno due geometrie con identica superficie esterna e identico volume, quindi stesso rapporto S/V.

Per quanto riguarda la quarta iterazione, le soluzioni si dividono in due classi: tra le 5 soluzioni una è "migliore" in quanto ha una compattezza più elevata rispetto alle altre, che sono invece caratterizzate tutte dallo stesso valore.

Per la quinta iterazione si ha una situazione analoga. Su 12 soluzioni, 11 hanno lo stesso valore di S/V e una sola è "migliore", con valore S/V più basso. Anche in questo caso ci sono solo due classi.

Si hanno invece tre classi distinte per la sesta iterazione. In questo caso le 36 soluzioni uniche sono divise in tre gruppi che, procedendo dalle "peggiori" alle "migliori", comprendono rispettivamente 28, 26 e 1 soluzioni.

Infine, per quanto riguarda la settima e ultima iterazione si rilevano anche in questo caso tre classi costituite rispettivamente da 83, 21 e 4 elementi. Anche in questo caso le classi sono intese dalla "peggiore" alla "migliore".

Si vuole precisare la classificazione non è intesa per escludere le soluzioni "peggiori". Non sono state fatte cioè considerazioni che definissero una particolare forma non idonea ad ospitare un'unità abitativa. Pertanto ogni soluzione, dalle più particolari e complesse alle più semplici e compatte, deve essere considerata come una possibile candidata a costituire la sagoma di un'unità abitativa in sede di progetto. Tuttavia l'identificazione di "classi di prestazione", che indicano quali fra le soluzioni sono le migliori a livello di dispersioni e quindi di sostenibilità intrinseca, potrà

facilitare il processo progettuale indirizzando il progettista all'utilizzo preferibile di determinate forme in luogo ad altre.

### 4.3.3 ALGORITMO PER L'ADATTABILITÀ FUNZIONALE

---

Il secondo algoritmo è incentrato sullo studio della distribuzione funzionale degli ambienti all'interno dell'unità abitativa. Esso è direttamente collegato all'algoritmo precedente in quanto ne riprende i risultati e li utilizza come input. Prima di descrivere l'algoritmo stesso è necessario elaborare il concetto di unità abitativa e in particolare quello di unità minima.

Attraverso lo studio dell'unità abitativa in tutti i suoi aspetti come, ad esempio, l'organizzazione interna delle funzioni, la distribuzione e la dimensione degli spazi, l'illuminazione naturale e artificiale e, non ultimo, l'orientamento è possibile ricercare le condizioni ottimali che concilino i requisiti di vivibilità con quelli di economicità e funzionalità. L'organizzazione intelligente dello spazio consiste quindi nello studiare le soluzioni che meglio permettono di soddisfare i requisiti richiesti, sfruttando al meglio lo spazio a disposizione, in modo da ridurlo al minimo indispensabile.

Per "*unità abitativa*" si intende uno spazio architettonico tale da consentire la funzione dell'abitare, composto da uno o più ambienti sistematicamente legati e tra loro indipendenti. È il primo nucleo che va a costituire l'ambiente costruito, cioè quell'ambiente attrezzato dall'uomo in modificazione dell'ambiente naturale, per rendere migliore la propria qualità della vita e ottimizzare, nel limite delle possibilità tecnologiche di ciascun periodo storico, le proprie attività. Il concetto di unità abitativa è nato con il Movimento Moderno e si riferisce anche ad un aspetto sociologico, oltre che architettonico, facendo propria la concezione dell'unità intesa come "*residenza*" (appartamenti, case a schiera) e non più come "*rappresentanza*" (villa, castello, palazzo). Seguendo queste riflessioni, sorgono i quartieri residenziali dell'epoca moderna sino ad arrivare alle "*Unité d'Habitation*" di Le Corbusier. In queste ultime, che sono l'espressione più compiuta di questo concetto innovativo di abitare, l'unità abitativa è l'elemento primario di un insieme più complesso. Assieme ai servizi comuni primari, l'unità abitativa contribuisce a realizzare un pezzo di città: il quartiere. Inteso in questo senso, il quartiere si trasforma in un modello di prefabbricazione industriale che affonda le radici nel concetto di "*Machine à habiter*" di Le Corbusier, secondo cui la casa è addirittura una "*macchina da abitare*" che deve soddisfare i bisogni dell'uomo moderno e deve funzionare con precisione.

Si tratta quindi di elaborare un edificio-macchina, dotato di tutte le caratteristiche necessarie al vivere bene. Il concetto della razionalità applicata al progetto di architettura, per risolvere problemi legati al soddisfacimento dei bisogni dell'uomo, si sviluppa particolarmente negli anni '20-'30 in Europa, soprattutto in Germania, con il movimento razionalista. L'obiettivo di questi studi è appunto quello di risolvere, attraverso metodologie scientifiche, oggettive e razionali, i bisogni biologici e sociali dell'uomo. La risposta a questi bisogni è fornita dalla teoria dell'Existenzminimum, formulata dai maestri del razionalismo, attraverso una serie di norme bio-fisiologiche, dimensionali e una serie di principi distributivi, funzionali e organizzativi dello spazio abitativo. In questo ambito, le riflessioni sui temi dell'abitare sono quindi improntate sul come soddisfare i bisogni, elementari e complessi, attraverso il progetto dello spazio abitativo, in modo razionale e scientifico e, di conseguenza, "minimo". La definizione, cioè, di un metodo oggettivo e certo per la progettazione di un alloggio minimo nel rispetto dei bisogni fisici e psicologici dell'uomo. Gli studi sull'Existenzminimum hanno trovato la loro soluzione definitiva, nella ricerca razionalista sull'alloggio minimo, attraverso la produzione di alloggi a basso costo, con caratteristiche di abitabilità ottimali.<sup>26</sup>

Anche nella contemporaneità, la razionalità è la modalità con cui il progettista può e deve trovare soluzioni adeguate per la progettazione di forme dell'abitare che corrispondano ai bisogni mutevoli dell'uomo. La razionalità può avvalersi, per soddisfare i bisogni dell'individuo contemporaneo, dei caratteri e delle condizioni delle architetture flessibili, mobili e transitorie, modulari rimanendo all'interno degli standard minimi che assicurano un certo grado di economicità e di funzionalità dello spazio. Per fare ciò è necessario verificare quali siano i requisiti minimi stabiliti dalle normative riguardanti il tema dell'abitare.

#### *4.3.3.1 QUADRO NORMATIVO*

La progettazione di una forma abitativa, deve poter considerare tutte le condizioni necessarie per ottenere la giusta proporzione degli ambienti nei quali l'uomo vive. Individuati, quindi, i bisogni e le condizioni necessarie per soddisfarli, è possibile poi restituire nuovi spazi abitativi proporzionati, dimensionati e distribuiti razionalmente. L'abitante deve poter compiere quelle specifiche azioni richieste da una determinata funzione e tutto ciò deve accadere in uno specifico luogo, il quale possa permettere i movimenti del corpo umano. La forma dell'abitare, quindi, deve essere corredata da una serie di componenti funzionali che soddisfino alcuni bisogni elementari e complessi dell'individuo che abita. Lo spazio abitativo è determinato, quindi da due misure fondamentali. La prima è riferita allo spazio necessario allo svolgersi delle diverse funzioni, la seconda è riferita allo spazio necessario

all'individuo per l'utilizzo degli strumenti necessari a svolgere una determinata funzione. Lo spazio abitativo è quindi uno spazio di contenimento del rapporto che intercorre tra una funzione e il necessario comportamento da essa indotto. Esso deve essere sempre in grado di creare una relazione "attiva ed organica", come affermava Klein<sup>27</sup>, con le condizioni di vita ed i bisogni culturali dell'epoca in cui si vive. Per Klein, infatti, l'abitazione è il luogo dei bisogni fisici, spirituali e sociali e per questo deve poter essere proporzionata attraverso le misure biologiche, psicologiche e sociali, in modo da garantire protezione, benessere e produttività all'uomo. Lo studio dello spazio abitativo deve essere condotto, quindi, tenendo presente la misura biologica e quella sociale, in quanto è attraverso di esse che lo spazio sarà dimensionato, proporzionato e distribuito razionalmente, sviluppando così, forme abitative adeguate alle esigenze umane.<sup>28</sup>

Per avere una panoramica degli spazi minimi, destinati alle varie funzioni che possono essere svolte all'interno di un'abitazione, è necessario dotarsi di un quadro normativo di riferimento. Si ipotizza un contesto italiano approssimativamente relativo all'area bolognese. Si prenderanno in esame quindi le norme Nazionali ma anche quelle specifiche della Provincia di Bologna. Non sempre i parametri sono definiti nel dettaglio, ma la normativa lascia un ampio margine di libertà per quanto riguarda la definizione degli spazi minimi. Proprio per questo motivo si analizzeranno anche dei dati di altre città italiane, mettendoli fra di loro a confronto.

Sul piano Nazionale, nel tempo, sono state regolamentate le dimensioni dei locali di abitazione sulla base delle destinazioni di ogni singolo locale, nonché nel rispetto delle norme igienico-sanitarie. La norma di riferimento oggi è il Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975 "Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione", che fornisce le principali informazioni sul tema:

- Art. 2

Per ogni abitante deve essere assicurata una superficie abitabile (soggiorno e camera da letto) non inferiore a mq 14, per i primi 4 abitanti, ed a mq 10, per ciascuno dei successivi. Le stanze da letto debbono avere una superficie minima di mq 9, se per una persona, e di mq 14, se per due persone. Ogni alloggio deve essere dotato di una stanza di soggiorno di almeno mq 14. Le stanze da letto, il soggiorno e la cucina debbono essere provvisti di finestra apribile.

- Art. 3

Ferma restando l'altezza minima interna di m 2,70, salvo che per i comuni situati al di sopra dei m. 1000 sul livello del mare per i quali valgono le misure ridotte già indicate all'art. 1, l'alloggio mono stanza, per una persona, deve avere una superficie minima, comprensiva dei servizi, non inferiore a mq 28, e non inferiore a mq 38, se per due persone.

- Art. 5

Tutti i locali degli alloggi, eccettuati quelli destinati a servizi igienici, disimpegni, corridoi, vani-scala e ripostigli debbono fruire di illuminazione naturale diretta, adeguata alla destinazione d'uso. Per ciascun locale d'abitazione, l'ampiezza della finestra deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore di fattore luce diurna medio non inferiore al 2%, e comunque la superficie finestrata apribile non dovrà essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento. Per gli edifici compresi nell'edilizia pubblica residenziale occorre assicurare, sulla base di quanto sopra disposto e dei risultati e sperimentazioni razionali, l'adozione di dimensioni unificate di finestre e, quindi, dei relativi infissi.

- Art. 6

Quando le caratteristiche tipologiche degli alloggi diano luogo a condizioni che non consentano di fruire di ventilazione naturale, si dovrà ricorrere alla ventilazione meccanica centralizzata immettendo aria opportunamente captata e con requisiti igienici confacenti. È comunque da assicurare, in ogni caso, l'aspirazione di fumi, vapori ed esalazioni nei punti di produzione (cucine, gabinetti, ecc.) prima che si diffondano. Il "posto di cottura", eventualmente annesso al locale di soggiorno, deve comunicare ampiamente con quest'ultimo e deve essere adeguatamente munito di impianto di aspirazione forzata sui fornelli.

- Art. 7

La stanza da bagno deve essere fornita di apertura all'esterno per il ricambio dell'aria o dotata di impianto di aspirazione meccanica. Nelle stanze da bagno sprovviste di apertura all'esterno è proibita l'installazione di apparecchi a fiamma libera. Per ciascun alloggio, almeno una stanza da bagno deve essere dotata dei seguenti impianti igienici: vaso, bidet, vasca da bagno o doccia, lavabo.

Inoltre, per quanto riguarda l'illuminazione naturale, con la Legge 27 maggio 1975, n. 166 "*Norme per interventi straordinari di emergenza per l'attività edilizia*", sono state stabilite le seguenti regole:

- Art. 18

È consentita l'installazione dei servizi igienici in ambienti non direttamente aerati ed illuminati dall'esterno, a condizione che:

- ciascuno di detti ambienti sia dotato di un idoneo sistema di ventilazione forzata, che assicuri un ricambio medio orario non inferiore a cinque volte la cubatura degli ambienti stessi;

- gli impianti siano collegati ad acquedotti che diano garanzie di funzionamento continuo e gli scarichi siano dotati di efficiente e distinta ventilazione primaria e secondaria;
  - in ciascuno di detti ambienti non vengano installati apparecchi a fiamma libera.
- Art. 19

È consentita la realizzazione di scale e relativi disimpegni senza finestrate sull'esterno a condizione che:

- risultino adeguatamente garantite tutte le condizioni di sicurezza e quelle di igiene;
- le scale ed i disimpegni siano dotati di una idonea ventilazione, diretta per le scale ed anche indiretta per i disimpegni.

Per quanto riguarda invece il contesto bolognese, si fa riferimento al RUE Schede Tecniche di Dettaglio *"Fruibilità e qualità dello spazio abitato. Requisito: organizzazione distributiva degli spazi e attrezzature. Scheda dE8.2"*:

[1.3] Per quanto concerne gli spazi adibiti ad uso abitativo (usi 1), gli spazi per attività principale e secondaria degli alloggi devono rispondere per forma e dimensione alle esigenze funzionali, nel rispetto delle prescrizioni indicate dalla vigente normativa circa le superfici minime e i requisiti spaziali da garantirsi agli utenti con impedita o ridotta capacità motoria o sensoriale (superamento delle barriere).

I bagni non devono avere accesso da: cucina, soggiorno con angolo cottura (con esclusione di monolocali e bilocali).

Ai fini del computo delle superfici minime (come di seguito indicate) di monolocali e vani principali dovranno considerarsi esclusivamente gli spazi o le porzioni di vani con larghezza minima di metri 1,50 e con altezza minima di metri 1,80, al netto delle superfici occupate da rampe scale. In qualunque caso, i monolocali o i vani principali non devono essere interessati da separazioni murarie interne che superino il 50% della luce del vano stesso.

In particolare, le unità abitative devono soddisfare, obbligatoriamente con spazi fuori terra, i seguenti requisiti:

- nei monolocali ad uso abitativo destinati ad una persona dovrà garantirsi una superficie minima di mq 28, corrispondenti a mc 75,60;
- nei monolocali ad uso abitativo destinati a due persone dovrà garantirsi superficie minima di mq 38, corrispondenti a mc 102,60;

- negli alloggi composti da più stanze (bilocali compresi) le stanze costitutive dovranno rispettare i seguenti standard dimensionali e dotazionali:
  - a) camera da letto per una persona: superficie minima di mq 9, corrispondenti a mc 24,3;
  - b) camera da letto per due persone: superficie minima di mq 14, corrispondenti a mc 37,8;
  - c) soggiorno: superficie minima di mq 14, corrispondenti a 37,8 mc;
  - d) cucina: presenza di tutte le dotazioni minime di cui alla scheda tecnica di dettaglio dE8.3 (lavello, piano di lavoro, piano cottura, frigo, lavastoviglie);
  - e) soggiorno con angolo cottura: superficie minima di mq 15,50, corrispondenti a mc 41,85;
  - f) bagno: presenza di una dotazione impiantistica completa, coma da scheda tecnica di dettaglio dE8.3.

Il progetto deve inoltre dimostrare, attraverso elaborati grafici del layout interno, dei percorsi e degli spazi di manovra, l'effettiva possibilità di utilizzo ergonomico dei singoli vani e degli spazi.

Requisito: dotazioni impiantistiche minime. Scheda dE8.3

[1] Con riferimento agli usi abitativi e alle abitazioni a servizio di altri usi, negli interventi di nuova costruzione e negli interventi su edifici esistenti, perché il requisito sia soddisfatto:

[1.1] Gli spazi dell'organismo edilizio devono garantire le seguenti dotazioni impiantistiche:

- cucina (spazio per attività principale): un terminale collegato alla rete di distribuzione dell'acqua potabile calda e fredda per il lavello e predisposto per la lavastoviglie (se l'installazione non è prevista in altro locale all'interno dell'alloggio), con relativo terminale di scarico; terminale per l'erogazione di gas o elettrica; impianto di aspirazione ed espulsione all'esterno dei fumi di cottura;
- bagno: water, lavabo, bidet, vasca da bagno o piatto doccia, lavatrice, con rubinetto/i collegati alla rete di approvvigionamento dell'acqua potabile calda e fredda; i bagni ulteriori al primo possono avere una dotazione ridotta.
- I bagni non dovranno avere accesso diretto da: cucina, soggiorno con angolo cottura (con esclusione del monolocale e bilocale).

Si è dunque proceduto alla sintesi dei dati raccolti, in modo da poter elaborare una tavola di indicazioni da seguire nella successiva fase di analisi funzionale. Nella prima tabella (Tabella 4-16) si mettono a confronto i dati nazionali e quelli di alcuni comuni italiani, fra cui Bologna. In base a questi dati a confronto si è operata la definizione delle metrature idonee per i vari ambienti della singola unità abitativa. Queste verranno poi utilizzate per proseguire nell'analisi dell'adattabilità funzionale del sistema strutturale e in particolare per sviluppare l'algoritmo necessario a "riempire" i polimini generati precedentemente con funzioni coerenti all'abitare.

	mq minimi Normativa		mq assunti	I/V naturale
<b>Superficie abitabile</b>				
Stanza letto singola	9		9	x
Stanza letto doppia	14		14	x
Soggiorno	14		14	x
Cucina + Pranzo	(9)		14	x
Soggiorno + Angolo cottura	(15.5)	(18)	14 + 6 = 20	x
<b>Superfici di servizio</b>				
Cucinino	(5)	(5.5)	6	x
Bagno (primo o unico)	(4)	(3.5)	4	/
Bagno (secondo)	(1.5)	(2)	2	/
Studio	(7)	(7)	7	x
Ripostiglio	(1.5)		2	/
Vano scala	/		/	/

Tabella 4-16 Metrature minime dei locali di abitazione

Nazionale:

DM 5/ 7/ 1975

Bologna:

RUE Schede Tecniche di  
Dettaglio

Padova:

PRG Specifiche Operative

Roma:

RE Comune di Roma

Milano:

RE Comune di Milano

A questo punto si procede con la definizione di una serie di unità abitative "tipo", differenziate in base al numero di locali ed all'entità dell'utente finale. Per la definizione della metratura totale dell'appartamento e dei singoli vani si utilizzano i dati sopra annotati, ricavati dalle indicazioni delle normative. Si distingue tra il "Monocale A" per una persona; "Bilocale AA" per una coppia di adulti; "Trilocale AAb" per una coppia con un figlio; "Quadrilocale AAA" per un appartamento destinato ad ospitare tre adulti, il quale può essere pensato per una coppia con figlio adulto o anche ad un appartamento per tre studenti o lavoratori; "Plurilocale AAbb" per una coppia con due figli; "Plurilocale AAAA" per quattro adulti o studenti o lavoratori; "Plurilocale AAbbb", il più grande, per una famiglia costituita da una coppia di genitori con tre figli. Queste sette tipologie vengono poi adattate per la soluzione organizzata secondo lo schema del 4x4, caratteristico del sistema costruttivo in analisi. (Tabella 4-17)

## 4.3 PROGETTAZIONE PARAMETRICA

Indicazioni da normativa			Sistema 4x4		
Definizione unità abitativa	mq minimi	%	utenti	Nr. Moduli	mq
<b>Monocale A</b>	<b>28</b>	<b>100%</b>	<b>1,00</b>	<b>2,00</b>	<b>32,00</b>
Soggiorno con Angolo cottura	15,50	55,36%			
Camera singola	9,00	32,14%			
Bagno unico	3,50	12,50%			
<b>Bilocale AA</b>	<b>38</b>	<b>100%</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>48,00</b>
Soggiorno con Angolo cottura	20	52,63%	 		
Camera doppia	14,00	36,84%			
Bagno unico	4,00	10,53%			
<b>Trilocale AAb</b>	<b>49</b>	<b>100%</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>64,00</b>
Soggiorno con Angolo cottura	20	40,82%	  		
Camera doppia	14	28,57%			
Camera singola	9	18,37%			
Bagno primo	4	8,16%			
Bagno secondo	2	4,08%			
<b>Quadrilocale AAA</b>	<b>53</b>	<b>100%</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>64,00</b>
Soggiorno con Angolo cottura	20	37,74%	  		
Camera singola1	9	16,98%			
Camera singola2	9	16,98%			
Camera singola3	9	16,98%			
Bagno primo	4	7,55%			
Bagno secondo	2	3,77%			
<b>Plurilocale AAbb</b>	<b>66</b>	<b>100%</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>80,00</b>
Soggiorno	14	21,21%	   		
Cucina e Pranzo	14	21,21%			
Camera doppia	14	21,21%			
Camera singola1	9	13,64%			
Camera singola2	9	13,64%			
Bagno primo	4	6,06%			
Bagno secondo	2	3,03%			
<b>Plurilocale AAAA</b>	<b>85</b>	<b>100%</b>	<b>4,00</b>	<b>6,00</b>	<b>96,00</b>
Soggiorno	20	23,53%	   		
Cucina e pranzo	14	16,47%			
Camera singola1	9	10,59%			
Camera singola2	9	10,59%			
Camera singola3	9	10,59%			
Camera singola4	9	10,59%			
Ripostiglio	7	8,24%			
Bagno primo	5	5,88%			
Bagno secondo	3	3,53%			

Indicazioni da normativa			Sistema 4x4		
Definizione unità abitativa	mq minimi	%	utenti	Nr. Moduli	mq
<b>Plurilocale AAbbb</b>	<b>100</b>	<b>100%</b>	<b>5,00</b>		
Soggiorno	20	20,00%			
Cucina	14	14,00%			
pranzo	14	14,00%			
Camera doppia1	14	14,00%			
Camera doppia2	14	14,00%			
Camera singola	9	9,00%			
Ripostiglio	7	7,00%			
Bagno primo	5	5,00%			
Bagno secondo	3	3,00%			

Tabella 4-17 Definizione delle unità abitative di riferimento e individuazione del numero di moduli base necessary

#### 4.3.3.2 L'ALGORITMO

L'algoritmo è stato definito "per l'adattabilità funzionale" in quanto, a partire da una geometria di input che costituisce il perimetro dell'unità abitativa, va a delineare le possibili suddivisioni interne di questa in base ai parametri e alle condizioni imposte. La geometria di partenza è ricavata dal precedente algoritmo per l'aggregazione del modulo. In questo modo, ognuna delle numerose soluzioni del primo step può essere impostata come input per la successiva definizione delle suddivisioni interne.

Una volta assegnato il perimetro su cui l'algoritmo dovrà lavorare, si può impostare il parametro fondamentale che consiste nel numero di suddivisioni, ovvero la quantità di vani che si vogliono avere all'interno dell'unità abitativa. Per standardizzare questa operazione si sono utilizzati i dati ricavati dall'analisi normativa effettuata in precedenza, per la quale ad ogni metratura corrisponde una data tipologia di appartamento, costituita da un dato numero di vani, ciascuno con una determinata metratura minima. Alle sette tipologie di appartamenti sopra individuati sono state assegnate in input alcune delle geometrie che costituiscono le soluzioni "migliori" trovate con il primo algoritmo.

Ad esempio quindi, se si intende analizzare l'appartamento tipo "Bilocale AA", il quale ha una metratura minima di 38mq, si utilizzeranno come geometrie di input le soluzioni della terza iterazione del primo algoritmo, le quali sono costituite da tre moduli affiancati, con metratura totale appunto di 48mq. Le opzioni sono in totale due e per entrambe si procederà allo studio funzionale separatamente. Secondo la tabella il "Bilocale AA" si suddivide in tre ambienti, soggiorno con angolo cottura, camera doppia e bagno unico. Il parametro relativo al numero di suddivisioni sarà pertanto impostato su (3).

Tuttavia la scelta di attenersi alle tipologie in tabella è stata effettuata per facilitare la comprensione del processo, ma chiunque utilizzi lo strumento può scegliere di impostare il parametro come preferisce impostando a piacimento il numero di suddivisioni interne desiderate.

Una volta impostati l'input, geometria di perimetro e il numero di suddivisioni interne, il programma procede alla definizione spaziale di queste, cioè alla vera e propria individuazione geometrica degli spazi. In questa fase sono state implementate alcune condizioni o vincoli, derivanti dall'intrinseca composizione dell'algoritmo:

- I vani hanno forma rettangolare che significa che il perimetro ha angoli retti
- Due vani adiacenti hanno un lato coincidente
- Tutti i vani, meno i due minori, devono avere un lato adiacente al perimetro
- Non sono consentite ampie sovrapposizioni

Un altro tipo di condizione riguarda invece l'accesso. Il programma colloca automaticamente il vano scala e l'accesso in modo che questo si trovi in corrispondenza del perimetro e in adiacenza al vano di dimensioni maggiori, che generalmente costituirà il soggiorno. In questo modo e con queste condizioni si ottiene una distribuzione uniforme dello spazio, con l'occupazione della quasi totalità della metratura. Vengono individuati automaticamente un certo numero di vani di dimensioni diverse e dalle determinate caratteristiche e inoltre viene data un'indicazione riguardo alla possibile collocazione del vano scala e dell'accesso all'unità abitativa.

Dal punto di vista dello script dell'algoritmo, quindi dal punto di vista strettamente matematico, il processo avviene seguendo un iter ben preciso. All'interno del perimetro si individuano un certo numero di punti, la cui quantità è indicata dal parametro, distribuiti casualmente nello spazio. Questi punti vengono proiettati sul perimetro e si rilevano le linee di connessione fra i punti che sono più vicini tra di loro, individuandone il punto medio. Analizzando in seguito le coordinate dei punti trovati si registrano il dominio della componente X e il dominio della componente Y che dovranno costituire le dimensioni dei box che andranno a costituire gli ambienti interni. In questo modo, semplicemente cambiando le coordinate dei punti iniziali si otterranno sempre diverse soluzioni di distribuzione interna. La posizione (x, y) dei punti iniziali costituirà la variabile del problema. Questa permetterà di trovare, all'interno di ogni singola iterazione, fissati l'input e il parametro e le condizioni, un alto numero di soluzioni possibili. (Tabella 4-18)

Algoritmo per l'adattabilità funzionale		
Caratteristica	Valore	Descrizione
Input	Geometria	Sono le geometrie di output del primo algoritmo rappresentanti il perimetro dell'unità abitativa
Condizioni	Regolarità	I vani hanno forma rettangolare: il perimetro di ciascun ambiente ha angoli retti
	Nessuna sovrapposizione	Due vani adiacenti hanno un lato coincidente: i vani sono perfettamente affiancati, senza vuoti o compenetrazioni
	Vincolo di affaccio	Tutti i vani, meno i due minori, hanno un lato adiacente al perimetro: in questo modo ogni vano maggiore potrà potenzialmente avere una superficie finestrata. I due vani minori non illuminati potranno ospitare funzioni di servizio
	Accessibilità	Accesso e vano scala in adiacenza al vano di dimensioni maggiori (che costituisce il soggiorno)
Parametro	N° Suddivisioni	Numero intero che varia da 1 a X
		Il parametro, che è possibile impostare all'inizio di ogni iterazione, caratterizza l'iterazione stessa. Si studiano le distribuzioni funzionali di volta in volta, impostando il numero di vani desiderato
Variabile	N° Posizioni	Numero intero che varia da 0 a 1000 a ciascuno dei quali sono associate (N°) coordinate (x, y) dei punti trovati nello step precedente.
		All'interno di un'iterazione è il valore che può cambiare e ad ogni valore assunto si ottiene un nuovo output
Fitness	Percentuali (%)	Dato per l'ottimizzazione delle soluzioni che rappresenta una prestazione desiderabile
		Indica le percentuali ideali di ingombro di un singolo vano rispetto alla superficie complessiva dell'unità abitativa
Output	Distribuzione funzionale	Geometria che costituisce i risultati dell'operazione
		Si ottiene la geometria di input dotata di suddivisione interna funzionale con indicazione dell'accesso e del vano scala

Tabella 4-18 Schema del secondo algoritmo

#### 4.3.3.3 OUTPUT: GENERAZIONE OTTIMIZZATA DELLE UNITA' ABITATIVE

Si è visto dunque in che modo avviene il processo di generazione delle suddivisioni interne dell'unità abitativa. Tuttavia fino a questo punto non si è parlato di "prestazioni" e le suddivisioni interne appaiono come trovate casualmente, senza una precisa logica funzionale. Bisogna a questo punto individuare un metodo per trovare le soluzioni migliori e funzionali fra le innumerevoli soluzioni possibili

Questo può avvenire attraverso un processo di ottimizzazione, basato sul “*fitness*” come prestazione desiderabile. Il “*fitness*” è una sorta di parametro, un’indicazione che costituisce il “target”, l’obiettivo, ovvero la caratteristica desiderata in un processo. Questo deve essere tradotto in un’informazione ben precisa e univoca da imporre all’algoritmo e cioè si deve trasformare il “*fitness*” sotto forma di dati e numeri. Ma come è possibile?

Per tradurre un concetto astratto quale è “l’adattabilità funzionale” in formula matematica, si è deciso di utilizzare un dato preciso quale indicatore di una buona distribuzione degli spazi, ovvero le percentuali ideali di ingombro di un singolo vano sulla superficie complessiva dell’unità abitativa. Queste sono state calcolate in precedenza e indicate nella tabella relativa alle tipologie di appartamenti.

Per fare in modo che le soluzioni non siano elaborate dal programma in modo casuale, ma che siano “*guidate*” da una serie di dati a soddisfare delle specifiche prestazioni, si è utilizzato il componente “*Galapagos*”<sup>29</sup>. “*Galapagos*” consente di elaborare i dati forniti in modo ciclico, modificando di volta in volta gli input e analizzando gli output<sup>30</sup>. Nello specifico ricalcola più volte la posizione dei punti iniziali, con l’obiettivo di trovare e selezionare solamente le soluzioni “*migliori*”, che sono esclusivamente quelle che forniscono percentuali di ingombro simili a quelle calcolate in precedenza e individuate come desiderabili.

Più in generale il componente Galapagos si basa su un concetto che appartiene al campo della biologia molecolare, che è il concetto di genotipo e fenotipo: per “*genotipo*” si intende la costituzione genetica di un individuo o di un organismo vivente, mentre per “*fenotipo*” si intende l’insieme di tutte le caratteristiche osservabili di un organismo vivente, quindi la sua morfologia, il suo sviluppo, le sue proprietà biochimiche e fisiologiche comprensive del comportamento. Il genotipo quindi è il DNA, mentre il fenotipo è l’insieme delle caratteristiche manifestate. Nel caso di questo algoritmo il genotipo è la posizione dei punti di partenza, che è la variabile del problema, e il fenotipo è il dato relativo alle percentuali di ingombro dei singoli vani. Il componente simula un processo di “*evoluzione fenotipica*” per cui ogni ciclo è assimilabile ad una generazione di individui con un certo corredo genetico e che presentano determinate caratteristiche. Ad ogni ciclo la popolazione subisce un’evoluzione e sempre più elementi assumono il fenotipo impostato e quindi le caratteristiche desiderate (Figura 4-34).

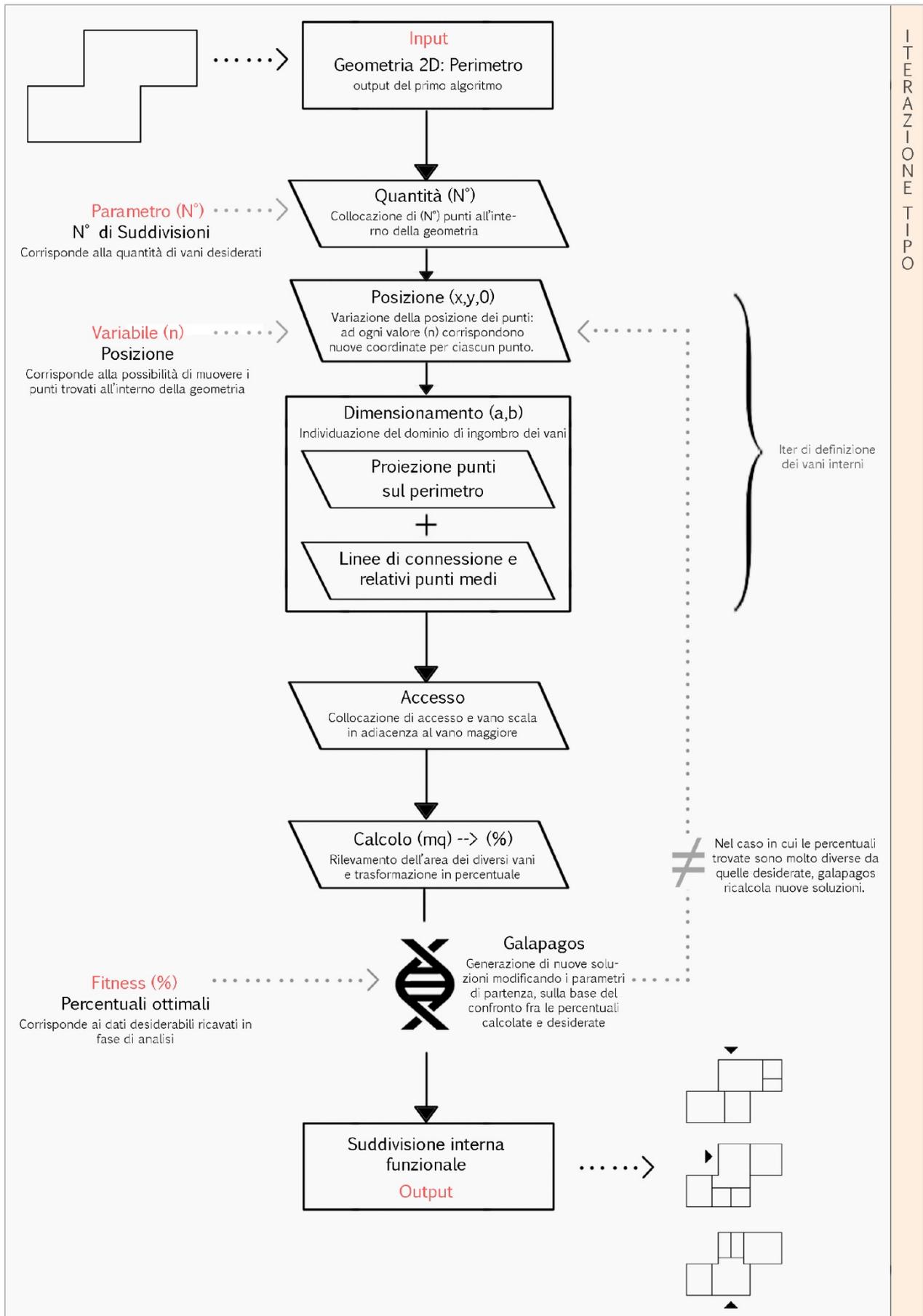


Figura 4-34 Diagramma di flusso per l'algoritmo di adattabilità funzionale

Il componente “*Galapagos*” permette inoltre di isolare le soluzioni migliori alla fine di un processo. Si seleziona il numero di cicli a cui fare riferimento (gli ultimi avranno un maggior numero di soluzioni significative rispetto ai primi) e da questi si possono estrarre solamente le soluzioni che si avvicinano di più (con un margine del 10%) alle prestazioni di fitness impostate. Anche operando questa scrematura la quantità di soluzioni accettabili è notevole e per la restituzione grafica di queste si è proceduto ad una ulteriore analisi manuale dei dati, individuando, per ogni iterazione, le soluzioni più significative da rappresentare.

Le soluzioni sono state riassunte all’interno delle tavole riportate in appendice. Ciascuna tavola è relativa ad una tipologia di appartamento e ad una diversa geometria ricavata dal primo algoritmo quindi ciascuna rappresenta una diversa conformazione del perimetro dell’appartamento.

Gli esempi riportati in ogni tavola sono in numero variabile, in base al numero di soluzioni significative di volta in volta trovate e costituiscono solo alcune delle soluzioni possibili. A fianco ad ogni “*pianta*” schematica che il programma ha elaborato, compare un grafico a torta, il quale indica, appunto, le percentuali di ingombro dei singoli vani sulla superficie complessiva.

Le soluzioni significative tra quelle trovate sono in tutto 19, così suddivise<sup>31</sup>:

- Monocale A	-	1 soluzione con 2 moduli	-	32 mq
- Bilocale AA	-	2 soluzioni con 3 blocchi	-	48 mq
- Trilocale AAb	-	5 soluzioni con 4 blocchi	-	64 mq
- Quadrilocale AAA	-	5 soluzioni con 4 blocchi	-	64 mq
- Plurilocale AAbb	-	1 soluzione con 5 blocchi	-	90 mq
- Plurilocale AAAA	-	1 soluzione con 6 blocchi	-	96 mq
- Plurilocale AAbbb	-	4 soluzioni con 7 blocchi	-	112 mq

#### 4.3.4 ALGORITMO PER LA COMPATIBILITA' TIPOLOGICA

---

Lo studio relativo all'organizzazione funzionale deve essere connesso con quello relativo all'analisi tipologica. L'analisi funzionale non si esaurisce infatti con il solo studio di distribuzione funzionale degli spazi, ma deve prendere in esame anche altri aspetti quali la sagoma complessiva dell'edificio, la distribuzione reciproca delle unità abitative, gli accessi, l'illuminazione e l'orientamento. Il terzo algoritmo si presenta come uno strumento utile per tentare di gestire ed organizzare questi aspetti, che sono le "*caratteristiche tipologiche*" dell'edificio.

Nell'uso più ricorrente per "tipologia" si intende lo studio dei tipi, che ha come finalità la ricerca, per fini classificatori, condotta su oggetti, in questo caso edifici, che abbiano in comune una serie di caratteristiche. Si può quindi definire "tipo" un'astrazione mentale, che consente di estrarre da una categoria di oggetti tutte le caratteristiche che li accomunano. In campo architettonico è possibile desumere tipologie relative sia ad aspetti formali, sia ad aspetti strutturali, sia infine all'organizzazione degli spazi interni. L'analisi funzionale, ad esempio, mira proprio a mettere in risalto l'organizzazione distributiva degli spazi, i percorsi orizzontali e verticali che li collegano, le superfici assegnate alle varie funzioni e l'orientamento.

L'algoritmo che è stato definito per la "*compatibilità tipologica*" permette di giungere alla definizione di un modello edilizio, attraverso il passaggio dalla singola cellula, costituita dall'unità abitativa definita precedentemente, all'intero organismo edilizio. L'uso di un software consente, attraverso un processo ben definito, di studiare le diverse possibilità di aggregazione delle unità abitative, prima analizzate singolarmente attraverso i due precedenti algoritmi. Qui entrano in gioco delle nuove variabili, che riguardano l'intero edificio e non più le sue singole parti.

I parametri che si possono gestire con questo algoritmo sono:

- Posizionamento del vano scala;
- Orientamento del vano scala e di conseguenza l'accesso;
- Definizione della sagoma dell'edificio;
- Tipologia di appartamenti;
- Quantità di appartamenti;

In questo modo, in base alle esigenze del singolo progetto e quindi in base alla domanda dell'utenza e alle circostanze mutevoli che si possono presentare, si possono scegliere la quantità e la tipologia di appartamenti che si desidera avere, impostando due semplici parametri. Questo aspetto permette di non avere appartamenti sempre uguali all'interno di uno stesso edificio, ma piuttosto di

creare un certo grado di libertà, di eterogeneità e di flessibilità, in modo che possano essere accolti diversi target di utenza.

Inoltre la corrispondenza biunivoca tra vano scala e sagoma dell'edificio, permette di sperimentare diverse soluzioni tipologiche ed è interessante vedere come il sistema strutturale INTEGRO BS 400 possa adattarsi a diverse situazioni progettuali. In base alla localizzazione del vano scala all'interno dell'edificio si possono ottenere innumerevoli tipi di impianti edilizi, che possono essere schematizzati in quattro casi esemplari (Figura 4-35):

- Scala completamente interna all'edificio: il corpo scala non interagisce con l'immagine figurativa esterna dell'edificio;
- Scala disposta sul perimetro dell'edificio: il volume di essa può essere percepito dall'esterno oppure annullato dalla facciata;
- Scala completamente esterna all'edificio: la volumetria del corpo scala si contrappone a quella dell'edificio;
- Scala disposta "a cerniera" tra due corpi di fabbrica: il corpo scala costituisce l'elemento di connessione figurativa;

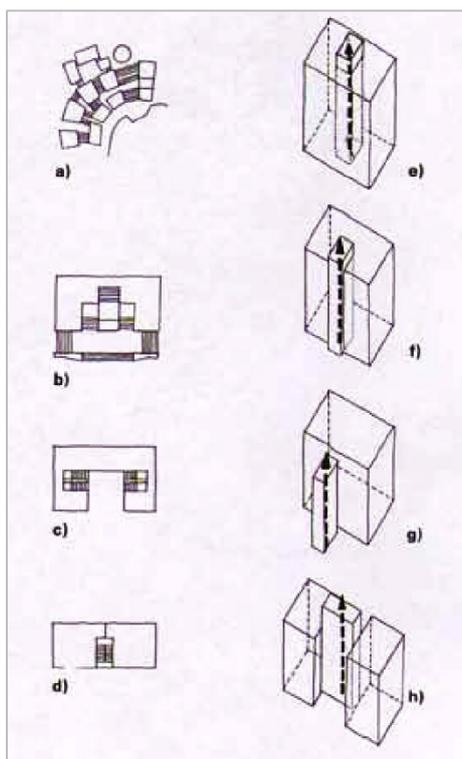


Figura 4-35 Classificazione dell'impianto scale in relazione alla sagoma dell'edificio

L'algoritmo è obbligato poi a rispettare alcune condizioni, di seguito elencate:

- Le sagome delle unità abitative devono rimanere all'interno della sagoma dell'edificio;
- La sagoma dell'edificio non deve essere necessariamente "riempita" completamente;
- Almeno una faccia della sagoma dell'unità abitativa deve coincidere con una faccia del blocco scale;
- Vano scala serve da 1 a un massimo di 3 appartamenti;
- Non ci devono essere sovrapposizioni delle unità abitative;

Queste condizioni sono necessarie per avere una distribuzione ordinata delle unità abitative in relazione con il vano scala e con il perimetro esterno dell'edificio. La sagoma dell'edificio potrà essere saturata completamente oppure no, a seconda della quantità e tipologia di appartamenti scelti e impostati all'inizio di ogni iterazione dai relativi parametri. I volumi delle stesse unità abitative, invece, non potranno mai "sfiorare" i limiti dettati dalla sagoma esterna, anch'essa impostata attraverso il relativo parametro (Tabella 4-19).

<b>Algoritmo per la compatibilità tipologica</b>		
<b>Caratteristica</b>	<b>Valore</b>	<b>Descrizione</b>
Input	Geometria	Sono le geometrie di output del primo algoritmo o del secondo; costituiscono il perimetro delle unità abitative
Condizioni	La sagoma dell'edificio costituisce il limite di intervento Non è necessario che la sagoma dell'edificio venga completamente riempita Almeno una faccia dell'unità abitativa deve coincidere con il vano scala Non sono consentite sovrapposizioni	
Parametri	Posizionamento del vano scala in coordinate (x, y)	
	Orientamento del vano scala e accesso (N,S,O,E)	
	Definizione della sagoma dell'edificio come superficie in coordinate (x, y)	
	Tipologia di appartamenti attraverso un numero intero (da 1 a 7)	
	Numero di appartamenti per ciascun vano scala per piano (da 1 a 3)	
Fitness	Dato per l'ottimizzazione delle soluzioni: rappresenta una prestazione desiderabile	
Output	Geometria	Rappresenta la planimetria indicativa di un edificio

Tabella 4-19 Schema del terzo algoritmo

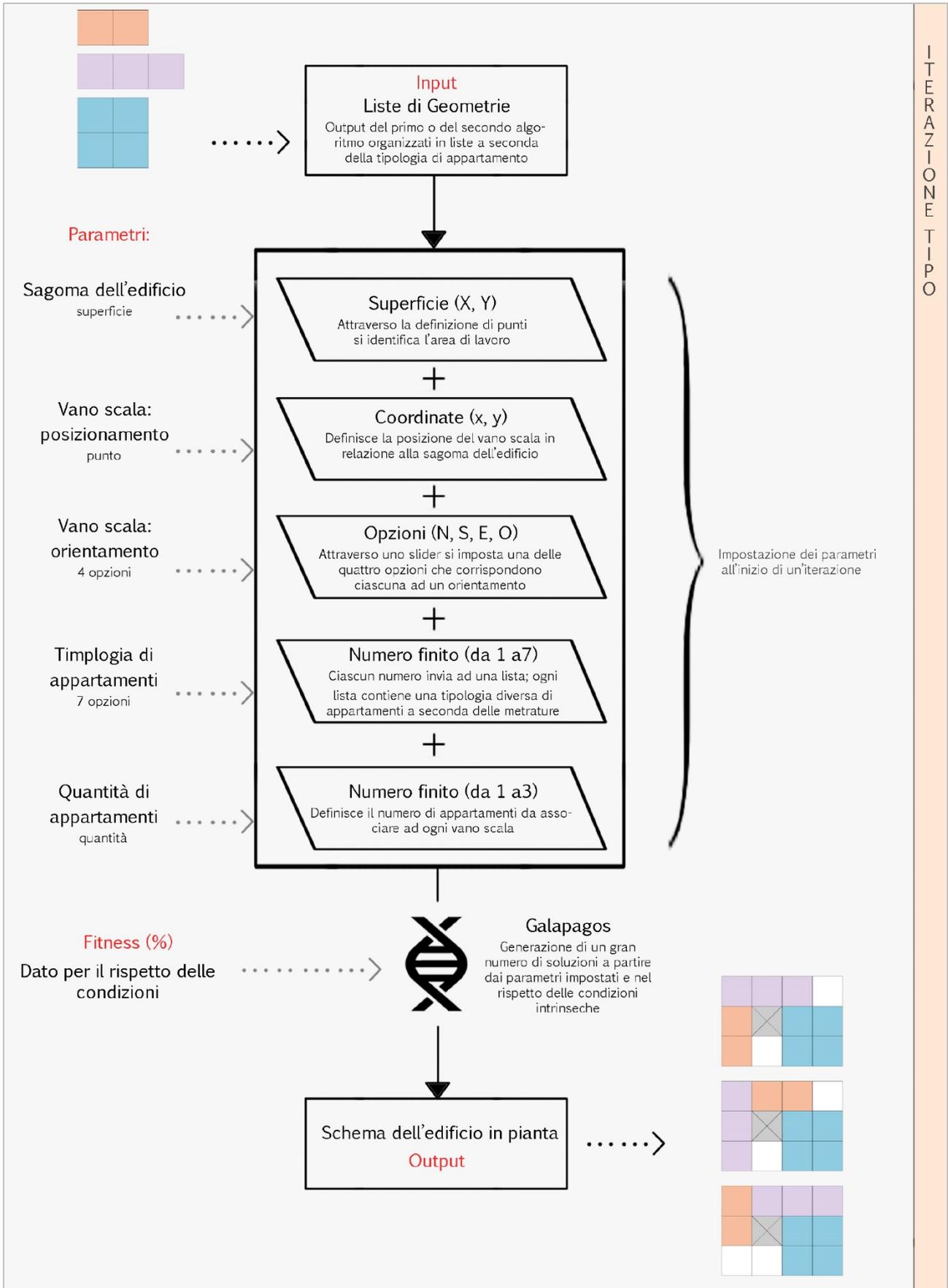


Figura 4-36 Diagramma di flusso per l'algoritmo di compatibilità tipologica

#### 4.3.4.1 L'ALGORITMO

L'algoritmo vero e proprio, dal punto di vista dello script, è stato elaborato iniziando con lo stilare un abaco di geometrie, diviso in categorie di unità abitative in base alla metratura. Questo abaco, organizzato in liste di superfici ricavate dall'algoritmo precedente, costituisce l'input del problema. Si decide quali e quante unità abitative si vogliono avere all'interno del progetto e si impostano di conseguenza i relativi parametri. In ingresso viene quindi identificato il numero di liste e il nome delle liste da cui si vuole che il programma attinga per l'elaborazione dell'iterazione. Procedendo in questo modo, fra tutti gli input disponibili, solo alcuni saranno effettivamente utilizzati. Successivamente si impostano i parametri relativi alla collocazione e all'orientamento della scala. La collocazione è stabilita dalle coordinate di un punto mentre l'orientamento da una scelta multipla fra i quattro punti cardinali. Infine si delinea, attraverso la scelta di una sequenza di punti, una superficie, che costituirà la sagoma dell'edificio. Quest'ultima può anche essere intesa come "area di lavoro", oltre la quale non si può andare, ma che non deve essere necessariamente saturata completamente (Figura 4-36).

A questo punto il programma associa ad un lato del vano scala, un lato di una delle geometrie di input selezionate. Questa operazione si ripete per una, due o tre volte per ogni vano scala, in funzione degli appartamenti serviti. In questo modo il vano scala diventa il "pivot" attorno al quale possono essere collocate le varie geometrie, che però non possono essere distribuite in modo casuale, ma devono rispettare i parametri e le condizioni imposte.

Anche in questo terzo algoritmo si sfruttano le potenzialità del componente "Galapagos", al fine di generare un grande numero di soluzioni rispettando, al contempo, le condizioni imposte. Diversamente dall'algoritmo precedente, il fitness, non si riferisce ad una prestazione ben precisa, ma ad una condizione di non sovrapposibilità fra tutti gli elementi in gioco. La non sovrapposibilità viene espressa sotto forma di componenti matematiche. Il genotipo è ora costituito dalla variabile del problema, la scelta fra le possibili geometrie adottabili, mentre il fenotipo è l'area delle superfici di sovrapposizione, per definizione dell'algoritmo pari a zero.

#### 4.3.4.2 OUTPUT: SCHEMI TIPOLOGICI DI RIFERIMENTO

Al variare dei parametri e degli input si possono dunque ottenere un gran numero di combinazioni distributive. Alcuni esempi di iterazioni, che mostrano quali possono essere le potenzialità di questo strumento, sono sintetizzati nelle tavole seguenti:

4.3 PROGETTAZIONE PARAMETRICA

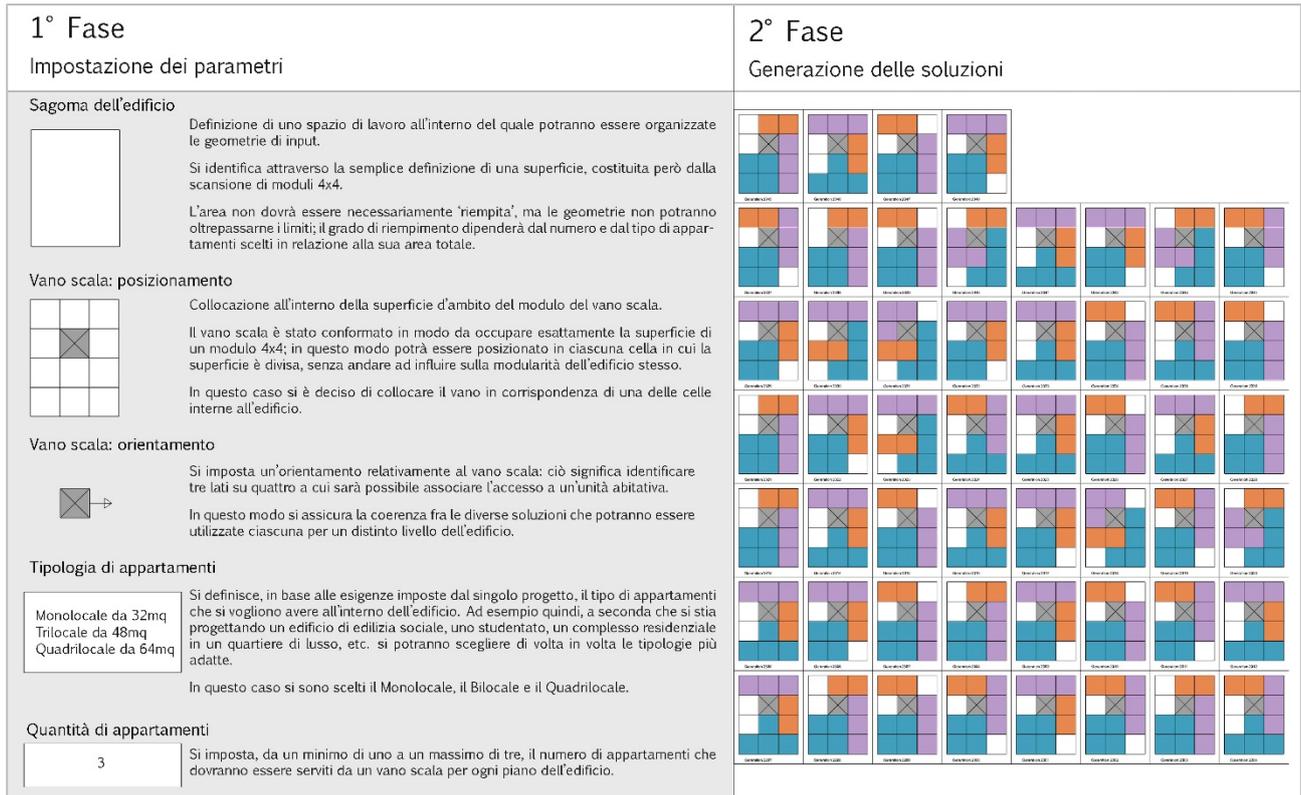


Figura 4-37 Compatibilità tipologica con 1 vano scala



Figura 4-38 Compatibilità tipologica con 2 vani scala

#### 4.3.5 CONSIDERAZIONI FINALI

---

Nel complesso, questo ampio lavoro di analisi, deve essere visto come uno strumento che permette l'applicazione, in un edificio residenziale, del sistema strutturale in esame, che rappresenta sempre il filo conduttore dell'intera ricerca. I tre algoritmi, ciascuno con una propria caratterizzazione, ma ciascuno collegato agli altri in modo gerarchico, vanno intesi nel loro insieme come un unico strumento finalizzato al supporto alla progettazione. L'intero processo di analisi parametrica può essere inteso quindi come l'anima di un software, dedicato allo studio delle applicazioni del sistema INTEGRO BS 400

*“La logica di base della progettazione parametrica, può essere qui strumentalizzata come un metodo progettuale alternativo, uno in cui il rigore geometrico della modellazione parametrica può essere distribuito prima per integrare i vincoli della manifattura, le logiche del montaggio e le caratteristiche del materiale nella definizione di semplici componenti, e poi per la riproduzione dei componenti dentro costruzioni e sistemi più grandi.”<sup>32</sup>*

Si tratta quindi di uno strumento che può essere anche considerato come un “pacchetto”, vendibile assieme al sistema stesso, che può essere utile al progettista in fase di elaborazione del progetto ma anche al costruttore in fase di montaggio. Potrebbe anche essere utilizzato dall'utente, che avrebbe la possibilità di contribuire al design della propria casa ed utilizzarlo per elaborare o rielaborare la propria abitazione “*su misura*”.

Ovviamente per poter essere idoneo in simili condizioni, dovrebbe essere ulteriormente semplificato ed elaborato dal punto di vista dell'interfaccia e della coerenza generale.

---

## 4.4 CANTIERIZZAZIONE

---

Nel seguente capitolo si studiano le fasi necessarie alla realizzazione di un singolo modulo, così da poter stimare la durata complessiva del processo di realizzazione di un organismo più complesso realizzato attraverso il sistema strutturale stesso. Lo scopo è quello di espandere i risultati ottenuti sul singolo elemento ad un organismo nato per aggregazione come mostrato nel capitolo precedente sulla progettazione parametrica.

Si sono ipotizzate 4 situazioni di cantierizzazione per verificare in che modo possono variare i tempi di lavoro in funzione delle risorse disponibili:

1. squadra di tre uomini che realizza un modulo con un solo lato tamponato
2. squadra di tre uomini che realizza un modulo con due lati tamponati
3. squadra di sei uomini che realizza un modulo con un solo lato tamponato
4. squadra di sei uomini che realizza un modulo con due lati tamponati

Se la squadra di 3 uomini è sicuramente realistica ai fini della realizzazione di un singolo modulo 4x4, si è pensato di ipotizzare anche l'impiego di una squadra di 6 uomini. Un numero così elevato, in uno spazio comunque ristretto, potrebbe non garantire un aumento della produttività oraria. L'utilizzo di una squadra più numerosa risponde però meglio alla reale cantierizzazione di un intero edificio realizzato con il sistema strutturale INTEGRO BS 400. Ipotizzando infatti un edificio costituito da almeno 12 moduli, come risulta dal capitolo precedente sulla progettazione parametrica (Figura 4-37), una squadra di 6 operai potrebbe lavorare tranquillamente a pieno ritmo senza interferenze.

Inoltre sono state adottate le seguenti ipotesi semplificative:

- si sono considerate le lavorazioni successive alla realizzazione delle opere di fondazione;
- si sono considerate le lavorazioni precedenti alle finiture interne;
- si sono considerati gli elementi come già arrivati in cantiere e stoccati a piè d'opera.

Per la realizzazione del sistema INTEGRO BS 400 non è richiesta la realizzazione di un ponteggio perché i dispositivi di protezione collettiva sono rappresentati da elementi prevalentemente permanenti che una volta espletato il compito di protezione assumono altre funzioni.

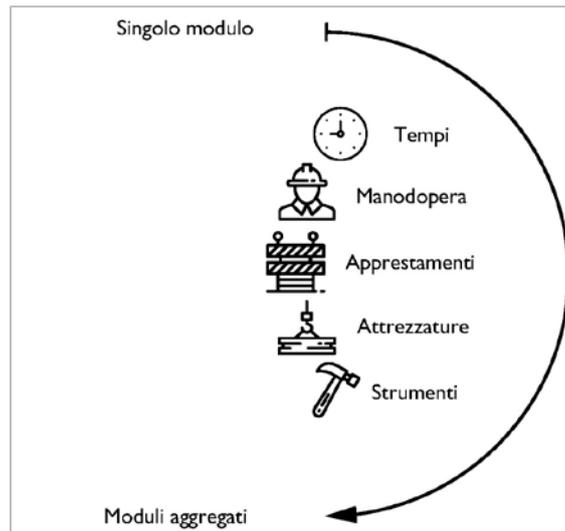


Figura 4-39 Schema riassuntivo del procedimento

#### 4.4.1 TELAIO PRINCIPALE LIGNEO

Il primo elemento da installare sulla fondazione sono i pilastri in legno lamellare GL28h di dimensioni 200x200x6770 mm con un peso approssimato, considerando preinstallate le piastre metalliche per l'installazione delle travi, pari a 150 kg (Figura 4-40).

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e funi metalliche.
- Descrizione: i pilastri, che fungeranno da guide per il corretto posizionamento delle travi poiché arrivano a piè d'opera con le piastre a "T" già collegate, vengono calati uno alla volta sulla fondazione con l'ausilio di una gru mobile industriale. L'altezza massima raggiunta dal braccio può essere inferiore ad 8m e la portata massima necessaria risulta esigua, dato il ridotto peso del singolo elemento. A seconda del tipo di fondazione si adotteranno sistemi differenti di collegamento per la messa a piombo e la corretta giunzione dei pilastri con quest'ultima.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie che includono il collegamento del pilastro al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 30 per l'alloggiamento del singolo pilastro.

Indipendentemente dalla manodopera, considerando l'uso di una gru sola, si prevede un tempo di installazione di  $8 \times 30 \text{ min.} = 240 \text{ min} = 4 \text{ h.}$

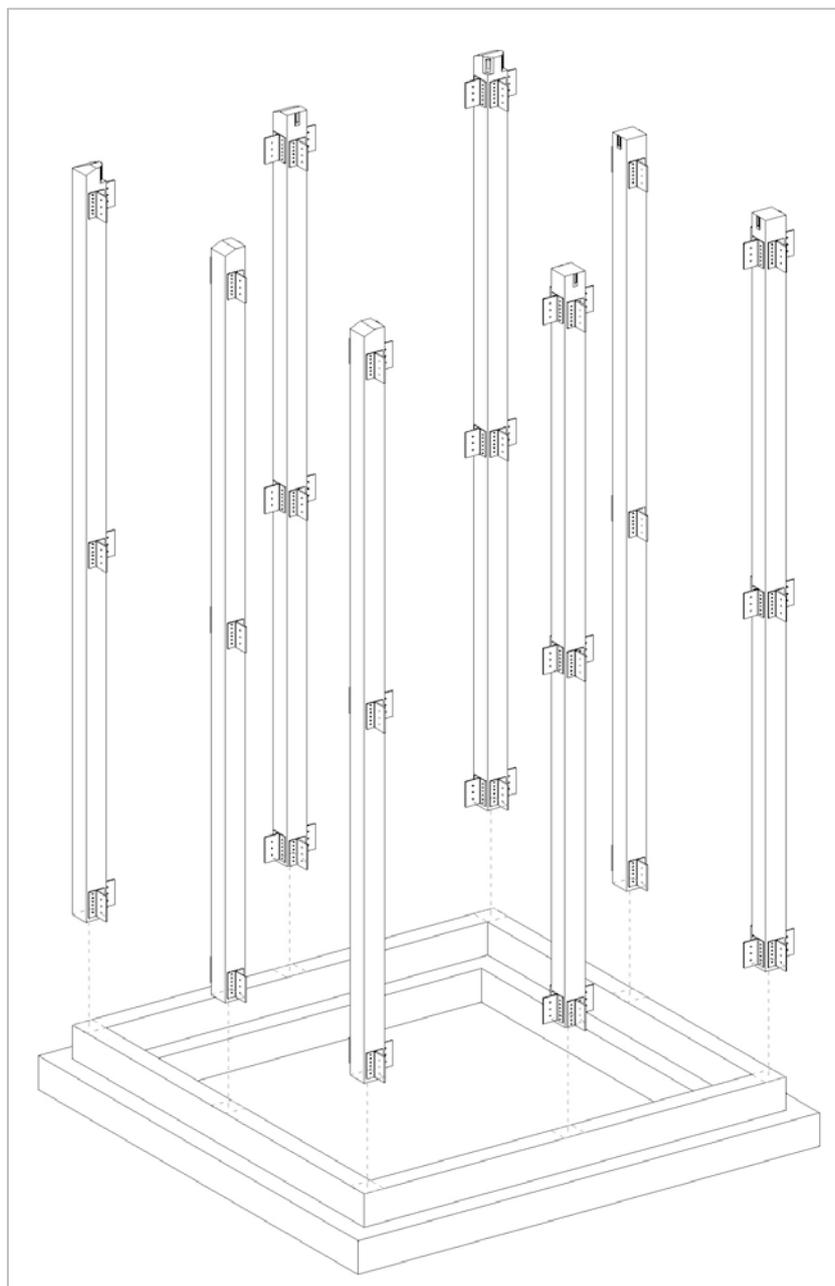


Figura 4-40 Alloggiamento dei pilastri

Le travi di bordo al livello dello spicco di fondazione avranno dimensioni  $300 \times 200 \times 1800 \text{ mm}$  e saranno in legno lamellare GL28h per un peso di circa 60 kg. La trave di spina avrà dimensioni  $250 \times 200 \times 3800 \text{ mm}$  e sarà sempre in legno lamellare GL28h per un peso di 120 kg (Figura 4-41).

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8 travi di bordo e 1 trave di spina.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e funi metalliche, chiave dinamometrica.
- Descrizione: le travi, che arrivano a piè d'opera con gli elementi femmina del giunto PITZL per i travetti già posizionati, vengono calati uno alla volta sulle piastre a "T" con l'ausilio della gru mobile industriale. Una volta posizionato il singolo elemento questo va giuntato tramite 3 bulloni M12 8.8 200mm ad ognuna delle due piastre a "T" di sua pertinenza con una coppia di serraggio pari a 70Nm.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie che includono il collegamento della trave al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 20 per l'alloggiamento della singola trave.

Indipendentemente dalla manodopera, considerando l'uso di una gru sola, si prevede un tempo di installazione pari a  $9 \times 20 \text{ min.} = 180 \text{ min.} = 3 \text{ h.}$

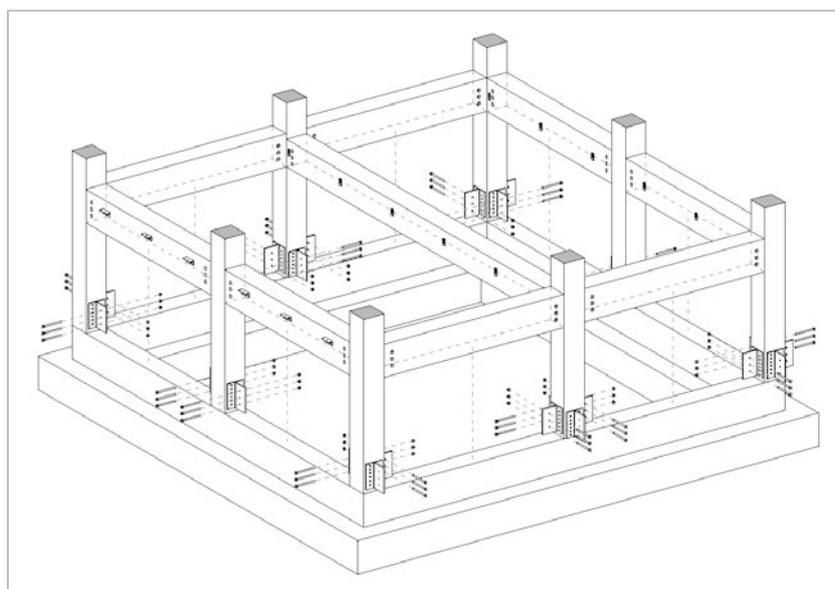


Figura 4-41 Alloggiamento delle travi munite di mensole

I travetti del solaio contro terra avranno dimensioni 80x120x1776 mm in legno lamellare GL28h per un peso di circa 10 kg (Figura 4-42).

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 12.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: `
- Descrizione: i travetti, che arrivano a piè d'opera con gli elementi maschio del giunto PITZL già posizionati, vengono collocati manualmente.
- Durata: non essendoci particolari operazioni preliminari necessarie e dato l'esiguo peso degli elementi si stima la durata di minuti 2 per l'alloggiamento del singolo travetto.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai:  $12 \times 2 \text{ min.} = 24 \text{ min.} = 0,4 \text{ h}$

6 operai:  $12 \times 2 \text{ min.} / 2 = 12 \text{ min.} = 0,2 \text{ h}$

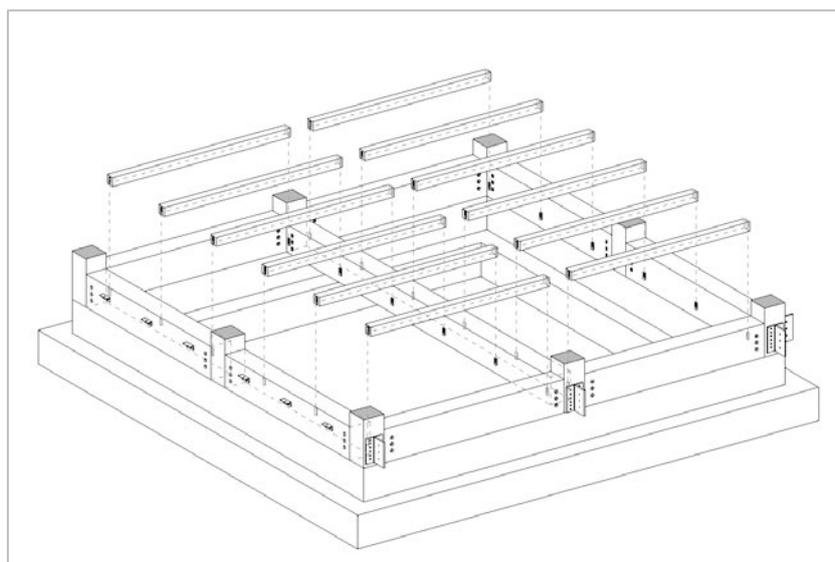


Figura 4-42 Alloggiamento dei travetti

Gli elementi dell'impalcato del solaio contro terra sono costituiti da 8 pannelli sandwich INTEGRO FS PRFV di dimensioni 1000x1800 mm accoppiati in officina con resine aventi spessore totale pari a 64 mm costituito da un tavolato ligneo di 10 mm, un grigliato stampato in vetroresina di 44 mm e un secondo tavolato ligneo di 10 mm con un peso totale pari a  $40 \text{ kg/m}^2 \times 1 \text{ m} \times 1,8 \text{ m} \times 4 = 70 \text{ kg}$  ciascuno (Figura 4-43).

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8.

- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e dispositivo con ventose ad aria compressa adatte al legno, avvitatore.
- Descrizione: una volta agganciato il sistema a ventose alla parte terminale del bozzello della gru si solleva il pannello e lo si posiziona nel campo prefissato. Si collega ogni pannello ad ogni travetto sottostante con 4 viti a testa svasata VGZ7180 della ROTHOBLAAS<sup>33</sup> (diametro 7 mm, lunghezza 180 mm), poste a 45° e a 135°, distanziate tra loro di 40 cm.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie, il collegamento del sistema ad aria compressa, la messa in pressione, lo spostamento del pannello dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione con 8 viti ogni elemento, si stima la durata di minuti 10 per l'alloggiamento del singolo pannello.

3 operai:  $8 \times 10 \text{ min.} = 80 \text{ min.} = 1,4 \text{ h}$

6 operai:  $8 \times 10 \text{ min} / 2 = 40 \text{ min.} = 0,7 \text{ h}$

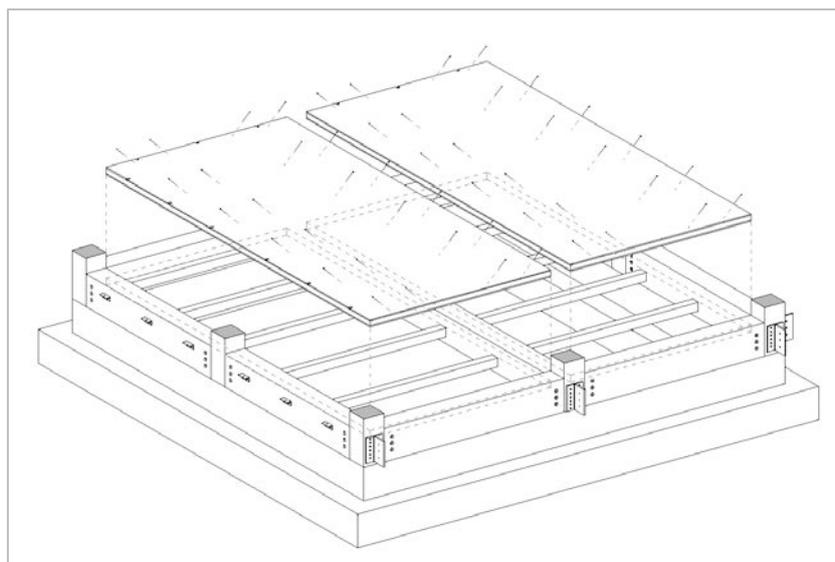


Figura 4-43 Alloggiamento del solaio e giunzione coi travetti

La cerchiatura dell'impalcato viene realizzata con un profilo angolare in acciaio S275 a lati disuguali di dimensioni 50x100x5 mm del peso di 5,3kg/m, pre-forato in officina.

- Unità di misura: metri lineari.
- Quantità: 20 m
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: avvitatore.

- Descrizione: sollevamento manuale, posizionamento e giunzione. Nel piano del solaio si adottano 14 viti KOP 8120 (diametro 8 mm, lunghezza 120 mm) poste in modo da collegare profilo, solaio, travetto sottostante in prossimità della testa. Nel piano ortogonale al solaio si adottano 12 viti KOP 860 (diametro 8 mm, lunghezza 60 mm) poste in prossimità degli estremi dei profili e nelle mezzerie.
- Durata: considerando la velocità di posa e la necessità di inserire in totale 28 viti si stima la durata di minuti 60 per la realizzazione della cerchiatura.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai: 60 min. = 1 h

6 operai: 60 min / 2 = 30 min. = 0,5 h

Le travi di bordo del primo solaio avranno dimensioni 300x200x1800mm e saranno in legno lamellare GL28h per un peso di circa 60 kg comprensive della piastra metallica di ripartizione asolata. La trave di spina avrà dimensioni 250x200x3800mm realizzata in legno lamellare GL28h per un peso di 120 kg (Figura 4-44).

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8 travi di bordo e 1 trave di spina.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e funi metalliche, chiave dinamometrica, scala doppia per raggiungere il piano di lavoro a quota 3 m.
- Descrizione: le travi, che arrivano a piè d'opera con gli elementi femmina del giunto PITZL per i travetti già posizionati, vengono calate una alla volta sulle piastre a "T" con l'ausilio della gru mobile industriale. Una volta posizionato il singolo elemento questo va giuntato tramite 3 bulloni M12 8.8 200 mm ad ognuna delle due piastre a "T" di sua pertinenza imprimendo una coppia di serraggio pari a 70 Nm con l'ausilio della scala.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento della trave al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione e considerando che la lavorazione avviene in quota, si stima la durata di minuti 30 per l'alloggiamento della singola trave.

Indipendentemente dalla manodopera, considerando l'uso di una gru sola, si hanno 9 x 30 min. = 270 min. = 4,5 h

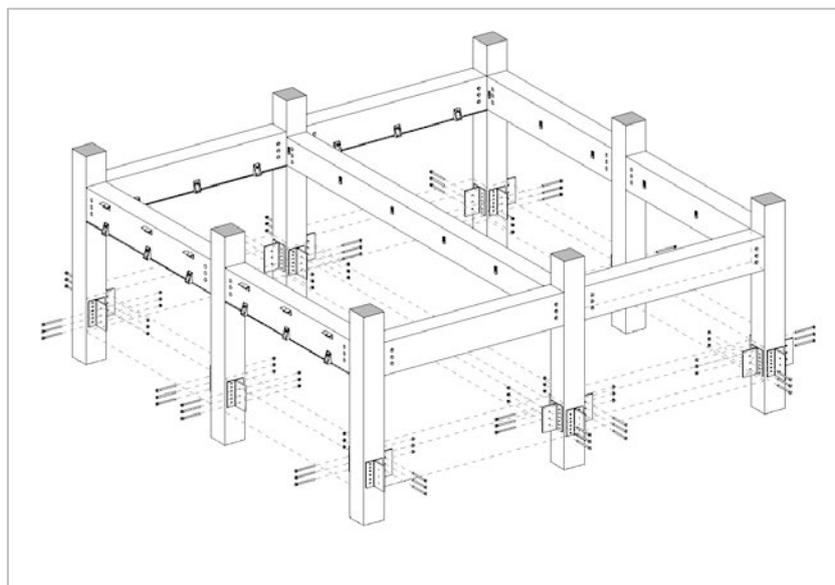


Figura 4-44 Alloggiamento delle travi munite di piastre di ripartizione e mensole per la post compressione

I travetti del primo solaio avranno dimensioni 80x120x1776 mm in legno lamellare GL28h per un peso di circa 10 kg.

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 12.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia (piano di lavoro a 3 m).
- Descrizione: i travetti, che arrivano a piè d'opera con gli elementi maschio del giunto PITZL già posizionati, vengono collocati manualmente.
- Durata: non essendoci particolari operazioni preliminari necessarie e dato l'esiguo peso degli elementi si stima la durata di minuti 2 per l'alloggiamento del singolo travetto.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai: 12 x 2 min. = 24 min. = 0,4 h

6 operai: 12 x 2 min. / 2 = 12 min. = 0,2 h

Gli elementi dell'impalcato del primo solaio sono costituiti da 8 pannelli sandwich INTEGRO FS PRFV di dimensioni 1000x1800 mm accoppiati in officina con resine aventi spessore totale pari a 64 mm costituito da un tavolato ligneo di 10 mm, un grigliato stampato in vetroresina di 44 mm e un secondo tavolato ligneo di 10 mm con un peso totale pari a  $40 \text{ kg/m}^2 \times 1 \text{ m} \times 1,8 \text{ m} \times 4 = 70 \text{ kg}$  ciascuno.

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e dispositivo con ventose ad aria compressa adatte al legno, avvitatore, scala doppia.
- Descrizione: una volta agganciato il sistema a ventose alla parte terminale del bozzello della gru si solleva il pannello e lo si posiziona nel campo prefissato. Si collega ogni pannello ad ogni travetto sottostante con 4 viti a testa svasata VGZ7180 della ROTHOBLAAS (diametro 7 mm, lunghezza 180 mm), poste a 45° e a 135°, distanziate tra loro di 40 cm.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie, il collegamento del sistema ad aria compressa, la messa in pressione, lo spostamento del pannello dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione con 8 viti ogni elemento e che si tratta di lavorazioni in quota, si stima la durata di minuti 15 per l'alloggiamento del singolo pannello.

3 operai:  $8 \times 15 \text{ min.} = 120 \text{ min.} = 2 \text{ h}$

6 operai:  $8 \times 15 \text{ min} / 2 = 60 \text{ min.} = 1 \text{ h}$

La cerchiatura dell'impalcato viene realizzata con un profilo angolare in acciaio S275 a lati disuguali di dimensioni 50x100x5 mm del peso di 5,3kg/m, pre-forato in officina.

- Unità di misura: metri lineari.
- Quantità: 20 m
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: avvitatore.
- Descrizione: sollevamento manuale, posizionamento e giunzione. Nel piano del solaio si adottano 14 viti KOP 8120 (diametro 8 mm, lunghezza 120 mm) poste in modo da collegare profilo, solaio, travetto sottostante in prossimità della testa. Nel piano ortogonale al solaio si adottano 12 viti KOP 860 (diametro 8 mm, lunghezza 60 mm) poste in prossimità degli estremi dei profili e nelle mezzerie.

- Durata: considerando la velocità di posa e la necessità di inserire in totale 28 viti si stima la durata di minuti 60 per la realizzazione della cerchiatura.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai: 60 min. = 1 h

6 operai: 60 min / 2 = 30 min. = 0,5 h

Per lavorare in sicurezza al livello del primo solaio è necessario apprestare gli opportuni dispositivi di sicurezza. Per ottimizzare le fasi costruttive, dove possibile si è scelto di utilizzare elementi che, una volta cessata la loro funzione di dispositivo di sicurezza, potessero divenire parte integrante del sistema finito. La funzione di fermapiede è svolta da un tavolato spesso 2,2 cm e alto 30 cm innestato su un profilo a freddo ad "U" 40x25x1,5 mm che funge da guida, giuntata alla cerchiatura. Questo profilo successivamente serve inoltre per la corretta realizzazione del pacchetto di finitura del solaio e, durante la vita utile dell'edificio, consente la rapida ispezione degli impianti che passano nella controparete interna.

Il parapetto, che raggiunge quota 1,05 m, è costituito dal primo tavolato ligneo di ripartizione, di spessore 5 cm. Questo elemento, è collegato ai pilastri tramite piastre dritte 195x20x2 mm con 13 fori. Per completare il presidio anticaduta, ad una quota intermedia tra fermapiede e parapetto, si fa passare un cavo metallico tramite l'utilizzo di occhielli inseriti nei pilastri. Questo componente viene rimosso una volta ultimata la realizzazione del tamponamento.

Ogni lato con rischio di caduta presenta quindi un tavolato in legno lamellare 5x20x180 cm con funzione di parapetto, 1 tavolato in legno lamellare 2,2x30x380 cm e rispettiva guida ad "U" 40x25x1,5 mm con funzione di fermapiede (Figura 4-45).

- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: avvitatore, scala doppia.
- Descrizione: sollevamento manuale, posizionamento e giunzione. La guida viene giuntata alla cerchiatura con viti auto perforanti a testa piatta (diametro 3 mm, lunghezza 30mm) con passo di 30cm; il pannello fermapiede viene semplicemente inserito nella guida. Le tavole con funzione di parapetto vengono momentaneamente fissate ai pilastri con l'ausilio delle piastre forate e di 8 viti HBS450 (diametro 4 mm, lunghezza 50 mm) della ROTHOBLAAS.
- Durata: considerando la velocità di posa e la necessità di inserire in totale circa 20 viti si stima la durata di minuti 30 per la realizzazione dei dispositivi di sicurezza collettiva per singolo lato con rischio caduta.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai: 30 min. = 0.5 h per lato con rischio caduta

6 operai: 30 min / 2 = 15 min. = 0,3 h per lato con rischio caduta

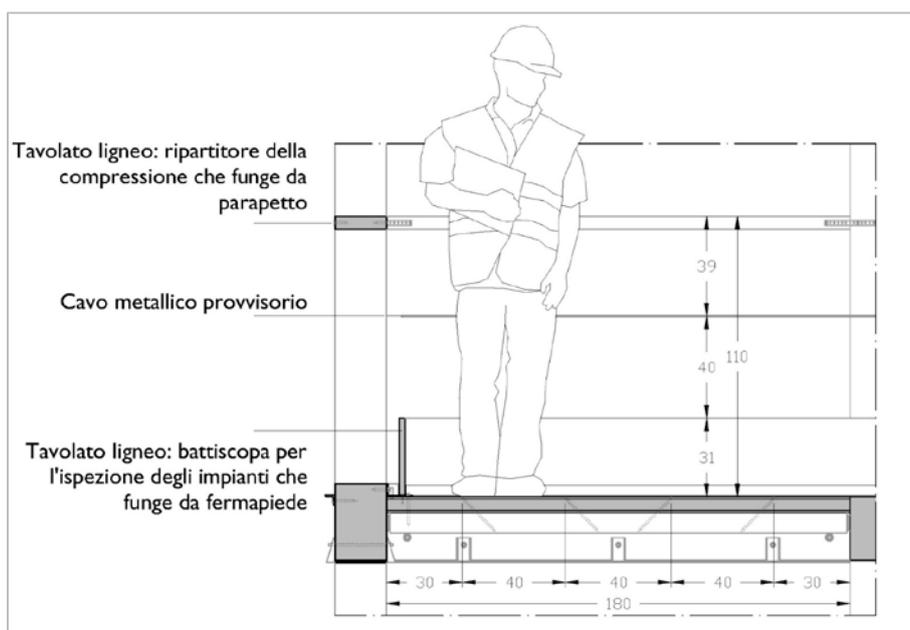


Figura 4-45 Dispositivi di sicurezza collettiva

Le travi di bordo del secondo solaio avranno dimensioni 300x200x1800mm e saranno in legno lamellare GL28h per un peso di circa 60 kg comprensive della piastra metallica di ripartizione asolata. La trave di spina avrà dimensioni 250x200x3800mm realizzata in legno lamellare GL28h per un peso di 120 kg (Figura 4-46).

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8 travi di bordo e 1 trave di spina.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e funi metalliche, chiave dinamometrica, scala doppia per raggiungere il piano di lavoro a quota 3 m.
- Descrizione: le travi, che arrivano a piè d'opera con gli elementi femmina del giunto PITZL per i travetti già posizionati, vengono calate una alla volta sulle piastre a "T" con l'ausilio della gru mobile industriale. Una volta posizionato il singolo elemento questo va giuntato tramite 3 bulloni M12 8.8 200 mm ad ognuna delle due piastre a "T" di sua pertinenza imprimendo una coppia di serraggio pari a 70 Nm con l'ausilio della scala.

- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento della trave al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione e considerando che la lavorazione avviene in quota, si stima la durata di minuti 30 per l'alloggiamento della singola trave.

Indipendentemente dalla manodopera, considerando l'uso di una gru sola, si hanno  $9 \times 30$  min. = 270 min. = 4,5 h

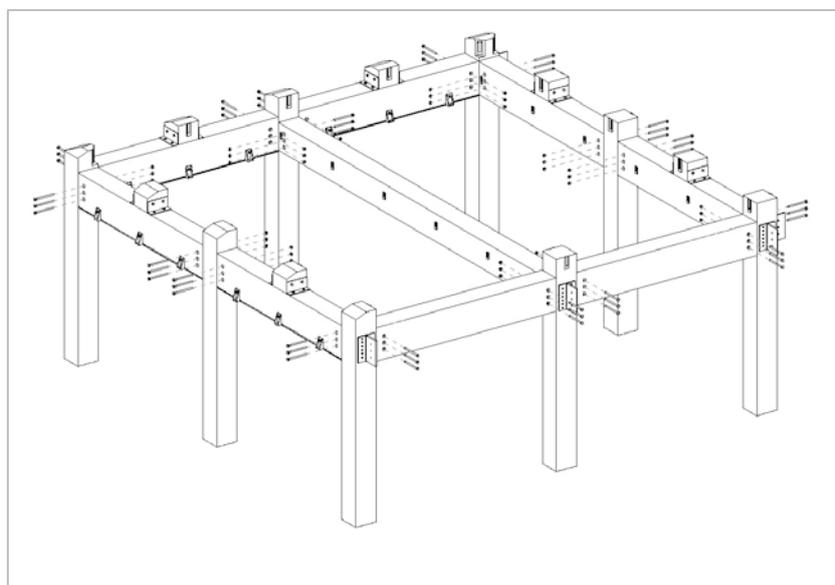


Figura 4-46 Alloggiamento delle travi munite di piastre di ripartizione e appoggi per la copertura

I travetti del secondo solaio avranno dimensioni 80x120x1776 mm in legno lamellare GL28h per un peso di circa 10 kg.

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 12.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia (piano di lavoro a 3 m).
- Descrizione: i travetti, che arrivano a piè d'opera con gli elementi maschio del giunto PITZL già posizionati, vengono collocati manualmente.
- Durata: non essendoci particolari operazioni preliminari necessarie e dato l'esiguo peso degli elementi si stima la durata di minuti 2 per l'alloggiamento del singolo travetto.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai:  $12 \times 2 \text{ min.} = 24 \text{ min.} = 0,4 \text{ h}$

6 operai:  $12 \times 2 \text{ min.} / 2 = 12 \text{ min.} = 0,2 \text{ h}$

Gli elementi dell'impalcato del secondo solaio sono costituiti da 8 pannelli sandwich INTEGRO FS PRFV di dimensioni 1000x1800 mm accoppiati in officina con resine aventi spessore totale pari a 64 mm costituito da un tavolato ligneo di 10 mm, un grigliato stampato in vetroresina di 44 mm e un secondo tavolato ligneo di 10 mm con un peso totale pari a  $40 \text{ kg/m}^2 \times 1 \text{ m} \times 1,8 \text{ m} \times 4 = 70 \text{ kg}$  ciascuno.

- Unità di misura: numero elementi.
- Quantità: 8.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e dispositivo con ventose ad aria compressa adatte al legno, avvitatore, scala doppia.
- Descrizione: una volta agganciato il sistema a ventose alla parte terminale del bozzello della gru si solleva il pannello e lo si posiziona nel campo prefissato. Si collega ogni pannello ad ogni travetto sottostante con 4 viti a testa svasata VGZ7180 della ROTHOBLAAS (diametro 7 mm, lunghezza 180 mm), poste a  $45^\circ$  e a  $135^\circ$ , distanziate tra loro di 40 cm.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie, il collegamento del sistema ad aria compressa, la messa in pressione, lo spostamento del pannello dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione con 8 viti ogni elemento e che si tratta di lavorazioni in quota, si stima la durata di minuti 15 per l'alloggiamento del singolo pannello.

3 operai:  $8 \times 15 \text{ min.} = 120 \text{ min.} = 2 \text{ h}$

6 operai:  $8 \times 15 \text{ min} / 2 = 60 \text{ min.} = 1 \text{ h}$

La cerchiatura dell'impalcato viene realizzata con un profilo angolare in acciaio S275 a lati disuguali di dimensioni 50x100x5 mm del peso di 5,3kg/m, pre-forato in officina.

- Unità di misura: metri lineari.
- Quantità: 20 m
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: avvitatore.

- Descrizione: sollevamento manuale, posizionamento e giunzione. Nel piano del solaio si adottano 14 viti KOP 8120 (diametro 8 mm, lunghezza 120 mm) poste in modo da collegare profilo, solaio, travetto sottostante in prossimità della testa. Nel piano ortogonale al solaio si adottano 12 viti KOP 860 (diametro 8 mm, lunghezza 60 mm) poste in prossimità degli estremi dei profili e nelle mezzerie.
- Durata: considerando la velocità di posa e la necessità di inserire in totale 28 viti si stima la durata di minuti 60 per la realizzazione della cerchiatura.

Data la leggerezza degli elementi e la semplicità della lavorazione ad una manodopera maggiore corrispondono tempi minori.

3 operai: 60 min. = 1 h

6 operai: 60 min / 2 = 30 min. = 0,5 h

In sommità la sicurezza dei lavoratori viene assicurata da sostegni prefabbricati, collocati in prossimità della testa dei pilastri di bordo, tra i quali corrono 3 tavolati lignei: si adotta un parapetto appartenente alla CLASSE B per coperture con inclinazione inferiore a 30 e senza limitazioni per l'altezza di caduta (Figura 4-47).

- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: trabattello, avvitatore, gru mobile per il sollevamento.
- Durata: considerando la velocità di posa si stima la durata di minuti 30 per la realizzazione dei dispositivi di sicurezza collettiva in copertura per singolo lato tamponato.

3 operai: 30 min. = 0,5 h per lato con rischio di caduta

6 operai: 30 min / 2 = 0,3 h per lato con rischio di caduta

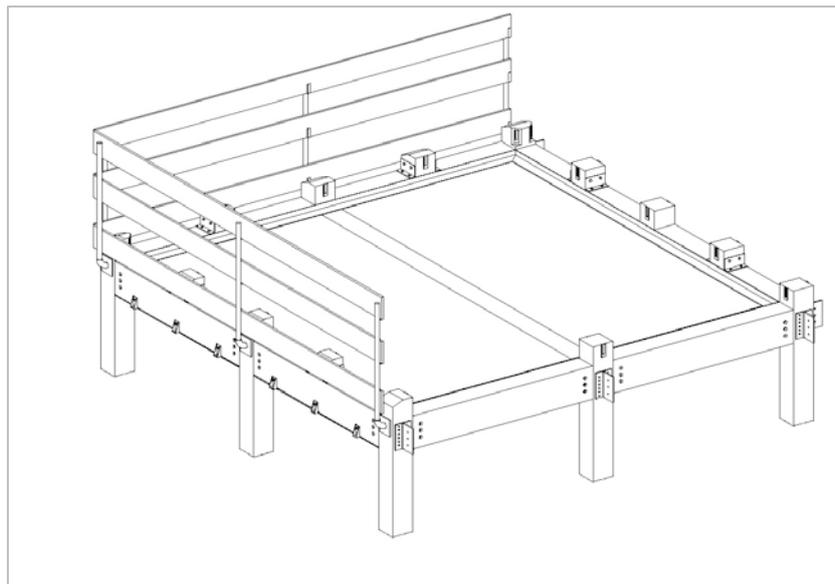


Figura 4-47 Parapetto a norma sulla parte terminale dei pilastri

#### 4.4.2 COPERTURA

Nella realizzazione della copertura si ha sempre la presenza di 3 operai dato che, per ottimizzare le lavorazioni, il resto della squadra, una volta terminato il telaio, inizia la realizzazione della parete.

La struttura principale è costituita da morali in legno lamellare GL28h con sezione unica di dimensioni 80x120 mm, di diverse lunghezze a seconda del posizionamento e connessi in sommità da un elemento ripartitore ottagonale di colmo (Figura 4-48).

- Unità di misura: numero di elementi.
- Quantità: 4 elementi lunghi 1910 mm, 4 elementi lunghi 2694 mm, 8 elementi lunghi 994 mm.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e funi metalliche, trabattello, puntelli.
- Descrizione: realizzazione della struttura tridimensionale che sorregge la copertura in cui ogni giunto sfrutta il sistema PITZL. È necessario adottare puntelli provvisori fino al completamento delle operazioni di assemblaggio.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il terzo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 60 per il completamento dell'intera struttura.

3 operai: 60 min. = 1 h

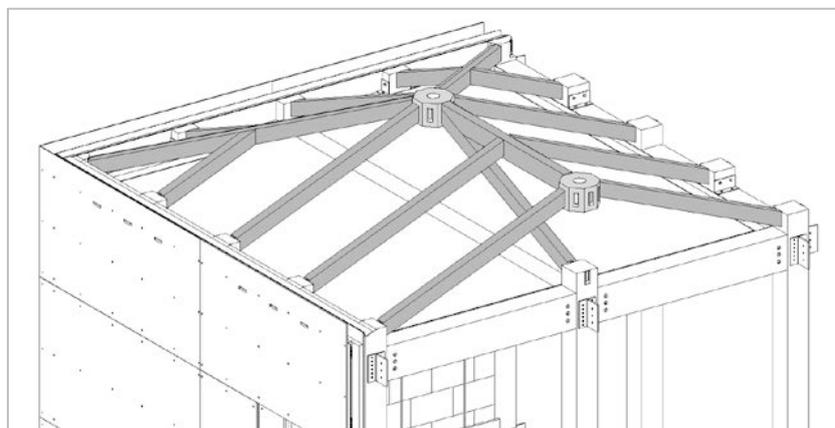


Figura 4-48 Struttura di copertura

Per agevolare la realizzazione del manto di copertura si procede all'installazione di profilo in alluminio 50x80x3 mm da cui poi si partirà per il posizionamento dei pannelli accoppiati OSB-isolante.

- Unità di misura: metri lineari.
- Quantità: 4 m per ogni lato esterno del modulo.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: avvitatore, gru mobile per il sollevamento.
- Descrizione: posa e giunzione dei profili lungo tutti i bordi esterni sulla parte svasata della testa del pilastro e degli appoggi in mezzeria delle travi.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 30 per la realizzazione del profilo di partenza sul singolo lato.

3 operai: 30 minuti = 0,5 h per singolo lato

Si procede poi alla posa del perlinato in abete di spessore 34 mm (Figura 4-49).

- Unità di misura: metri quadrati.
- Quantità: 15 m<sup>2</sup>.

- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: avvitatore, gru mobile per il sollevamento.
- Descrizione: posa e giunzione delle perline sulla struttura in morali.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 10 per la realizzazione di 1 metro quadro di perlinato.

3 operai:  $10 \text{ min./m}^2 \times 15 \text{ m}^2 = 150 \text{ min.} = 2,5 \text{ h}$

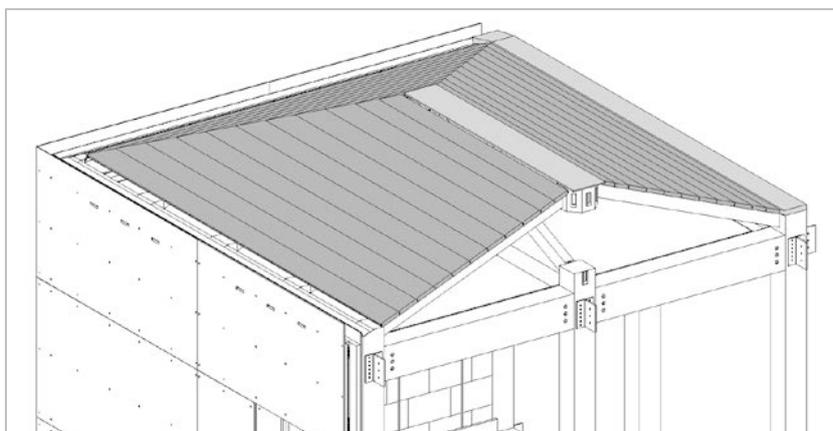


Figura 4-49 Tavolato di copertura.

Al di sopra del perlinato viene posta una guaina impermeabilizzante di spessore 4 mm (Figura 4-50).

- Unità di misura: metri quadrati.
- Quantità:  $15 \text{ m}^2$ .
- Descrizione: posa e giunzione della guaina alle perline.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 2 per la realizzazione di 1 metro quadro di perlinato.

3 operai:  $2 \text{ min./m}^2 \times 15 \text{ m}^2 = 30 \text{ min.} = 0,5 \text{ h}$

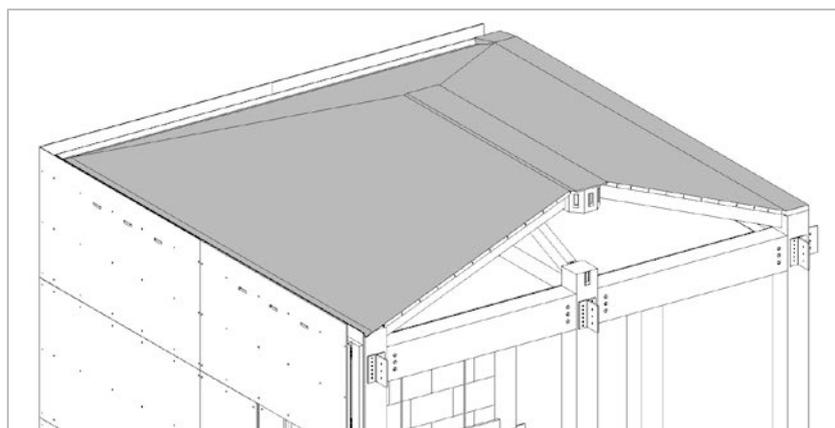


Figura 4-50 Guaina impermeabilizzante

Per garantire un isolamento adeguato si installano dei pannelli LAMBDA Wood con intercapedini d'aria realizzati accoppiando uno strato di legno OSB ed un isolante sagomato per uno spessore totale di 11 cm (10 cm di isolante e 1 cm di OSB) (Figura 4-51).

- Unità di misura: metri quadrati.
- Quantità: 15 m<sup>2</sup>.
- Descrizione: posa dei pannelli prefabbricati e sagomati in officina.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 6 per la realizzazione di 1 metro quadro di coibentazione.

3 operai: 6 min./m<sup>2</sup> x 15 m<sup>2</sup> = 90 min. = 1,5 h



Figura 4-51 Pannello accoppiato OSB-isolante sagomato, grondaia, lamiera stirata per il filtraggio della neve nel compluvio

Sopra i pannelli isolanti è prevista una guaina traspirante Permoeasy H 1 mm.

- Unità di misura: metri quadrati.
- Quantità: 15 m<sup>2</sup>.
- Descrizione: posa e giunzione della guaina ai pannelli.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione con strisce adesive si stima la durata di minuti 2 per la realizzazione di 1 metro quadro di perlinato.

$$3 \text{ operai: } 2 \text{ min./m}^2 \times 15 \text{ m}^2 = 30 \text{ min.} = 0,5 \text{ h}$$

Il rivestimento esterno è costituito da pannelli Rockpanel Xtreme 8 mm del peso di 9,6 kg/m<sup>2</sup> (Figura 4-52).

- Unità di misura: metri quadrati.
- Quantità: 15 m<sup>2</sup>.
- Descrizione: posa e giunzione dei pannelli esterni.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione viti con viti si stima la durata di minuti 16 per la realizzazione di 1 metro quadro di copertura.

$$3 \text{ operai: } 16 \text{ min./m}^2 \times 15 \text{ m}^2 = 240 \text{ min.} = 4 \text{ h}$$

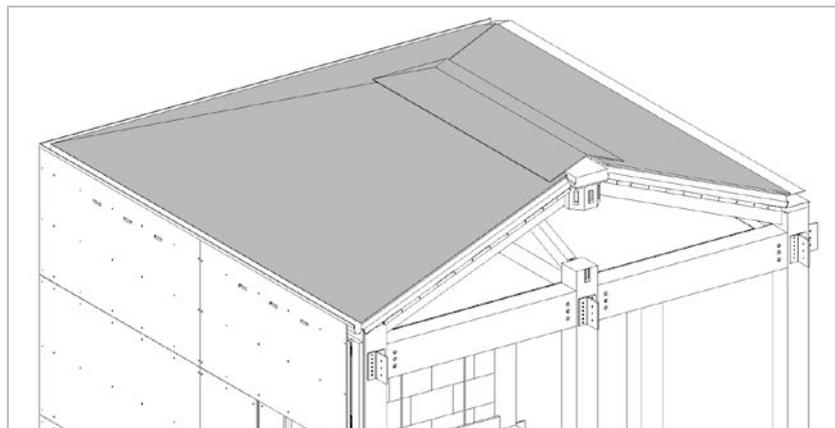


Figura 4-52 Pannelli esterni e colmo ventilato

Una volta completata la stratigrafia del coperto è necessaria la rimozione del parapetto di sicurezza.

- Mezzi, attrezzature, apprestamenti: trabattello, avvitatore.
- Durata: considerando la velocità di disarmo si stima la durata di minuti 20 per la rimozione dei dispositivi di sicurezza collettiva in copertura per singolo lato di installazione.

3 operai: 20 min. = 0,3 h per singolo lato con rischio di caduta

Per il corretto deflusso delle acque meteoriche è necessaria l'installazione di una grondaia.

- Unità di misura: metri lineari.
- Quantità: 4 m per ogni lato esterno del modulo.
- Mezzi, attrezzature, apprestamenti: trabattello, avvitatore.
- Descrizione: posa e giunzione della grondaia alla struttura.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento del materiale imballato al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dell'elemento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro localizzata sopra il secondo solaio e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 20 per l'alloggiamento di 4 m di grondaia.

3 operai: 20 min. = 0,3 h per singolo lato

---

### 4.4.3 PARETE A SECCO

---

Nella quarta situazione, data la maggior durata delle operazioni sulle pareti, è possibile, una volta completata la copertura, confluire tutta la forza lavoro sul tamponamento. In questo caso, dalle operazioni successive alla compressione dei tiranti, è possibile considerare tutta la manodopera operante sul completamento della parete.

La modalità appena esposta è applicabile anche alla terza situazione per la fase finale in cui vengono fissati i pannelli di facciata.

Prima di iniziare la posa dei blocchi in laterizio è necessario installare, in tutti i campi che prevedono il tamponamento, degli irrigidimenti lignei. Questi sono realizzati con dei morali in legno lamellare GL28h con sezione 60x60 mm e lunghezze varie a seconda della posizione e delle aperture introdotte.

- Unità di misura: numero elementi nel singolo campo.
- Quantità: 4.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia per il piano di lavoro a 3 m e/o trabattello per il piano di lavoro a 6,5 m, avvitatore.
- Descrizione: sollevamento manuale, posizionamento e giunzione al telaio e ai ripartitori lignei con viti HBS6140 (diametro 6 mm, lunghezza 140 mm) della ROTHOBLAAS.
- Durata: considerando la velocità di posa e la necessità di inserire in totale 6 viti in ognuno dei 4 elementi si stima la durata di minuti 30 per la realizzazione degli irrigidimenti lignei competenti al singolo campo.

3 operai: 20 min. x 4 campi = 80 min. = 1,3 h per ogni lato tamponato

Per il riempimento di ciascun campo bisogna considerare che i corsi sono formati da blocchi e semiblocchi Porotherm PLANA+ 20-0,08 (20x24,9x40 cm) intervallati da tavolati in legno lamellare con spessore 5 cm.

- Unità di misura: numero elementi nel singolo campo.
- Quantità: 2 tavolati, numero blocchi variabile a seconda delle aperture. Nella configurazione con tamponamento pieno senza aperture si hanno 11 semiblocchi e 44 blocchi.

- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: gru mobile industriale con bozzello dotato di gancio e funi metalliche, scala doppia per il piano di lavoro a 3 m e/o trabattello per il piano di lavoro a 6,5 m, avvitatore.
- Descrizione: posa degli elementi come da progetto con giunzione preliminare dei tavolati ai pilastri tramite piastre dritte 195x20x2 mm con 13 fori.
- Durata: considerando le operazioni preliminari necessarie quali il collegamento dei laterizi imballati al gancio del bozzello con funi metalliche, lo spostamento dalla zona di stoccaggio all'area di lavoro e quelle inerenti al corretto posizionamento e alla giunzione si stima la durata di minuti 40 per il posizionamento del tamponamento nel singolo campo.

3 operai:40 min. x 4 campi = 160 min. = 2,6 h per ogni lato tamponato

Per garantire il corretto ingranamento dei blocchi vanno installati i tiranti e attribuita la post compressione ad ogni campo tamponato. Vengono utilizzate barre filettate M8 in acciaio aventi varie lunghezze (massimo 3 m).

- Unità di misura: numero elementi nel singolo campo.
- Quantità: 6.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia, trabattello e chiave dinamometrica.
- Descrizione: inserimento degli elementi come da progetto e tensionamento.
- Durata: si stima la durata di minuti 30 per il l'inserimento e il tensionamento dei tiranti interni ed esterni nel singolo campo.

3 operai:30 min. x 4 campi = 120 min. = 2 h per ogni lato tamponato

I sostegni per la parete ventilata sono realizzati con profili in alluminio ad "L" 60x60x2mm e a "T" 40x80x2mm aventi lunghezza pari a 955mm o 1180mm.

- Unità di misura: numero elementi nel singolo campo.
- Quantità: 12 (+3 per il pilastro limitrofo).
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia, trabattello, avvitatore.
- Descrizione: accostamento degli elementi o agli irrigidimenti lignei o ai sostegni del sistema ALLFACE posti sui pilastri e loro giunzione con viti autofilettanti a testa esagonale (diametro

3 mm, lunghezza 50 mm) passanti nei fori e nelle asole realizzate in officina dei profili in alluminio.

- Durata: considerando la velocità di posa e la necessità di inserire in totale 5 viti in ognuno dei 15 elementi pertinenti si stima la durata di minuti 30 per la realizzazione dei sostegni della contro parete esterna competenti al singolo campo.

3 operai: 30 min. x 4 campi = 120 min. = 2 h per ogni lato tamponato

La posa dell'isolante termico consiste nella realizzazione di uno strato di isolante Bitum Fiber prodotto dalla BETONWOOD (spessore 4 cm in corrispondenza del laterizio, 2 cm in corrispondenza del telaio ligneo) e strato di isolante Rockwool Acoustic 225 Plus (4 cm in corrispondenza del telaio ligneo).

- Unità di misura: metri quadrati.
- Quantità: 5,5 m<sup>2</sup> strati di primo isolante, 2,5 m<sup>2</sup> di secondo isolante per ogni campo.
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia, trabattello, avvitatore.
- Descrizione: accostamento alla parete dei pannelli e giunzione di ogni strato con il tamponamento in laterizio reso solido dalla post compressione tramite viti e tasselli ISULFIX della Rothoblaas.
- Durata: si stima che per ogni metro quadro di ogni strato occorrono 10 minuti, per cui, sommando la metratura di ogni strato si ottengono 5,5 + 2,5 = 8 m<sup>2</sup>, si hanno minuti 80 per la realizzazione del cappotto esterno del singolo campo.



Figura 4-53 Vite e tassello per isolante su muratura Isulfix (Rothoblaas).

3 operai:80 min. x 4 campi = 320 min. = 5,3 h per ogni lato tamponato

Rivestimento esterno di facciata è costituito da pannelli Rockpanel Xtreme 8 mm del peso di 9,6 kg/m<sup>2</sup> che ricoprono un'area di 6 m<sup>2</sup>.

- Unità di misura: numero elementi
- Quantità: 3 (in assenza di aperture).
- Attrezzature, apprestamenti, strumenti: scala doppia, trabattello, strumento per la rivettatura.
- Descrizione: accostamento ai sostegni in alluminio dei pannelli e giunzione tramite 18 rivetti per ogni elemento.
- Durata: considerando le operazioni necessarie al sollevamento dei pannelli, al giusto allineamento e alla rivettatura si stimano minuti 60 per la realizzazione del rivestimento esterno del singolo campo.

3 operai:60 min. x 4 campi = 240 min. = 4 h per ogni lato tamponato

---

#### 4.4.4 ANALISI DEI TEMPI DI REALIZZAZIONE

---

Una volta effettuate le analisi relative alle singole lavorazioni è possibile definire diversi diagrammi di Gantt<sup>34</sup> per ciascuna delle ipotesi di lavoro definite all'inizio di questo capitolo che di riportano:

1. squadra di tre uomini che realizza un modulo con un solo lato tamponato (Figura 4-91)
2. squadra di tre uomini che realizza un modulo con due lati tamponati (Figura 4-92)
3. squadra di sei uomini che realizza un modulo con un solo lato tamponato (Figura 4-93)
4. squadra di sei uomini che realizza un modulo con due lati tamponati (Figura 4-94)

Risulta utile, ai fini dell'analisi, raccogliere in una tabella riassuntiva (Tabella 4-20) i dati salienti relativi ai tempi di costruzione del telaio, della copertura e della parete comprensiva di finiture.

Ipotesi	Operai	Lati tamponati	Telaio	Copertura	Parete	Totale	
			h	h	h	h	gg
1	3	1	26,6	11,1	17,2	54,9	6,8
2	3	2	27,6	12,2	34,4	74,2	9,3
3	6	1	21,4	11,1	17,2	38,6	4,8
4	6	2	22,0	12,2	34,4	56,4	7,0

Tabella 4-20 Tempi relativi alle lavorazioni nelle diverse ipotesi considerate

Nei confronti della realizzazione del telaio ligneo si evince che i tempi sono quasi indipendenti dal numero di lati tamponati. In questo senso incide soltanto la predisposizione dei sistemi di sicurezza ai diversi livelli. L'aumento della manodopera ha un'incidenza leggermente maggiore ma, avendo considerato la presenza in cantiere di una sola gru mobile, le lavorazioni che implicano spostamento di carichi pesanti non vengono accelerate particolarmente dalla presenza di un maggior numero di operai. Il miglioramento è quantificabile in circa il 20%.

Avendo ipotizzato di procedere contemporaneamente, quando possibile, alla realizzazione della copertura e della parete, i lavori sul coperto vengono eseguiti sempre da una squadra di tre operai. Essendo inoltre le lavorazioni pressoché indipendenti dal numero di lati tamponati, i tempi di realizzazione di questa fase risultano praticamente costanti in tutte e quattro le ipotesi fatte.

In conseguenza delle ipotesi adottate, anche alla realizzazione delle pareti e delle finiture esterne, eseguite in contemporanea alla copertura, è assegnata sempre una squadra di 3 operai. I tempi di esecuzione dipendono quindi solamente dal numero di lati tamponati. Il maggior aggravio dovuto alla realizzazione di due lati tamponati è quantificabile in circa il 50%.

Confrontando i tempi complessivi di costruzione del singolo modulo, considerando la contemporaneità di alcune lavorazioni nei casi con presenza di maggiore manodopera, si può notare come il caso 1 (squadra di tre uomini che realizza un modulo con un solo lato tamponato) e il caso 4 (squadra di sei uomini che realizza un modulo con due lati tamponati) comportino lo stesso tempo di realizzazione.

Tenendo in considerazione i dati emersi si può estrapolare la durata del processo di realizzazione di un ipotetico edificio composto da 12 moduli. Sembra lecito infatti, tenendo conto del maggiore spazio di cantiere prevedere la manodopera complessiva composta da 12 operai divisi in 4 squadre, considerare la permanenza in cantiere di 2 gru mobili e di assegnare le fasi realizzative di ogni squadra in modo tale che queste non entrino in conflitto con le altre. Tenendo inoltre presente che in alcuni casi, per i moduli interni, non ci sarà la necessità di realizzare dei tamponamenti armati, e garantendo il coordinamento delle squadre e delle lavorazioni, vitale sia ai fini di una rapida esecuzione sia per la sicurezza dei lavoratori, si può stimare:

- Realizzazione del telaio tramite 4 squadre di 3 operai:  
considerando un tempo medio cautelativo di 25 h per modulo  
 $12 \text{ moduli} \times 25 \text{ h} = 300 \text{ h} / 4 \text{ squadre} = 75 \text{ h}$
- Realizzazione copertura mediante 2 squadre di 3 operai:  
considerando una media di un lato tamponato per ogni modulo  
 $12 \text{ moduli} \times 11 \text{ h} = 132 \text{ h} / 2 \text{ squadre} = 66 \text{ h}$
- Realizzazione dei tamponamenti mediante 2 squadre di 3 operai:  
considerando una media di un lato tamponato per ogni modulo  
 $12 \text{ moduli} \times 17 \text{ h} = 204 \text{ h} / 2 \text{ squadre} = 102$

Considerando che le ultime due fasi cominciano insieme e che sono contemporanee fino alla fine della copertura si stima un tempo di realizzazione dato dalla somma del tempo necessario alla realizzazione del telaio ligneo e della realizzazione dei tamponamenti:

$$75 \text{ h} + 102 \text{ h} = 177 \text{ h} = 22 \text{ giorni lavorativi di } 8 \text{ h}$$

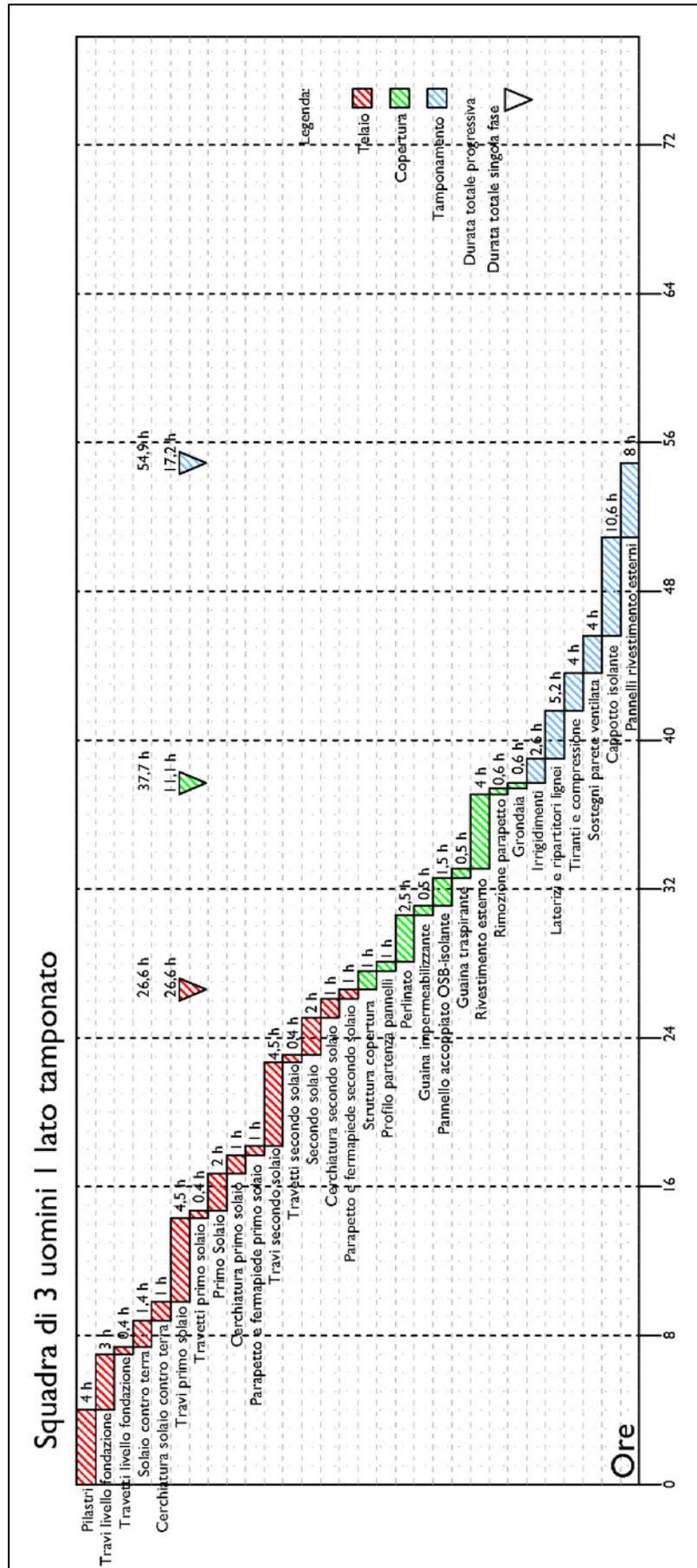


Figura 4-54 Cronoprogramma con 1 squadra e 1 lato tamponato

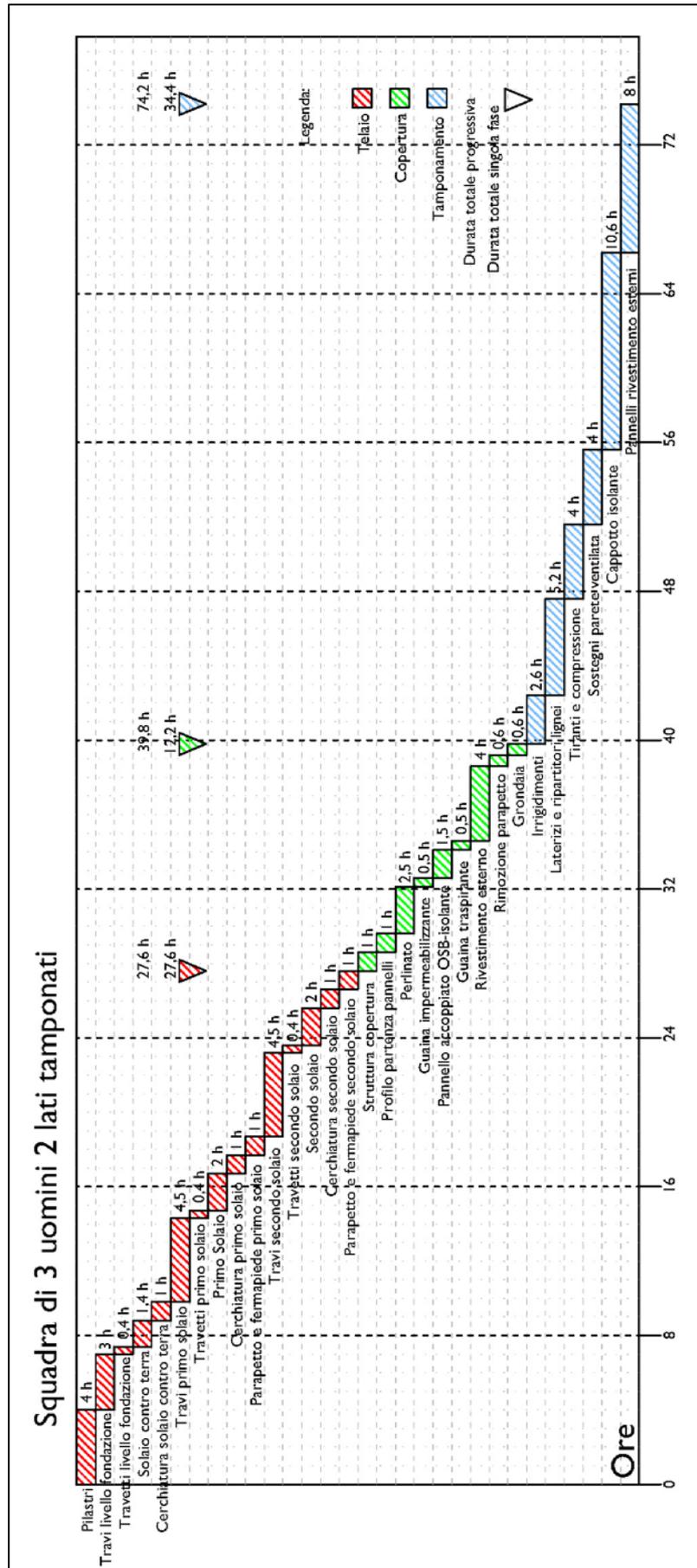


Figura 4-55 Cronoprogramma con 1 squadra e 2 lati tamponati

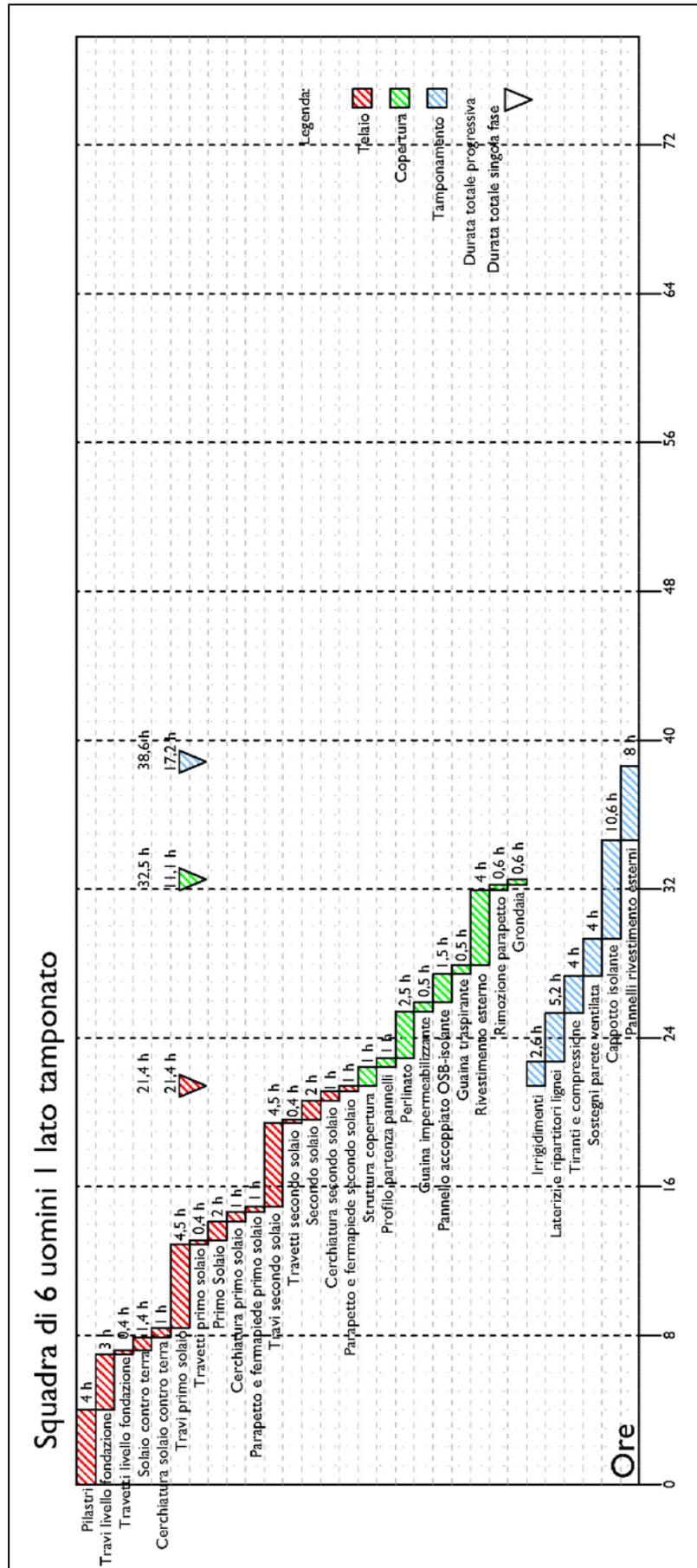


Figura 4-56 Cronoprogramma con 2 squadre e 1 lato tamponato

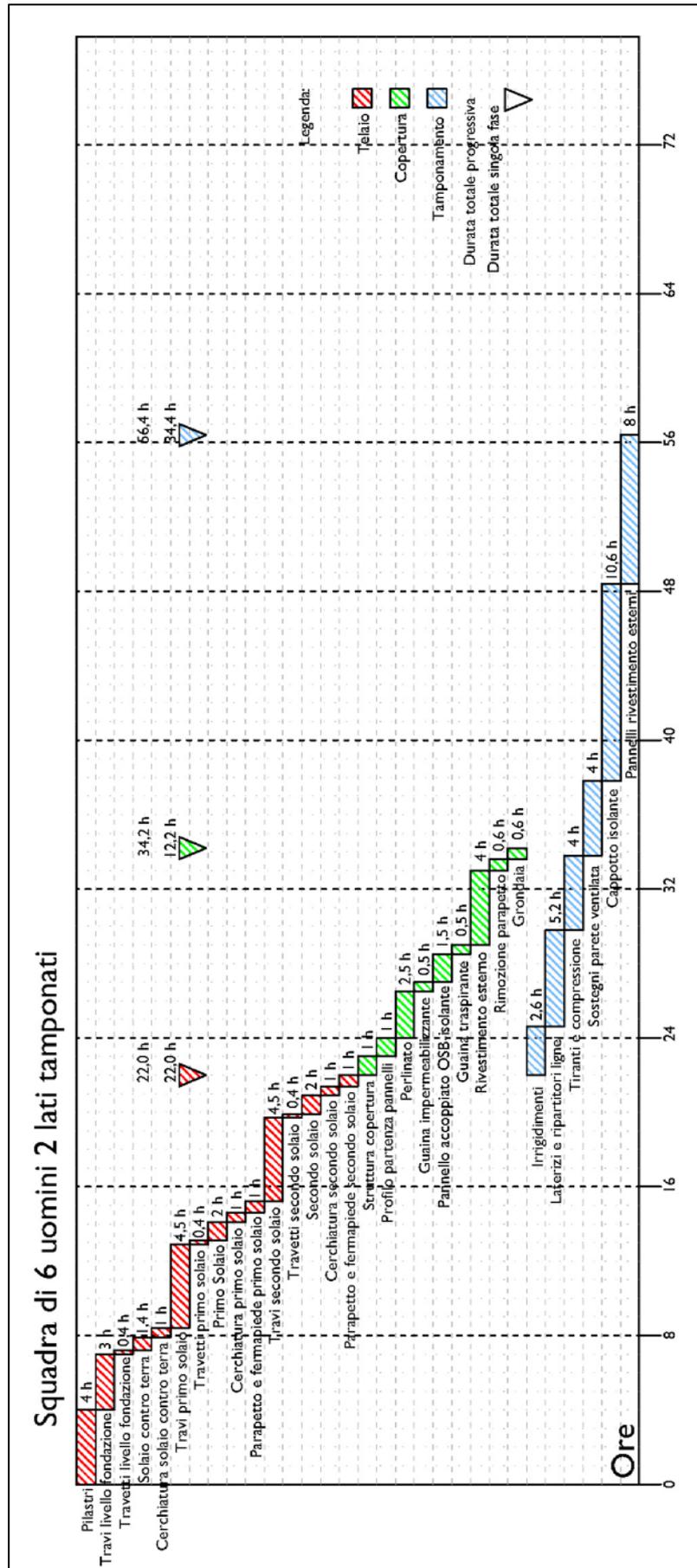


Figura 4-57 Cronoprogramma con 2 squadra e 2 lati tamponati

## 4.5 ESPERIENZE DI PROTOTIPAZIONE

---

L'ultimo passo di questa fase della ricerca è stato quello di affrontare il problema della fattibilità costruttiva del sistema sviluppato. Gli obiettivi preposti di velocità e semplicità di montaggio sono stati indagati attraverso la realizzazione di diversi modelli e prototipi a diverse scale. Queste attività hanno trovato pieno supporto all'interno delle strutture del dipartimento di architettura, nell'ottica di un maggiore avvicinamento della ricerca teorica al sapere costruttivo.

Per i modelli in scala ridotta ci si è avvalsi degli spazi e degli strumenti disponibili all'interno del laboratorio Silab Fabbricazione sito in via Saragozza 8. La struttura si occupa di modellazione e fabbricazione di componenti di progetto ed è stata istituita nel 2010. Dispone di strumentazione per lavorazioni meccaniche di tipo “leggero” e “pesante” nonché di macchine speciali e per la prototipazione 3D che possono consentire la possibilità di fabbricare, fino alla dimensione reale, oggetti autoprodotti e coerenti con le varie fasi di progetto

Prefigurare fisicamente il progetto, verificandone coerenza e consistenza, consente di indagarne e monitorarne le performance acquisendo, contemporaneamente, una significativa sensibilità di controllo materico tramite un flusso di informazioni di tipo “file-to-fabrication”. Questo consente di utilizzare modalità progettuali di induttivo, il “saper fare” alla conoscenza tecnico-scientifica, ed affiancarle ad esperienze formative complesse.

Per il modello in scala 1:2 ci si è avvalsi degli spazi del laboratorio LeDo (Learning by Doing) sito in viale del Risorgimento 2. Si tratta di un laboratorio didattico gestito sinergicamente dal DA e dal DICAM che trae ispirazione dalla attività svolta in questi anni presso i Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau (Villefontaine, Lione) e condotta in collaborazione con alcune Scuole di Ingegneria e Architettura francesi. Questo specifico settore della conoscenza è infatti connotato da una relazione diretta tra la Tecnica e le Forme che non può prescindere dall'indagine sulla fattibilità costruttiva, essendo questa ancora condizionata dall'impiego di processi e metodi di natura materiale e a forte vocazione artigianale.

### 4.5.1 MODELLINO PRELIMINARE IN SCALA 1:10

---

Un primo avvicinamento alla realizzazione del prototipo è stato quello di costruire un modellino in scala ridotta del sistema costruttivo in scala 1:10. Durante il processo evolutivo del sistema, nel caso particolare durante lo sviluppo della seconda evoluzione (2.3), avendo raggiunto un livello di sviluppo piuttosto concreto in termini di definizione delle caratteristiche e delle componenti

del modulo, si è voluto procedere alla prima realizzazione di un modello. Ci si è concentrati sulla realizzazione di una soluzione d’angolo proprio per andare meglio ad indagare un nodo particolare del sistema. Inoltre si è pensato di simulare la realizzazione di una apertura per garantirne la realizzabilità prevista a tavolino. Questo ci ha permesso di capire le proporzioni dimensionali dell’insieme dell’organismo, dando una anteprima sulla bontà della progettazione avvenuta “su carta” e verificare l’eventuale insorgere di interferenze.

I materiali impiegati sono stati il legno di balsa per la struttura portante del telaio, e il polistirene, per i blocchi. Gli strumenti impiegati per il taglio a misura del legno e la formatura dei blocchi sono stati: sega da banco, cutter, colla a caldo, filo a caldo. Inoltre le scarpe metalliche sono state realizzate in materiale plastico impiegando la tecnologia della stampante 3D. Le barre di post compressione sono state realizzate snervando del filo di rame al fine di renderlo rettilineo. Gli elementi protettivi delle barre di post compressione sono anch’essi stati realizzati con stampa 3D.

Toccare con mano il modellino ha messo in luce alcune contraddizioni, che sono state poi modificate nelle successive fasi di progettazione. Un esempio è stato il posizionamento delle staffe metalliche, in particolare sulla disposizione degli ancoraggi per le barre di post compressione si è riusciti a definire meglio il tema d’angolo, altrimenti non facilmente individuabile attraverso la progettazione a tavolino. Si è avuto anche un primo contatto con gli step di montaggio da intraprendere per la realizzazione del tamponamento, molto importanti da individuare e mettere in sequenza per un corretto e più agevole assemblaggio.

Nelle successive immagini, da 1 a 12, vengono presentate le fasi di preparazione e montaggio del modello



Figura 4-58 - 1) elementi del telaio e blocchi - 2) piastra di ripartizione realizzata con stampa 3D



Figura 4-59 - 3) posa del primo corso di blocchi - 4) completamento della prima sezione e posa reticolare lignea

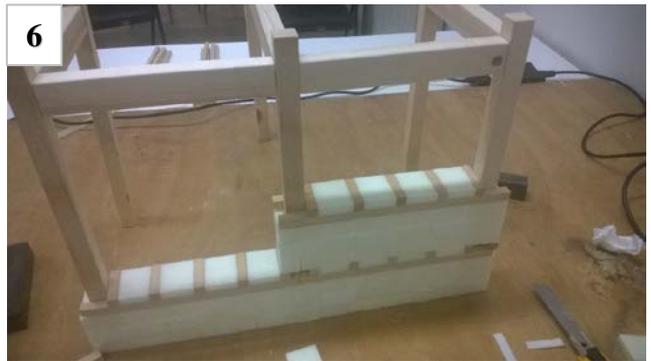


Figura 4-60 - 5) completamento della reticolare lignea - 6) realizzazione della seconda sezione

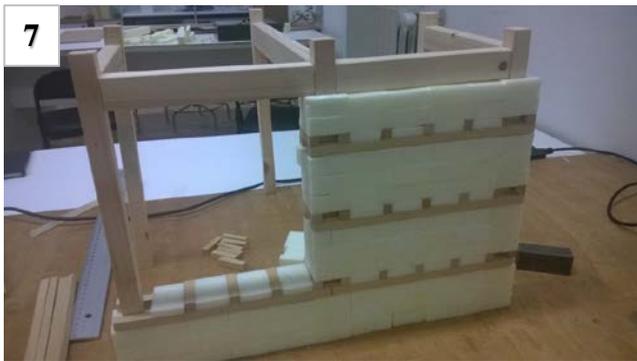


Figura 4-61 - 7) completamento della parete - 8) soluzione d'angolo con apertura



Figura 4-62 - 9) particolare della piastra di post compressione - 10) modello completato

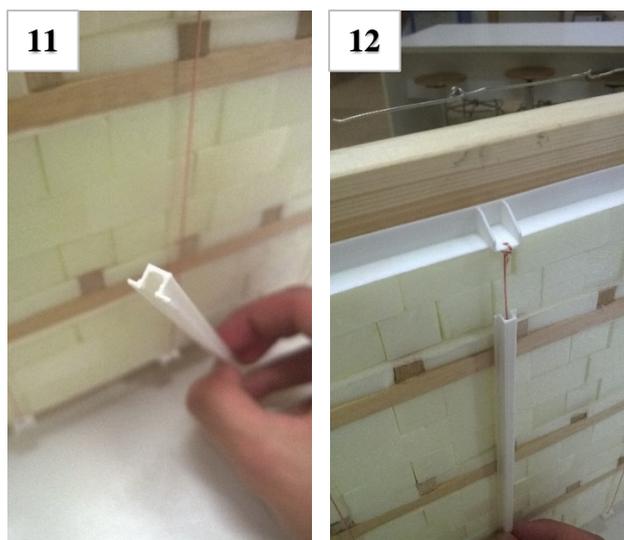


Figura 4-63 - 11) profilo di protezione delle barre - 12) installazione del profilo di protezione

#### 4.5.2 REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO IN SCALA 1:2

In una successiva fase, visti i buoni riscontri ottenuti dal modellino in scala 1:10, ci si è voluti cimentare nella realizzazione di un prototipo in scala 1:2.

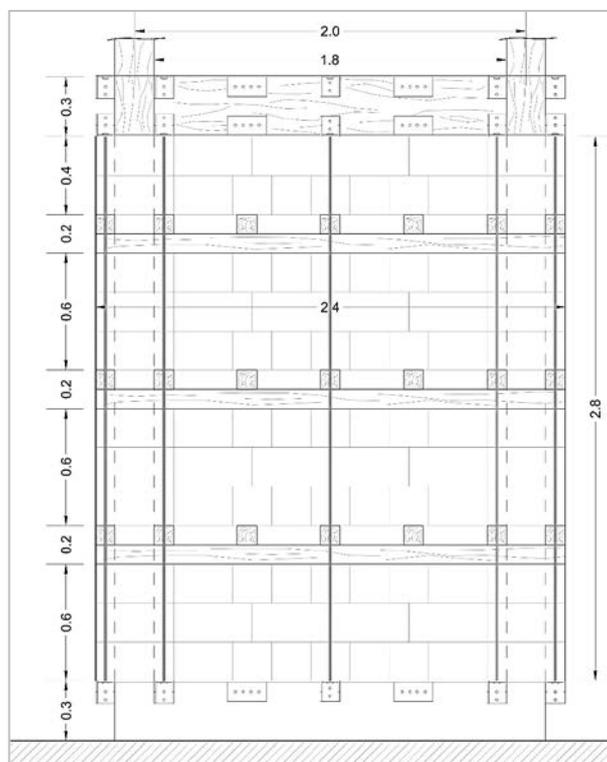


Figura 4-64 Prospetto della porzione di parete realizzata in scala 1:2

A differenza del modellino in scala più piccola, il prototipo vuole anche definire meglio quelle che sono le interazioni tra i materiali che andranno a comporre la struttura una volta realizzata. Quindi oltre che uno studio dal punto di vista di fattibilità realizzativa, la produzione del prototipo è stato un momento molto importante per ricavare informazioni di carattere pratico, che nascono dal fatto che il comportamento e l'applicazione reale dei vari materiali componenti i “mattoni” del sistema sono eterogenei, e possono non rispondere esattamente come ci si aspetti dal progetto realizzato “su carta”.

Pur non lavorando a scala reale, le operazioni di montaggio del sistema possono fornire ottimi riscontri sulle tempistiche di lavorazione, sulle tolleranze da rispettare e, non ultimo, possono dare una indicazione sul comportamento qualitativo della struttura in una condizione in cui i pesi e le sollecitazioni diventano significativi.

Per questioni di praticità si è scelto di realizzare solamente metà parete di un modulo, quindi la parte compresa tra il pilastro centrale e quello laterale, su una luce tra gli assi dei pilastri di 200 cm (Figura 4-64).

Per quanto riguarda la struttura portante si sono utilizzati dei morali 10x10 cm per realizzare i pilastri. Le travi principali hanno sezione 10x15 cm. I blocchi, non potendo essere formati in geopolimero come previsto, essendo questo materiale ancora in fase di sviluppo e di non facile industrializzazione, si è scelto virare sul calcestruzzo alveolare autoclavato. Si tratta di un calcestruzzo cellulare, che oltre a possedere ottime proprietà di isolamento sia termiche che acustiche, risulta disponibile in blocchi facilmente lavorabili con le attrezzature disponibili. Per realizzare i blocchi in scala nelle varie tipologie a noi utili, è bastato impostare le varie misure da taglio su di una sega da banco e proseguire velocemente alla formatura degli elementi. Per gli elementi a forma di C e per le rifiniture si sono inoltre adoperate anche un seghetto alternativo e una sega a mano. Di seguito vengono proposte le foto (Figura 4-65) dei principali blocchi che sono stati realizzati secondo le dimensioni modulari di progetto.



Figura 4-65 blocchi tagliati a misura

Le piastre metalliche di post compressione sono state realizzate partendo dai disegni di progetto preliminare. Una volta definito il modello base si è passati all'ingegnerizzazione del processo di costruzione, scomponendo le varie parti costituenti la singola piastra in diverse sotto parti. Sono state aggiunte anche delle alette e dei tagli per gli incastri al fine di agevolare le operazioni di posizionamento e saldatura. I vari pezzi sono stati realizzati con taglio laser di piastre da 3 mm di spessore in acciaio. Di seguito vengono proposti gli schemi esecutivi e alcune immagini del prodotto finito (Figura 4-66, Figura 4-67).

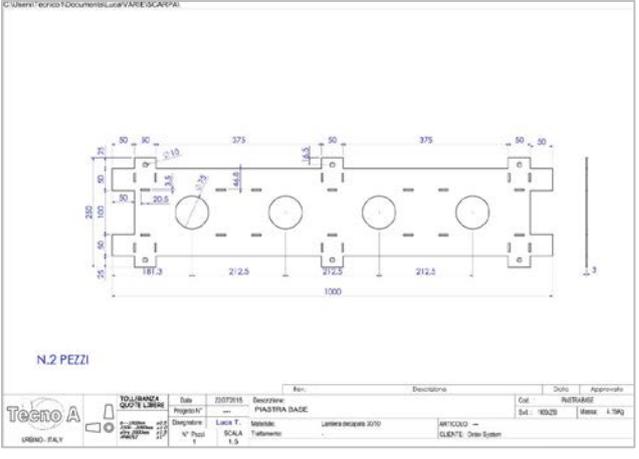
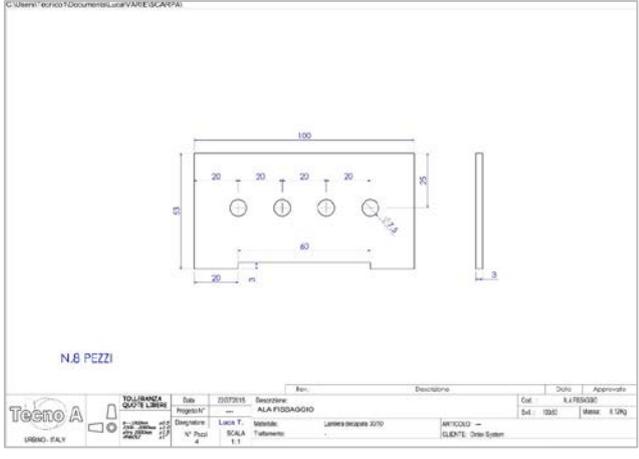
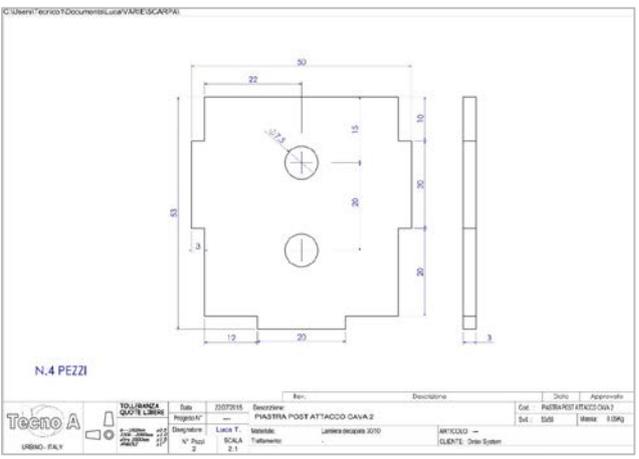
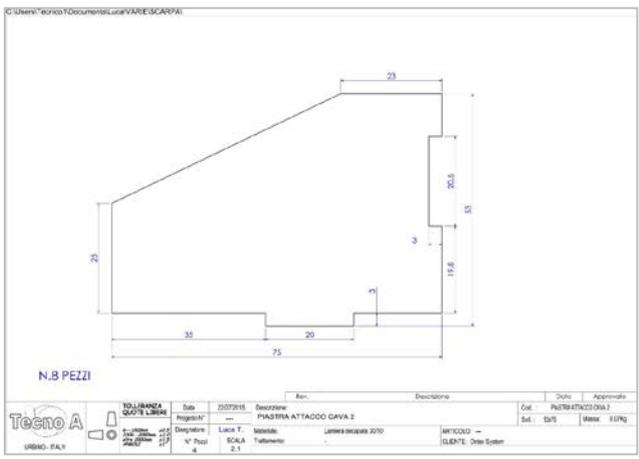


Figura 4-66 Disegni esecutivi per il taglio laser delle piastre metalliche

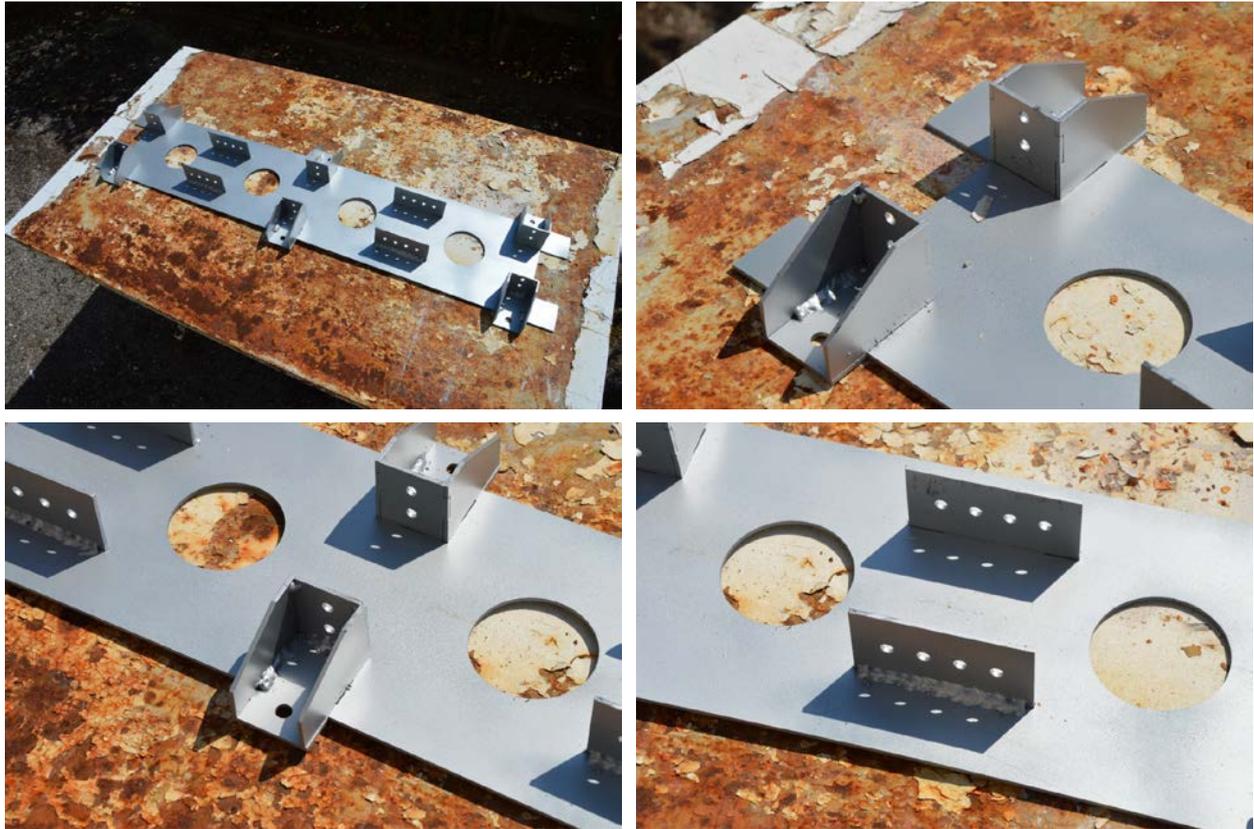


Figura 4-67 Particolari della piastra metallica di ripartizione saldata. Particolari delle scarpe centrali e laterali e connessioni alla trave lignea.

Per la realizzazione della reticolare lignea di ripartizione sono stati utilizzati dei morali da 5x4 cm. I vari travetti e diatoni sono tagliati a misura mediante un semplice seghetto alternativo. L'assemblaggio è stato eseguito mediante un avvitatore e semplici viti da legno. Di seguito alcune immagini del componente finito (Figura 4-68).



Figura 4-68 Reticolare lignea di ripartizione. Particolare della maglia con correnti e diatoni

Una volta assemblate e pronte le varie componenti si è proceduto col montaggio vero e proprio della parete. La prima operazione è stata quella di installare i montanti e la trave di base su di un

piano, realizzato mediante un bancale da 120x80 a cui è stato connesso un foglio di OSB per rendere la superficie piana e uniforme. Per il fissaggio si sono utilizzate viti da legno da 80 mm e angolari in acciaio di vario tipo. Gli step che sono stati seguiti sono quelli descritti nel capitolo 2.3, al fine di verificare se effettivamente fossero stati concepiti in successione logica corretta ai fini di un montaggio sequenziale. In particolare si può notare la realizzazione del sistema di post compressione. Questo è realizzato mediante barre filettate con diametro 6 mm e lunghezza 1000 mm, giuntate con un tenditore centrale. Le barre sono ancorate alle scarpe metalliche di base e sommitale mediante bulloni, una volta fissate sono state poste in tensione mediante una semplice chiave inglese.

Nelle successive immagini, da 1 a 12, vengono presentate le fasi di preparazione e l'avanzamento del montaggio.

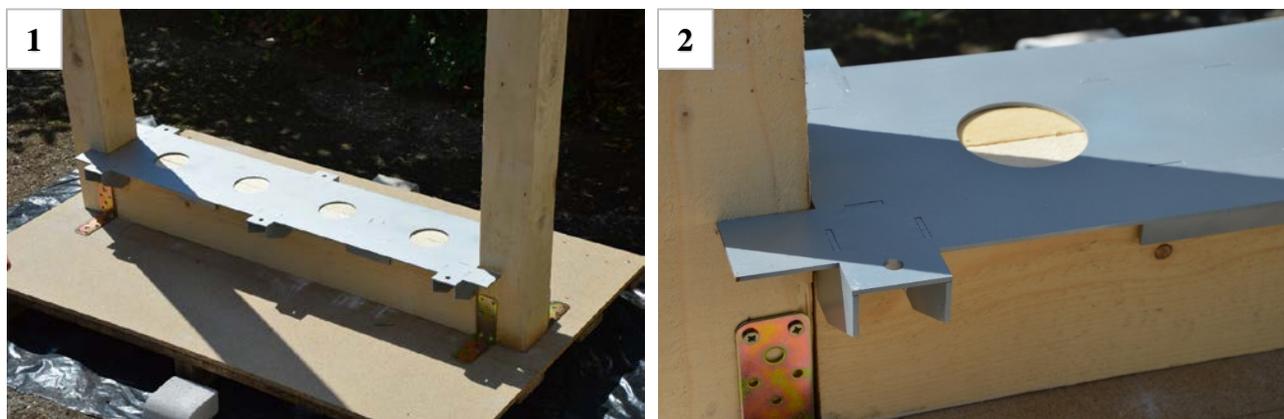


Figura 4-69 - 1) trave di base e piastra metallica - 2) particolare della piastra di ripartizione all'attacco del pilastro



Figura 4-70 - 3) posa del primo corso di blocchi- 4) particolare del primo corso e attacco al pilastro

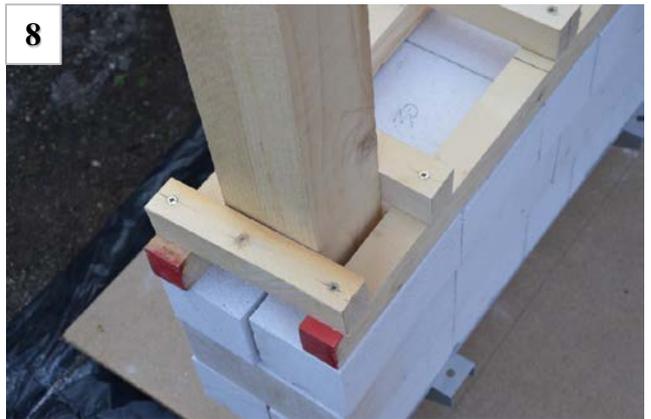


Figura 4-71 - 5) posa del secondo corso di blocchi - 6) particolare del secondo corso e chiusura del pilastro

Figura 4-72 - 7) completamento prima sezione e posa della reticolare - 2) particolare della reticolare all'attacco del pilastro

Figura 4-73 - 9) ripartenza dei corsi sopra la reticolare lignea - 10) completamento della parete e trave sommitale

Figura 4-74 - 11) piastra di base e sistema di post compressione - 12) particolare della scarpa e sistema di post compressione

La realizzazione del prototipo ha consentito di evidenziare come il sistema sviluppato abbia diversi aspetti positivi. Primo tra tutti può essere considerato la facilità con cui questo può essere assemblato. Infatti, una volta disponibili i pezzi base, la realizzazione del tamponamento risulta semplice e lineare. Il prototipo è stato, per varie esigenze, montato e smontato più volte, e il tempo speso da due operatori non ha superato l'ora di lavoro (Figura 4-75).



Figura 4-75 Parete completata e numerazione dei vari corsi per consentire un più rapido smontaggio e ri-assemblaggio

Altra nota positiva è stata il sistema di post compressione. Sono state fatte delle prove empiriche, sia prima che dopo la messa in tensione delle barre, per testare l'efficacia sull'ingranamento dei conci. Inizialmente, essendo posati a secco, la tendenza dei blocchi a scorrere reciprocamente era abbastanza spiccata, anche se il peso proprio, una volta ultimata la parete, contribuisce a una maggiore stabilità. Non appena messe in tensione le barre si è potuta constatare

una maggiore compattezza del tamponamento. Non potendo testare il prototipo su una pedana vibrante, ci si è dovuti accontentare di assestare diversi colpi con una mazza da falegname con testa gommata. Gli spostamenti e sfilamenti dei blocchi, presenti in fase di assemblaggio, si sono effettivamente annullati una volta applicata la post compressione al tamponamento.

Si sono però manifestate anche alcune caratteristiche negative. Innanzitutto la poca precisione con cui sono stati formati i blocchi e la non regolarità delle parti lignee impiegate. Il sistema, pur presentando delle tolleranze dimensionali abbastanza generose, non può prescindere dall'estrema precisione dei suoi componenti. Soprattutto i blocchi, in una ipotetica commercializzazione del sistema, dovranno essere rettificati in modo da offrire la maggior regolarità e precisione di posa possibile. Il legno massiccio, essendo fortemente influenzato dalla stagionatura, dalle condizioni climatiche esterne ma anche dalla dimensione stessa delle sezioni impiegate, difficilmente potrà garantire tolleranze accettabili per una industrializzazione delle componenti necessarie. Si ritiene quindi opportuno, pur se meno in linea con i criteri di sostenibilità, utilizzare il legno lamellare per la realizzazione di pilastri e travi principali.

La difficoltà di interazione tra legno e blocchi determinata da queste fisiologiche irregolarità suggerisce di prevedere, nell'interfaccia di contatto tra i materiali, uno strato allettamento a secco realizzato con un materiale sufficientemente elastico e deformabile come un tessuto in neoprene o un nastro butilico. Questo accorgimento, soprattutto nelle zone di contatto tra reticolare di legno e filari di blocchi, consentirà contemporaneamente di ridurre e uniformare le possibili irregolarità in fase di montaggio e di assecondare l'assestarsi nel tempo della parete oltre che a garantire un maggiore coefficiente di attrito tra i diversi materiali, migliorando il comportamento monolitico del tamponamento.

---

### 4.5.3 MODELLO FINALE IN SCALA 1:5

---

Come detto nel paragrafo precedente la costruzione di un prototipo a scala quasi reale ha consentito di prendere coscienza dei punti di forza e delle criticità insite nel sistema messo a punto. Come già ampiamente descritto nel capitolo 3 le riflessioni maturate a seguito di questa esperienza hanno portato ad un cambio sostanziale di paradigma nella concezione dell'intero sistema.

Una volta definite le nuove caratteristiche degli elementi costitutivi del sistema strutturale INTEGRO BS 400, si è voluta ripetere una esperienza di costruzione per testare anche questa soluzione alla luce di un confronto tra teoria e pratica. Nelle immagini che seguono sono evidenziati

i momenti fondamentali di questa esperienza e le modalità con cui si sono realizzate le diverse componenti del sistema in scala 1:5.



Figura 4-76 - 1) Montaggio telaio ligneo per soluzione d'angolo- 2) Posizionamento degli irrigidimenti verticali



Figura 4-77 - 3) Collegamento degli irrigidimenti con vite autofilettante - 4) Intelaiatura lignea completa di irrigidimenti



Figura 4-78 - 5) Installazione della piastra realizzata mediante stampa 3D - 6) particolare della piastra di ripartizione all'intradosso della trave



Figura 4-79 - 7) Installazione dei profili ad L nella trave inferiore - 8) Particolare di un profilo ad L e posizione rispetto agli irrigidimenti

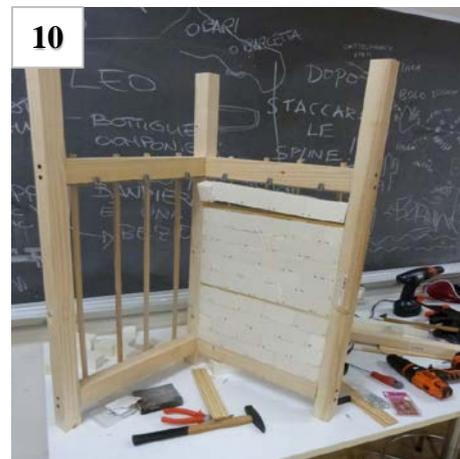
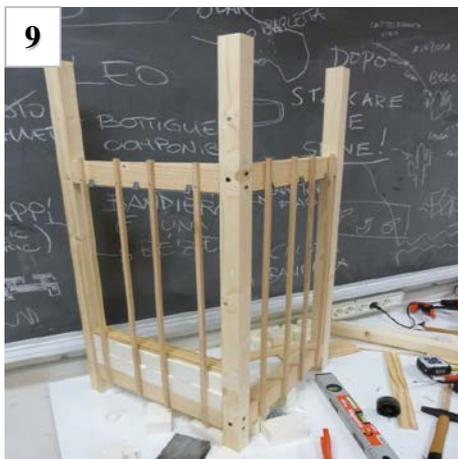


Figura 4-80 - 9) Posizionamento dei primi corsi di blocchi realizzati in polistirene - 10) Completamento del tamponamento



Figura 4-81 - 11) Particolare del collegamento del ripartitore ligneo al pilastro - 12) Installazione del solaio e cerchiatura metallica simulata attraverso la stampa 3D

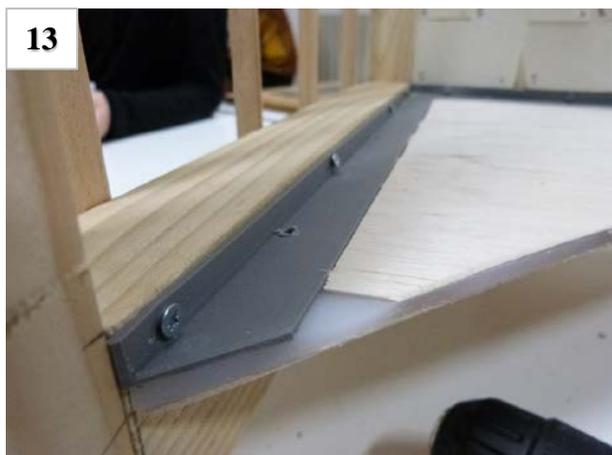


Figura 4-82 - 13) Particolare del collegamento del solaio e stratigrafia - 14) Vista interna della soluzione d'angolo prima della post compressione

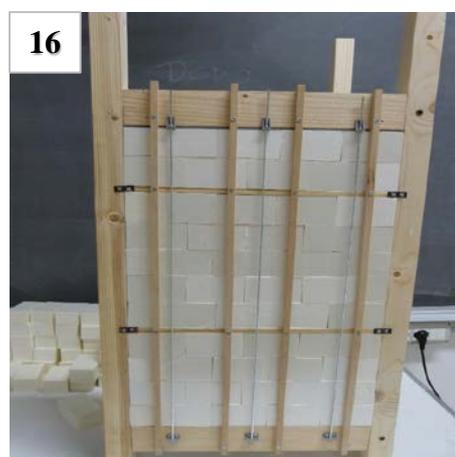


Figura 4-83 - 15) Installazione delle barre nei profili della trave inferiore - 16) Esterno della parete completa con barre e irrigidimenti



Figura 4-84 - 17) Interno della parete completa con barre e irrigidimenti - 18) Tavolato di ripartizione con funzione di presidio anticaduta



Figura 4-85 - 19) Soluzione d'angolo completa, vista dell'esterno



Figura 4-86 - 20) Soluzione d'angolo completa, vista dell'interno

<sup>1</sup> Paolo Morandi, Riccardo Milanese, e Guido Magenes, «Sistema innovativo antisismico per tamponature in laterizio a giunti scorrevoli», *Costruire in laterizio*, dicembre 2015.

<sup>2</sup> Barucci, *La casa antisismica*.

<sup>3</sup> Bianco, *La «Casa baraccata»*.

<sup>4</sup> <http://www.2si.it/> - Il software ProSap è in grado di verificare cemento armato, acciaio, muratura ordinaria e armata, legno, XLAM, travi reticolari miste, pareti estese debolmente armate, rinforzi in FRP per muratura e c.a. secondo la normativa NTC 2008, DM 14 gennaio 2008, le precedenti normative italiane, gli Eurocodici.

<sup>5</sup> R. Senthivel e P. B. Lourenco, «Finite Element Modelling of Deformation Characteristics of Historical Stone Masonry Shear Walls», *Engineering Structures* 31, n. 9 (settembre 2009): 1930–43, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.046>.

<sup>6</sup> Flavio Mosele e Lorenzo Bari, «Comportamento e verifica dei tamponamenti soggetti ad azioni sismiche», *Murature oggi* 109, n. 2 (2011).

<sup>7</sup> <http://www.allface.com/en/>

<sup>8</sup> <http://www.bitumfiber.com/prodotti-e-sistemi/>

<sup>9</sup> <http://www.rockwool.it/prodotti/acoustic-225-plus/>

<sup>10</sup> <http://www.rockpanel.it/prodotti/>

<sup>11</sup> [https://www.fermacell.it/lastre\\_gessofibra\\_1331.php](https://www.fermacell.it/lastre_gessofibra_1331.php)

<sup>12</sup> C. Di Perna et al., «Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads», *Energy and Buildings* 43, n. 1 (1 gennaio 2011): 200–206, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>.

<sup>13</sup> C. Di Perna et al., «Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica», *L'industria dei Laterizi*, n. 110 (2008).

<sup>14</sup> Distribuito da ACCA Software Termus G è un software per il calcolo della trasmittanza e dei diagrammi di Glaser (<http://www.acca.it/calcolo-trasmittanza-diagramma-glaser-condensa>)

<sup>15</sup> Achim Menges, «Simple Systems-Complex Capacities. Integrative Processes of Computational Morphogenesis in Architecture», *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment* 1, n. 2 (2011): 68–77.

<sup>16</sup> Bruce Mau, *An incomplete manifesto for growth* (Combination Press, 2001).

<sup>17</sup> Rhinoceros è un software applicativo commerciale per la modellazione 3D di superfici free form realizzato da Robert McNeel & Associates, un'azienda di Seattle nello stato di Washington, negli USA.

<sup>18</sup> Un VPL consente di programmare con “*espressioni visuali*” ma anche, all’evenienza, di inserire spezzoni di codice. La maggioranza dei VPL è basata sull’idea “*boxes and arrows*” ovvero i “*box*”, le scatole nere, che sono concepiti come funzioni connesse tra di loro da “*arrows*”, le frecce.

<sup>19</sup> Nel secolo scorso, il concetto di algoritmo venne formalizzato per risolvere il problema matematico della “*decisione*”, posto da David Hilbert nel 1928, e altre successive formalizzazioni giunsero con lo sviluppo dei concetti di “*calcolabilità effettiva*” e di “*metodo effettivo*”. Una delle formalizzazioni matematiche più famose è la Macchina di Alan Turing del 1936–37 e 1939. Una definizione del concetto di algoritmo che sia formale e non tecnica manca tuttora e si è pertanto costretti ad accontentarsi dell’idea intuitiva di algoritmo come “*una sequenza ordinata e finita di passi (operazioni o istruzioni) elementari che conduce a un ben determinato risultato in un tempo finito*”.

<sup>20</sup> Solomon W. Golomb (Baltimora, 30 maggio 1932) è un matematico statunitense, noto per essere l’inventore dei polimini. Nel 2012 ha ricevuto la National Medal of Science.

<sup>21</sup> Henry Ernest Dudeney (Mayfield, 10 aprile 1857 – Lewes, 23 aprile 1930) è stato un matematico britannico che ha contribuito con i suoi giochi di logica alla diffusione della matematica ricreativa.

<sup>22</sup> Martin Gardner (Tulsa, 21 ottobre 1914 – Norman, 22 maggio 2010) è stato un matematico, illusionista e divulgatore scientifico statunitense, con interessi variegati che spaziavano dalla filosofia allo scetticismo scientifico. Fu per molti anni il curatore della rubrica “*Mathematical Games*” sulla rivista “*Scientific American*” (la cui versione italiana era “*Giochi Matematici*”, pubblicata su “*Le Scienze*”).

<sup>23</sup> H. E. Dudeney, *The Canterbury Puzzles* (Courier Corporation, 2002).

<sup>24</sup> Tetris (in russo Tempyc, sincrasi di тетрамино, "tetramino" e теннис, "tennis") è un videogioco di logica e ragionamento inventato da Aleksej Leonidovič Pažitnov il 6 giugno 1984 mentre lavorava per l'Accademia delle Scienze dell'URSS di Mosca.

<sup>25</sup> I dati relativi alle soluzioni trovate attraverso l’algoritmo di aggregazione dei polimini sono riportati nelle schede in appendice nel paragrafo A.1 SCHEDE PER L’AGGREGAZIONE DEI MODULI a pagina 521

<sup>26</sup> Teresa Paduano, «La costruzione razionale della casa alla luce delle categorie del mobile e del transitorio» (Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006).

<sup>27</sup> Alexander Klein (1879, Odessa - 1961 New York) fu un architetto tedesco e italiano.

<sup>28</sup> Paduano, «La costruzione razionale della casa alla luce delle categorie del mobile e del transitorio».

<sup>29</sup> Galàpagos è un componente di Grasshopper utilizzato per l’“*evolutionary problem solving*”, creato da David Rutten.

<sup>30</sup> Un singolo componente funziona come un algoritmo nell'algoritmo; pertanto necessita di input e fornisce degli output.

<sup>31</sup> I dati relativi alle soluzioni trovate attraverso l'algoritmo per l'adattabilità funzionale sono riportati nelle schede in appendice nel paragrafo A.2 SCHEDE PER L'ADATTABILITÀ FUNZIONALE a pagina 540

<sup>32</sup> M. Hensel e A. Menges, 2008

<sup>33</sup> <http://www.rothoblaas.it/prodotti/fissaggio/viti-per-legno/viti-strutture/vgz>

<sup>34</sup> Il diagramma di Gantt è uno strumento di supporto alla gestione dei progetti, così chiamato in ricordo dell'ingegnere statunitense Henry Laurence Gantt (1861-1919), che si occupava di scienze sociali e che lo ideò nel 1917.

### III - SOLAIO “INTEGRO FS PRFV”



## 1 SOLAI IN LEGNO

L'interesse per lo sviluppo di un impalcato sandwich composto da un'anima strutturale in grigliato stampato in PRFV nasce dalla volontà di individuare un'efficace tecnica di intervento per il miglioramento prestazionale dei solai ad ordito e impalcato. Già prima dell'inizio di questa ricerca erano state avviate alcune sperimentazioni volte a definire una strategia di intervento completamente a secco. I buoni riscontri in termini prestazionali, sia meccanici che termofisici, uniti alle esperienze di prototipazione, che hanno confermato la fattibilità tecnica del sistema ed evidenziato alcune criticità, sono serviti da punto di partenza per approfondire questo tema in relazione all'utilizzo nell'esistente.

Il parallelo sviluppo del modulo costruttivo (presentato nei capitoli precedenti), all'interno del quale si è pensato di utilizzare questo impalcato, ha maggiormente focalizzato l'attenzione verso l'utilizzo di questa tecnica nelle nuove costruzioni.

L'importanza che assume quindi la conoscenza delle prestazioni di questo elemento, soprattutto del suo core strutturale in PRFV, ha motivato le numerose campagne sperimentali intraprese con l'obiettivo di individuare la migliore configurazione del pannello sandwich.

### 1.1 MODELLI TIPOLOGICO-COSTRUTTIVI

Si definisce solaio qualsiasi chiusura orizzontale costituita da strutture di sostegno orizzontale caricate ortogonalmente al proprio piano per la copertura di ambienti con comportamento resistente prevalentemente monodirezionale. Assolve alla sicurezza statica e ripartisce i carichi sulle travi e /o sulle murature d'ambito.

In particolare i solai lignei sono costituiti da elementi portanti, travi e travetti, e da elementi portati, assito o tavole laterizie, sottofondo e pavimentazione. Costituisce una unità strutturale che, al pari di qualsiasi altro orizzontamento, deve garantire sostegno dei carichi verticali e assolvere una funzione di irrigidimento nel piano orizzontale. Deve inoltre realizzare il collegamento ed incatenamento dei muri d'ambito per migliorare la scolarità dell'edificio.

Il dimensionamento dei solai lignei viene realizzato in funzione delle luci da superare e dei carichi da sopportare. Grande importanza però assume, per una corretta progettazione, la limitazione flessionale dell'impalcato per garantire, anche in condizioni di esercizio, un grado di comfort

adeguato alle funzioni da svolgere all'interno degli edifici. In questo senso anche la scelta dei materiali, risulta fondamentale date le diverse caratteristiche delle essenze legnose disponibili.

I solai, oltre alle prestazioni statiche, devono inoltre garantire valori adeguati di coibenza acustica, soprattutto nel caso di solai di interpiano, coibenza termica, in particolare nei solai di copertura e controterra, e resistenza al fuoco in caso di incendio.

I solai in legno sono costituiti generalmente da una struttura di travi più o meno complessa (orditura) su cui poggia uno strato secondario che serve a riempire i vuoti fra le travi. L'interasse dello strato superiore della orditura è determinato dal tipo di strato utilizzato per riempire gli spazi e varia tra due volte la base della trave (un vuoto per un pieno) e circa 80÷100 cm. Lo strato secondario può essere costituito da tavole in legno (tavolato), elementi lignei provenienti dalla segazione dei tronchi (sciaveri o panconcelli), elementi in laterizio piani appoggiati alle estremità e soggetti a flessione (pianelle o tavelle), elementi in laterizio disposti a formare una voltina poggiata su due travi adiacenti o anche lastre di pietra appoggiate alle estremità.

Sopra lo strato secondario può trovarsi un eventuale strato di materiale con il compito di attutire i rumori di calpestio e incrementare la massa del solaio e ridurre quindi le vibrazioni. Utile anche per il passaggio degli impianti (battuto di detriti o massetto) al di sopra del quale viene posato lo strato di finitura (pavimentazione).

I solai in legno possono essere classificati secondo il tipo degli elementi utilizzati per coprire il vuoto tra le travi (finitura) o in base all'organizzazione delle travi. Sono riconducibili essenzialmente a cinque categorie principali:

- Solai a semplice orditura, nei quali una serie di travi è disposta secondo la minima dimensione dell'ambiente da coprire (abituamente utilizzati per luci fino a 3÷4 m);
- Solai a doppia orditura, nei quali una serie di travi principali è disposta ad interasse di 2÷4 m secondo la dimensione minore dell'ambiente e una serie di travi secondarie di minore dimensione è disposta perpendicolarmente alla prima.
- Solai a tripla orditura, utilizzati quasi esclusivamente per ambienti di grande luce o con carichi rilevanti nei quali l'orditura principale è in genere costituita da travi armate con saette o con contraffissi e tiranti, oppure da travi composte di grandi dimensioni.
- Solai a cassettoni, nei quali l'orditura secondaria è inserita nello spessore della primaria (e ne ha la stessa dimensione) e, attraverso connessioni meccaniche, realizza un graticcio piano bidirezionale.
- Solai cosiddetti “alla Serlio”, nei quali si adottano travi più corte della minima dimensione dell'ambiente da coprire.

I solai a semplice orditura sono in genere utilizzati per luci non superiori ai 3÷4 m. La realizzazione è molto semplice e non richiede elementi lignei di grosse dimensioni (si hanno solo travetti). Questi solai hanno però l'inconveniente di scaricare il peso solo su due dei quattro muri che definiscono l'ambiente anche se, ad esempio quando uno dei muri ha grandi aperture, questa caratteristica è appositamente ricercata. Gli elementi maggiormente utilizzati sono travetti, aventi sezione con larghezza di base compresa tra 1/2 e 3/4 dell'altezza e dimensioni comprese fra circa 9x12 cm e 12x18 cm, oppure panconi aventi sezione con base ristretta di larghezza, compresa fra 5 e 8 cm, ed altezza tre o quattro volte maggiore della base. Le travi sono preferibilmente e più razionalmente disposte per coltello, ma si trovano esempi medioevali e rinascimentali di travi disposte di piatto, generalmente molto fitte.<sup>1</sup>

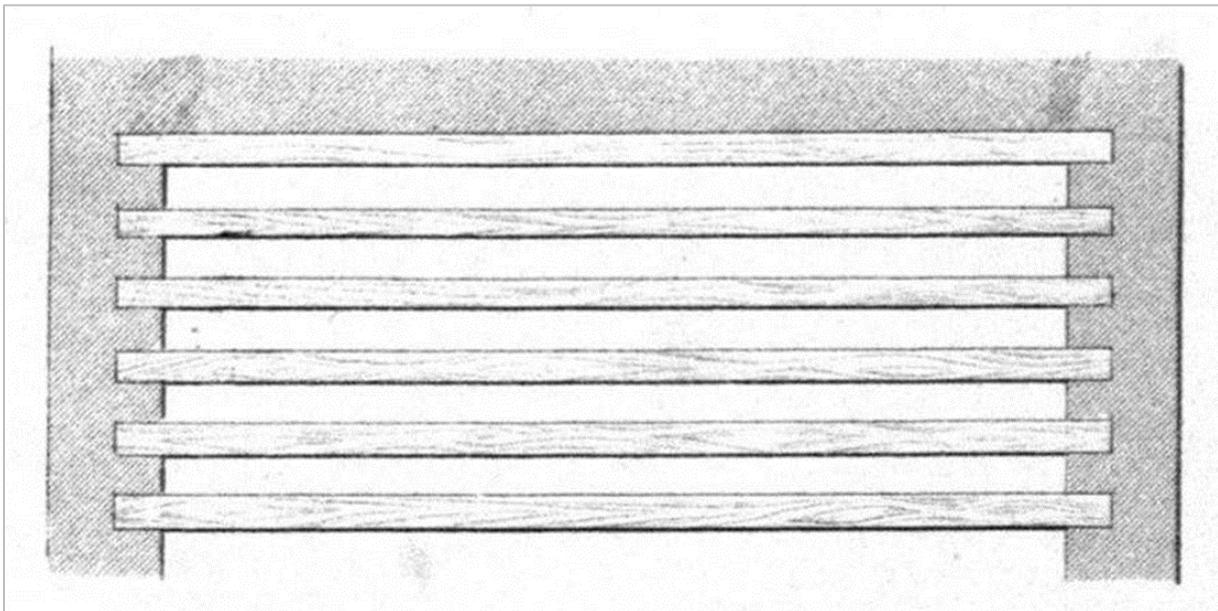


Figura 1-1 Travetti di un solaio a semplice orditura

I solai lignei a doppia orditura rappresentano la tipologia di impalcato più diffuso dell'edilizia premoderna italiana. Ogni area culturale e geografica presenta declinazioni diverse, ma generalmente si differenzia in due varianti tipologiche di base: con manto in laterizio o con manto in tavolato di legno. Ulteriori variazioni riguardano l'orditura di travi, le travi maestre che possono essere a vista o in parte foderate e il sistema di raccordo tra l'orditura primaria di travi e quella secondaria di travicelli. Infine sul territorio italiano si trovano una molteplicità di soluzioni di finitura dell'intradosso dei solai che permettono di ottenere risultati architettonici molto diversi anche per strutture costruite con la stessa tecnologia.

I solai a doppia orditura hanno travi principali di grandi dimensioni poste abitualmente ad interasse di 3÷4 m, più raramente di 5 m, e travetti o travi secondarie ad interassi comuni di 30÷60

cm in funzione dello strato di completamento. Il solaio in legno a doppia orditura con mezzane, ad esempio, è costituito da travi maestre, travi secondarie (travicelli) e manto di mezzane, cioè laterizi di spessore intermedio tra quello dei mattoni ordinari per le murature e le piastrelle utilizzate per le pavimentazioni (Figura 1-2).

Le travi maestre sono disposte ad interassi variabili tra 2 e 4 m; i travicelli hanno un interasse pari alla lunghezza della mezzana più il giunto di malta. Travi e travicelli sono appoggiati al muro perimetrale per una lunghezza di  $2/3$  dello spessore, lasciando spazio ad un adeguato ricircolo d'aria intorno all'appoggio. Le mezzane sono appoggiate a secco sui castagnoli e sigillate lungo le coste e le teste con malta di calce. La sovrastruttura è costituita da uno strato di detriti impastati e calcinacci battuti, strato di allettamento in malta di calce e sabbia, e pavimentazione in piastrelle.

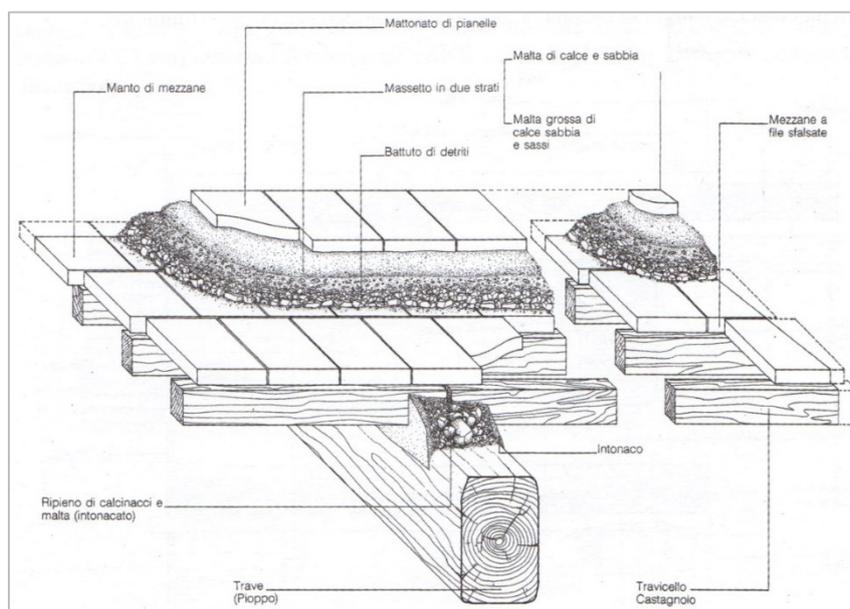


Figura 1-2 solaio in legno a doppia orditura con mezzane

La presenza di travi nelle due direzioni consente di ripartire i carichi su tutti i muri, anche se in corrispondenza degli appoggi delle travi principali si hanno concentrazioni elevate di sforzo. La sovrapposizione tra le travi principali e le secondarie porta ad avere solai di elevato spessore. Per ovviare a questo inconveniente talvolta si faceva ricorso a solai con orditura secondaria realizzata nello spessore della orditura primaria.



Figura 1-3 Solaio a doppia orditura

Un'altra variante è il solaio semplice di tavole con regoli, che trova larga applicazione nelle aree geografiche con grande disponibilità di legname. Il grande vantaggio di questa tipologia di solaio è la leggerezza a discapito però di un maggiore utilizzo di manodopera, aggravata anche dalla presenza di irregolarità planimetriche ricorrenti nell'edilizia storica.

L'immagine riportata in seguito (Figura 1-4) rappresenta un solaio semplice di tavolato e regoli, che costituisce la struttura di base per varianti decorative. Rispetto al solaio di mezzane, la tecnica costruttiva richiede una maggiore collaborazione fra muratore e falegname.

La struttura del soffitto con la presenza dei riquadri delimitati dai regoli, non permette la stessa flessibilità compositiva del solaio a mezzane. L'orditura principale è realizzata con travi di sezione variabile poste ad un interasse di circa 1,7m, i travicelli sono posti ad un interasse di circa 45 cm, a differenza del solaio a mezzane in cui la dimensione del laterizio scandisce l'interasse.

I regoli hanno una sezione a trapezio, svolgono una funzione di coprifilo ed evitano lo sfarinamento del massetto e la perdita di detriti.

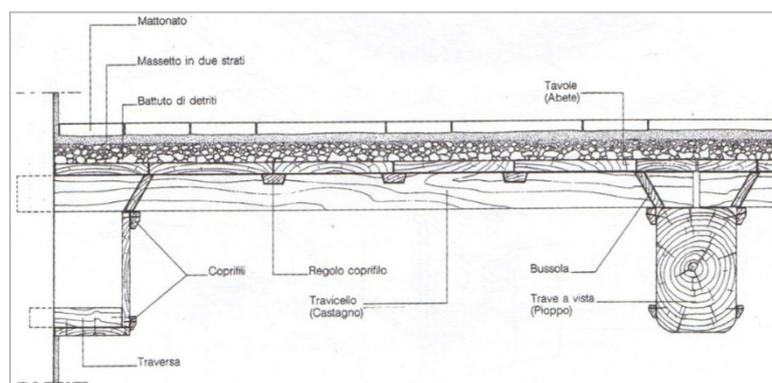


Figura 1-4 varianti decorative di solaio semplice di tavolato e regoli

L'uso di travi foderate è molto diffuso nei solai di questo tipo, con lo scopo di regolarizzare la struttura e mascherare le sezioni delle travi, ma impediscono anche di verificare lo stato di conservazione degli elementi e di accertarne la sicurezza. Questa tipologia di solai è molto diffusa e differisce solo per disponibilità geografica di diverse essenze di legname e per prevalenza di materiale ligneo rispetto al laterizio.



Figura 1-5 Solaio a doppia orditura con trave foderata

Un'ulteriore variante è rappresentata da orditure con travi maestre con incasso per alloggiamento dei regoli da eseguire previa regolarizzazione dell'appoggio con gesso (Figura 1-6). La sovrastruttura ha uno spessore minimo, ed anche in questo caso prevale l'uso del gesso, mentre all'intradosso, la struttura principale è mascherata da camorcanna.

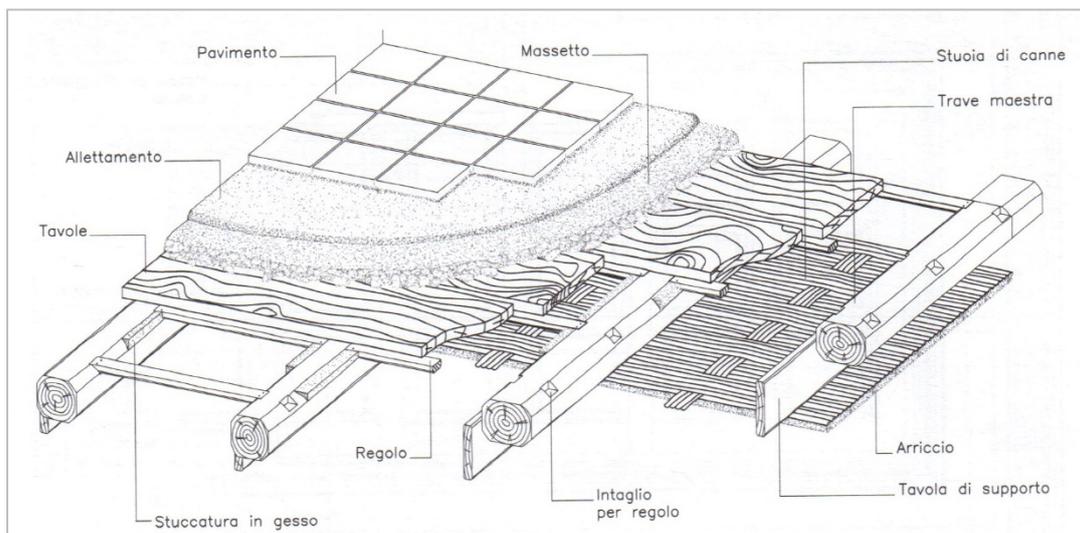


Figura 1-6 orditure con travi maestre con incasso per alloggiamento dei regoli

Il solaio a cassettoni con regoli e controregoli rappresenta un tipo diffuso nell'edilizia di pregio, dove trova collocazione in ambienti di forme abbastanza regolari che consentono la realizzazione dei caratteristici riquadri da cui l'elemento prende il nome. L'orditura secondaria è inserita nello spessore della primaria (della quale ha la stessa dimensione) e, attraverso connessioni meccaniche, realizza un graticcio piano bidirezionale. Il solaio a cassettoni è una soluzione adatta a locali con pianta quadrata o rettangolare non molto allungata poiché l'orditura disposta parallelamente al lato lungo lavora di meno. La bidirezionalità consente comunque di distribuire i carichi del solaio in maniera più uniforme su tutti i lati.

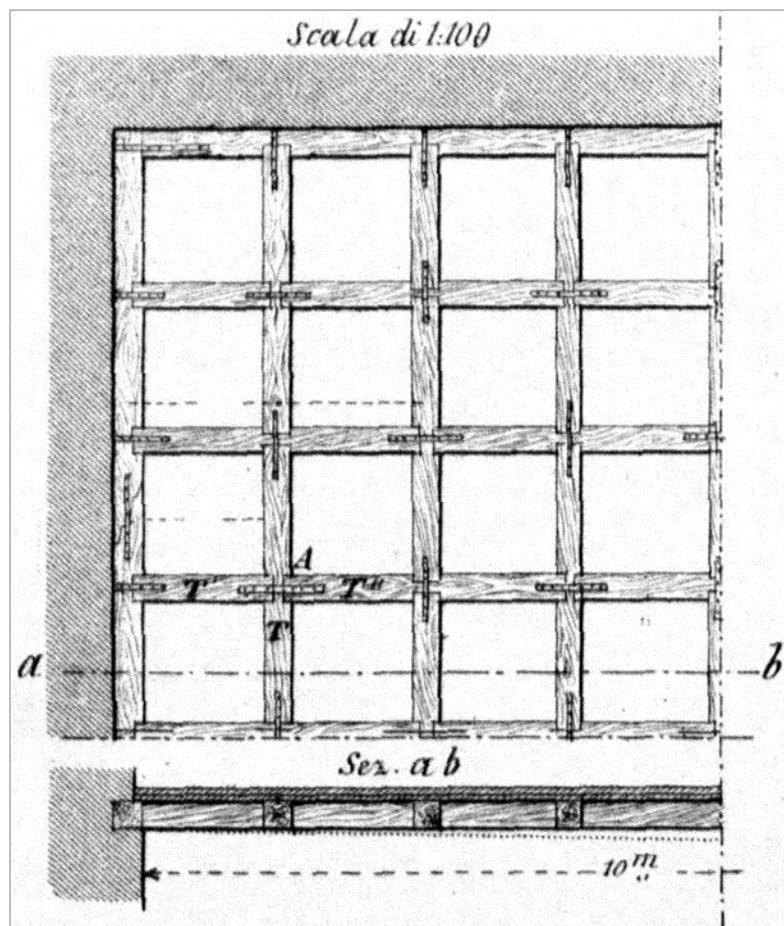


Figura 1-7 Orditura di un solaio a cassettoni

La geometria regolare dei cassettoni rappresenta l'estrema cura nella disposizione degli elementi portanti principali e secondari, per cui l'opera del falegname è predominante rispetto a quella del muratore. Questa configurazione, apparentemente più complessa della precedente, deriva invece da una semplificazione del sistema di appoggio dei regoli, che poggiano direttamente sulla struttura secondaria divenendo a loro volta elemento portante.

Il tavolato posto in opera sull’estradosso dei regoli, lascia uno spazio libero sopra i travicelli che richiede l’inserimento dei controregoli. Il passo tra i travicelli produce un regolare ripartizione degli spazi, che trova riscontro nell’interasse delle travi e nella dimensione dell’ambiente stesso.

Eventuali incongruenze fra dimensioni e ortogonalità dell’ambiente vengono assorbite dalle travi di bordo, il cui compito è quello di riquadrare il vano recuperando eventuali irregolarità delle murature perimetrali. Per lo stesso motivo sono inserite finte controtravi di bordo.



Figura 1-8 solaio a cassettoni

Nel solaio “alla Serlio<sup>2</sup>” le travi principali sono tutte costituite da due parti (lunghe 1/3 e 2/3 della luce totale) giuntate con elementi metallici. Questo tipo di solaio basa la sua solidità sulla efficacia delle unioni. Pur essendo stato immaginato già in epoca medioevale (ad esempio da Villard de Honnecourt<sup>3</sup>) ha avuto diffusione (peraltro molto ridotta) solo nel Settecento quando il costo dei metalli iniziò a calare mentre quello della mano d’opera non era ancora incrementato.

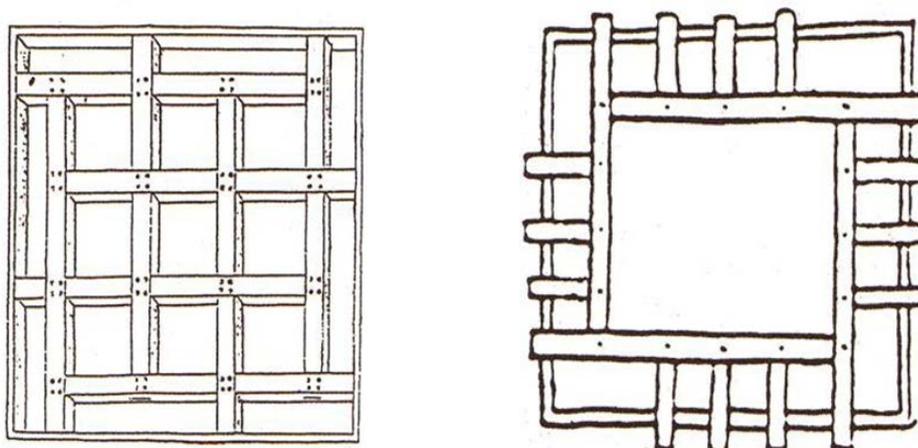


Figura 1-9 Solaio alla Serlio

L'appoggio delle travi maestre di un solaio sul muro è un punto critico, perché si hanno elevate concentrazioni di sforzo. Per effetto degli sforzi di taglio si generano delle fessure che partono dagli spigoli della trave e vanno verso il basso con inclinazione a 45°. Per distribuire meglio il carico si usano alcuni corsi di mattoni (per muri in pietrame) oppure una tavola di legno duro o una lastra di pietra con funzione di dormiente.

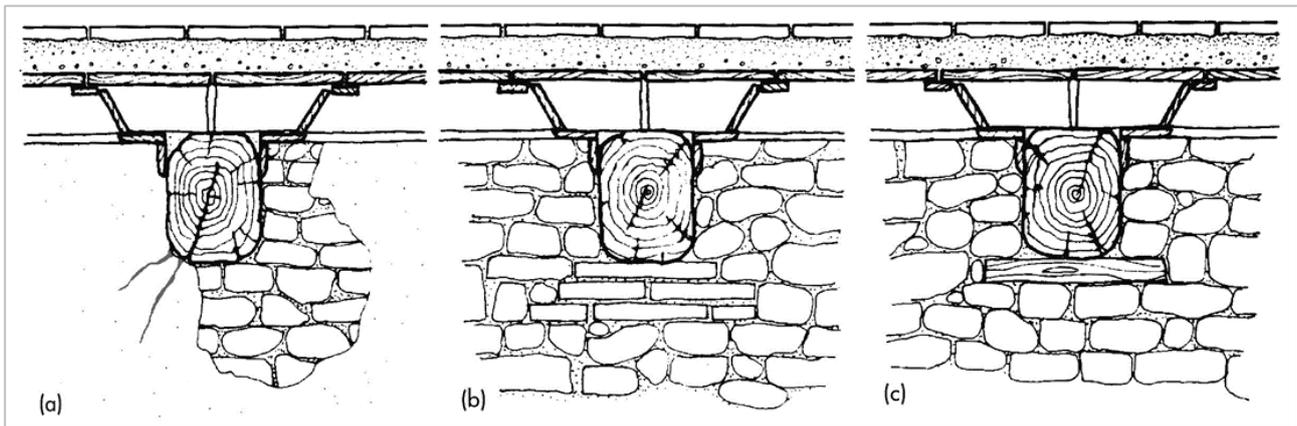


Figura 1-10 Soluzioni di appoggio per le travi lignee

È buona norma anche evitare di racchiudere il legno all'interno di materiali che possono impregnarsi di umidità (murature) o che favoriscano la condensa (elementi metallici) e che comunque impediscano o rallentino l'evaporazione dell'acqua che può bagnare il legno. Le teste delle travi erano solitamente impregnate di pece o altri materiali per migliorarne la conservazione nel tempo.

Per migliorare l'appoggio delle travi incrementando la profondità di penetrazione nel muro e riducendo la luce netta erano spesso usate delle mensole in legno. La trave poteva semplicemente poggiare o essere vincolata alla mensola con una chiavarda. Il ruolo delle travi all'interno della struttura dell'edificio storico, infatti, non era solo quello di sostenere i solai, ma anche quello di legare tra loro murature contrapposte, per ridurre il rischio di ribaltamenti di pareti dovuti a cedimenti del terreno o al sisma. L'attrito tra trave e piano d'appoggio consente di sviluppare solo una certa resistenza allo sfilamento, ma in presenza di scosse sismiche sussultorie non si può fare affidamento a questo contributo. Negli edifici storici sono quindi spesso presenti dei bulzoni o capichiaie a paletto in grado di ancorare la trave alla muratura.

## 1.2 METODI TRADIZIONALI DI CONSOLIDAMENTO

Il miglioramento statico del solaio in legno non riguarda solo l'orizzontamento in sé stesso, ma la funzione statica e di collegamento che esso svolge nei confronti dell'intero organismo edilizio.<sup>4</sup>

L'analisi del tipo edilizio è il primo passo da compiere per la scelta degli interventi di consolidamento e costituisce un mezzo utile per l'individuazione dei punti deboli della struttura muraria e conseguentemente per l'analisi dei meccanismi di collasso.

L'individuazione della gerarchia strutturale mette in luce i punti dove con più probabilità c'è carenza di connessioni e nei quali è necessario porre attenzione nella verifica e nel consolidamento. I modi di collasso della muratura di facciata tengono conto della successione delle cellule edilizie realizzate per adduzione. Non esistono connessioni fra i muri realizzati in tempi diversi; soltanto la rimozione dell'intonaco nei punti d'angolo mette in evidenza questa situazione, che può manifestarsi in modo evidente sotto l'effetto del sisma. Le azioni trasversali determinano un meccanismo di collasso definito "primo modo" di danno, cioè il ribaltamento della muratura verso l'esterno.

Questa premessa è necessaria per affrontare la questione del consolidamento dei solai lignei in relazione alla struttura muraria; l'orizzontamento ligneo viene chiamato a svolgere una funzione di sostegno per il muro sollecitato trasversalmente, funzione svolta con efficacia quando la spinta è rivolta verso l'interno della cellula muraria, inconsistente quando l'azione spingente agisce verso l'esterno.

L'accoppiamento di più elementi strutturali funzionanti a flessione e resi collaboranti mediante l'utilizzo di connessioni consente di realizzare strutture di tipo composto. Un ambito ormai consolidato di impiego di strutture composte è quello pertinente al consolidamento dei solai lignei, dove l'accoppiamento della struttura lignea esistente con una "soletta" rigida risulta piuttosto conveniente: si possono infatti realizzare sezioni più efficienti a partire da elementi di ridotte dimensioni.

L'intervento di consolidamento dei solai lignei esistenti rientra, a seconda dei casi, nelle operazioni di adeguamento, miglioramento o di riparazione locale atte a incrementare le caratteristiche tecniche degli elementi e di conseguenza degli edifici esistenti; questo avviene spesso per adeguare le strutture agli standard di utilizzo attuali oppure alle mutate esigenze funzionali.

Le tecniche di intervento prevedono di riutilizzare le travature lignee esistenti alle quali viene solidarizzata una soletta di limitato spessore realizzata con materiali diversi (calcestruzzo, pannelli o tavolati lignei, piastre o profili metallici, materiali compositi) e resa flessionalmente collaborante attraverso un sistema di connessione.<sup>5</sup>

La scelta del materiale per la soletta è strettamente legata alla tipologia di edificio considerata e all'eventuale necessità di reversibilità dell'intervento, oltre a considerazioni di altro tipo quali l'incremento di peso e di rigidità. Le tipologie di connessione sono molteplici: barre filettate in acciaio, connettori piolo/rampone, viti, pioli, spinotti, chiodi; il tutto in funzione dei materiali impiegati per il consolidamento.

I vantaggi di natura statica possono essere riassunti nei seguenti punti:

- Il solaio dimostra incrementi non trascurabili di resistenza e di rigidità nei riguardi della struttura originale.
- La soletta, indipendentemente dal materiale di cui si compone, contribuisce ad una più efficace ripartizione trasversale dei carichi verticali applicati.
- La soletta costituisce un efficace collegamento orizzontale tra i diversi elementi portanti verticali componenti l'edificio, ponendosi anche come efficace mezzo di trasmissione delle sollecitazioni orizzontali ai sistemi di controventamento.

La possibilità di applicare tale tecnica di intervento dipende dallo stato di conservazione delle travi esistenti e dalle molteplici condizioni al contorno che nel caso di edifici esistenti risultano essere molto vincolanti. Da non tralasciare infine è il comportamento della connessione, rigida o semi-rigida, utilizzata per collegare i differenti componenti della trave composta che va ad influire sulle modalità di calcolo e verifica della sezione.

L'aumento di rigidità del solaio negli edifici storici in muratura permette di raggiungere due ulteriori obiettivi: controllare il comportamento globale e locale della struttura e allo stesso tempo raggiungere un buon livello di gerarchia delle resistenze. Concludendo, una corretta strategia di intervento su un edificio esistente deve prefiggersi una serie di obiettivi da raggiungere per migliorare il comportamento globale dell'edificio tenendo in conto la gerarchia dei meccanismi di collasso per raggiungere i valori di resistenza e comportamento prefissati. A seconda di ciò e dei meccanismi di collasso che si intendono prevenire deve quindi essere studiata la migliore tipologia di intervento da adottare, in modo tale da non creare degli scompensi tra i meccanismi di collasso.

### 1.2.1 SOLAIO CONSOLIDATO CON SOLETTA IN C.A.

Questa metodologia di consolidamento risulta essere una delle prime adottate in ordine di tempo. Consiste nel realizzare al di sopra dell'assito esistente una soletta di calcestruzzo armato dello spessore non superiore a 5 cm per contenere i pesi entro i 130 kg/mq con maglie elettrosaldate  $\phi 5-8/20''$ . Per migliorare il sistema di connessione tra l'ordito e l'impalcato, al fine di garantire una migliore trasmissione delle sollecitazioni a taglio, vengono oggi impiegati vari tipi di connettori metallici, come le campane di acciaio capovolte applicate a vite al bordo superiore della trave o bulloni snodati collegati a vite. A completamento è necessario ancorare la soletta di nuova

realizzazione alle murature esistenti; questo avviene di norma disponendo barre in acciaio infisse nel muro con inclinazione negativa di 45° (Figura 1-11).



Figura 1-11 Solaio consolidato con soletta in c.a.

L’infissione avviene previa pre-foratura della muratura e successivo riempimento con malta bi-componente ad alta resistenza. La parte di barra non infissa nella muratura viene annegata nella soletta in c.l.s.

Soluzione analoga ma più costosa e di più complessa applicazione è quella di impiegare all’estradosso del tavolato originario due strati di pannello multistrato per usi strutturali, collegati all’ossatura portante originaria del solaio mediante un pannello ligneo disposto tra il bordo superiore delle travi principali e l’intradosso dei pannelli superiori; il collegamento dei nuovi pannelli tra di loro e con l’assito esistente viene garantito con connettori metallici lineari (viti autofilettanti in acciaio) disposti in corrispondenza dei travetti distanziatori in multistrato (Figura 1-12). L’uso dei pannelli multistrato ad uso strutturale per il consolidamento dei solai è conseguente alla sempre più estesa disponibilità di questi prodotti ed alla loro crescente affidabilità in rapporto all’elevato potere coibente, dalla elevata resistenza ai fattori ambientali, dalla gamma di possibilità di impiego in ragione della varietà dimensionale ed infine dalla elevata resistenza meccanica ottenuta dalla combinazione di varie essenze legnose (betulla, robinia, faggio, pioppo) secondo le specifiche necessità.



*Figura 1-12 Travette in c.c. sopra un tavolato ligneo*

In questo modo può essere garantita anche l’installazione della rete impiantistica (elettrica e termico-sanitaria) nello spazio interposto fra i due pannelli.

Conseguentemente, è opportuno posare la pavimentazione a colla per un efficace collegamento ai pannelli, senza apportare modifiche significative delle quote originarie di calpestio. L’eventuale applicazione di pannelli di sughero consente inoltre di ottenere un miglioramento del grado di coibenza acustica. Infine è indispensabile che vengano sempre assicurate le connessioni fra i vari elementi mediante l’impiego di squadrette metalliche o dispositivi analoghi.

Rispetto all’impiego di impalcato supplementare a tutto spessore in doppio strato sia di tavole che di pannelli lignei sovrapposti, la disposizione con doppio pannello in multistrato presenta vantaggi aggiuntivi, soprattutto in ambito sismico, costituiti da maggiore continuità di azione e di collegamento, maggiore rigidità, minore peso.

I pannelli dello strato inferiore, che ha la funzione prevalente di regolarizzare il piano dell’impalcato originario e di costruire una solida base per i distanziatori ed i pannelli dello strato superiore, hanno generalmente minore spessore rispetto a questi ultimi che, essendo più periferici, forniscono un contributo maggiore alla resistenza. Un intervento di questo tipo permette di raggiungere una rigidità a taglio stimabile intorno al 70% di quella di una soletta in calcestruzzo, quindi con notevole miglioramento rispetto all’esistente. Un solaio così consolidato risponde meglio ai carichi verticali agenti sia in termini di resistenza che di deformabilità; inoltre la rigidità di piano assume valori tendenti al caso di soletta in calcestruzzo, con il vantaggio di avere incrementi di carico largamente inferiori e di essere un intervento completamente reversibile.<sup>6</sup>

### 1.2.2 SOLAIO CONSOLIDATO CON PROFILI SOTTILI IN ACCIAIO

Questa tecnica consiste nel disporre al di sopra del tavolato ligneo esistente in corrispondenza delle travature, un profilo metallico sottile e piatto fissato alle travi mediante perni in acciaio; a completamento e per garantire un buon funzionamento a diaframma orizzontale si dispongono ulteriori profili diagonalmente ai primi e di sezione analoga, solidarizzati alle murature perimetrali mediante un profilo metallico a L; l'ancoraggio del profilo perimetrale viene realizzato con barre piegate in acciaio edile saldate al profilo e ancorate alla muratura, pre-forata, con malta cementizia a ritiro compensato.

Al termine dell'intervento gli elementi di rinforzo e le travature risultano essere separate dal tavolato esistente avente uno spessore variabile dai 20 ai 30 mm e che non viene considerato nel calcolo della resistenza della sezione composta ma solo in quello della rigidità flessionale. Inoltre il tavolato funge da piano di lavoro e di posa dei profili metallici evitando in particolare eventuali fenomeni di instabilità dovuti all'esiguo spessore degli stessi in rapporto alla loro lunghezza.



*Figura 1-13 Controventamento di piano con profili metallici*

Il sistema di aste così realizzato (Figura 1-13) funziona quindi come una trave reticolare in cui gli angolari perpendicolari all'azione orizzontale fungono da corrente teso e corrente compresso, le diagonali unitamente alle travi composte costituiscono invece le aste d'anima; gli angolari paralleli alla direzione dell'azione hanno il compito di trasmettere le forze orizzontali alle murature cui sono ancorati. Le barre di ancoraggio del profilo perimetrale hanno il compito da un lato di trasferire il taglio dal diaframma alle pareti di taglio (shear effect) e dall'altro di contrastare gli spostamenti fuori piano delle pareti disposte perpendicolarmente all'azione orizzontale (tie effect). In questo caso se si

guarda alla rigidezza di piano si è piuttosto lontani da un solaio infinitamente rigido ma nemmeno troppo vicini al caso di solaio infinitamente flessibile. Per avere un ordine di grandezza un solaio di tale tipo è circa venti/trenta volte più rigido di un solaio ligneo semplice non consolidato.

Tra i pregi di tale tecnica troviamo la facilità di posa in opera e la completa reversibilità dell'intervento.

### 1.2.3 SOLAIO CONSOLIDATO CON FRP (FIBER REINFORCED POLYMER)

I materiali compositi hanno trovato largo impiego nel campo dell'ingegneria civile sia per le nuove costruzioni sia per il recupero e il rinforzo di strutture esistenti con particolare riferimento agli edifici storici in muratura; è infatti ben noto come le strutture in muratura presentino numerosi limiti per quel che riguarda la resistenza dei materiali. Essi sono spesso utilizzati anche per il rinforzo/consolidamento dei tradizionali solai lignei presenti nella totalità degli edifici storici, in particolare per la capacità di questi materiali di conservare le proprietà fisiche e chimiche nel tempo e per la capacità di adesione alle strutture lignee mediante utilizzo di resine epossidiche.

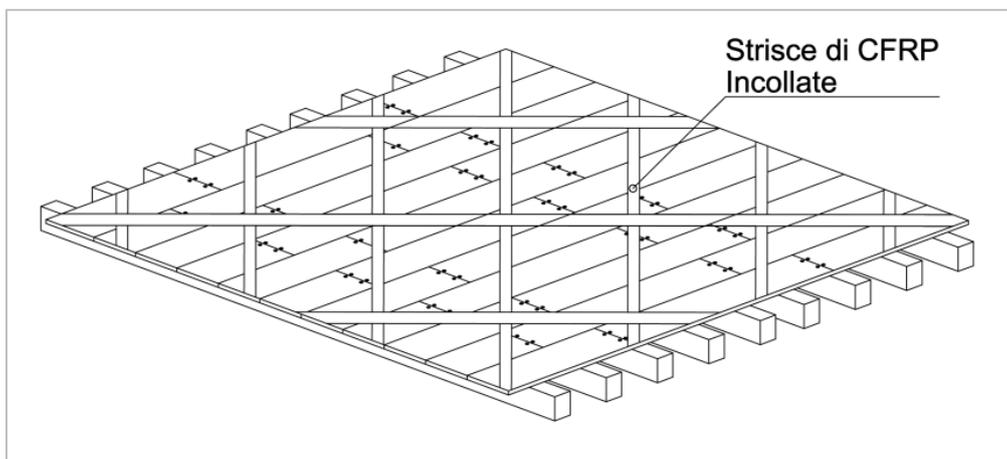


Figura 1-14 Fasce incrociate in FRP

Recentemente si è osservato come le fibre a matrice vetrosa, economiche e molto resistenti, subiscano decrementi delle caratteristiche meccaniche essendo suscettibili all'attacco di funghi. Tuttavia il decadimento di resistenza del materiale risulta generalmente modesto rispetto alle sollecitazioni agenti e l'utilizzo di appositi prodotti può garantire la durata del materiale nel lungo periodo.

L'intervento consiste nella posa al di sopra dell'assito esistente di un graticcio di strisce di materiale fibro-rinforzato a base vetrosa o di carbonio sopra il quale viene in seguito posto un tavolato

ligneo. (Figura 1-14) Anche in questo caso si sottolinea la praticità dell'intervento con qualche dubbio sulla reversibilità. Con questo tipo di intervento si raggiungono valori di rigidità circa trenta/quaranta volte superiori al caso di solaio ligneo semplice.

## 1.3 PANORAMICA DELLE SOLUZIONI COMMERCIALI

---

Gli orizzontamenti intermedi dell'edilizia storica presentano diverse tipologie, tra cui la più diffusa, per i solai dei piani superiori, coincide con una struttura lignea con impalcato in assito, in pianellato o con stuoiati (cannicciati). La tipologia costruttiva e lo schema statico di tale orizzontamento ligneo è generalmente costituita da travi in semplice appoggio sulle murature d'ambito e con luci mediamente inferiori ai 5 metri; sulle stesse poggia direttamente il tavolato o una struttura secondaria su cui è disposto il pianellato.

Nel corso di un intervento di recupero i fattori, che portano a un ripristino o sostituzione dei suddetti solai, coincidono con:

- Spessori strutturali non adeguati alle nuove normative e condizioni d'uso
- Degrado chimico-fisico degli elementi lignei

L'insufficienza statica delle travi lignee risulta essere un aspetto ricorrente, dettato prevalentemente da una scarsa disponibilità economica e di materiali locali, che rappresentano la ragione principale della precarietà costruttiva e strutturale di tali elementi. Nel caso in cui la situazione sopra descritta interessi elementi strutturali primari, privi di particolari qualità architettoniche, l'eventuale intervento di ripristino risulta inopportuno, sia per ragioni economiche sia operative. In tal caso si preferisce quindi la completa sostituzione del solaio con travi e impalcato di nuova fattura. In tal modo si può garantire una maggiore rigidità nel piano, una corretta connessione tra gli elementi strutturali, idonee sezioni resistenti e l'eliminazione delle più comuni cause di degrado.

Nel secolo scorso, negli edifici storici non a carattere monumentale e privi di vincoli di salvaguardia, la sostituzione di solai lignei con solai latero cementizi era pratica frequente, nonché obbligatoria quando si operava in zone sismiche fino alla promulgazione dell'Ordinanza n.3274/2003. Tale intervento prevedeva la presenza di una caldana armata di opportuno spessore nonché l'introduzione di cordoli in cemento armato; il tutto predisposto al fine di ottenere una migliore risposta dell'edificio alle azioni orizzontali. Sia dal punto di vista della distribuzione dei carichi sui setti murari, a partire dall'ipotesi

di infinita rigidezza del solaio nel proprio piano, sia da quello della realizzazione di un efficace vincolo bilatero per le pareti.

L'adozione di questo sistema ha però generato molti problemi soprattutto in seguito a eventi sismici. A dimostrazione di ciò vi è quanto accaduto con il terremoto a L'Aquila nel 2009. In tale occasione, i solai e le coperture, realizzati in cemento armato appoggiati a murature antiche realizzate in mattoni, pietrame o a tecnica mista, hanno amplificato gli effetti del sisma. A causa della troppa elevata rigidezza e peso hanno determinato delle spinte maggiori sulle pareti d'ambito tanto da causarne lo sgretolamento e il ribaltamento.

A tale proposito, oggi, il mercato propone una serie di sistemi innovativi, che garantiscono la rigidezza nel piano del solaio e quindi una corretta trasmissione delle azioni orizzontali con pesi nettamente inferiori. Molte soluzioni presentano inoltre l'applicazione di solai misti legno-calcestruzzo.

Il mercato edilizio, nel quale la tipologia di solaio proposto, andrebbe a collocarsi, comprende una serie di soluzioni volte sia alla sostituzione di solai nel costruito storico sia alle nuove realizzazioni.

### 1.3.1 SOLAIO COMPOUND DELLA COPERLEGNO

Il sistema, brevettato dalla Coperlegno, si basa sulla sinergia tra il legno lamellare ed il calcestruzzo, che per le loro peculiari caratteristiche (resistenza a trazione/compressione) portano il sistema ai massimi risultati possibili in termini di efficienza globale. Pur mantenendo invariata l'impostazione generale del modello classico, basata sul travetto con elemento interposto e getto superiore di completamento, garantisce pesi propri strutturali dimezzati.

Il solaio è formato dai seguenti componenti:

- Travetti in legno lamellare di abete rosso armati con traliccio in acciaio
- elettrosaldato di tipo “Bausta”, questo è preinserito a pressione quindi meccanicamente e non tramite resine.
- Pannelli autoportanti, aventi funzione di cassero isolante alleggerito, formati da sandwich in estrusione di polistirene con le due facce prefinite in malta cementizia armata mediante rete in fibra di vetro.

- Armatura integrativa costituita di norma dai “monconi” (tondini in acciaio per il collegamento delle testate dei travetti tralicciati con i cordoli e/o con la travatura principale) e dalla rete elettrosaldata.
- Soletta collaborante, il cui spessore indicato nel dimensionamento è normalmente di 50 mm, che completa ed omogeneizza il solaio creando una sorta di piastra monolitica.



*Figura 1-15 Solaio Compound della Coperlegno*

La presenza dei pannelli in polistirene espanso permette di avere un sistema di isolamento compreso nel pacchetto strutturale senza che vi sia necessità di aggiungerlo successivamente comportando così un aumento dello spessore.

Come affermato, il sistema presenta, rispetto alle tradizionali tecniche, spessore contenuto attorno ai 200 mm, e peso ridotto di circa 150 kg. Viene inoltre garantita un'elevata rigidità, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 450 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali.

Per quanto riguarda la resistenza al fuoco, il sistema di tralicci integrati ai travetti in legno garantisce la protezione dei primi da parte dei secondi in virtù della maggiore resistenza al fuoco del materiale ligneo rispetto all'acciaio; di scarsa resistenza al fuoco godono invece i pannelli di materiale interposto.

Per quel che concerne le applicazioni, questo tipo di solaio si presenta estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio. Di grande importanza è la facilità di posa in opera garantita proprio dalla leggerezza dei pannelli in EPS i quali risultano essere maneggevoli.

Tale soluzione risulta essere economica e sostenibile, grazie alla sua velocità di posa e alla presenza di materiali certificati e con produzione a bassa emissione di energia.<sup>7</sup>

### 1.3.2 SOLAIO LATERCOMPOUND DELLA COPERLEGNO

Anche questo sistema, brevettato dalla Coperlegno, si basa sulla sinergia tra il legno lamellare ed il calcestruzzo, che per le loro peculiari caratteristiche (resistenza a trazione/compressione) portano il sistema ai massimi risultati possibili in termini di efficienza globale. Pur mantenendo invariata l'impostazione generale del modello classico, basata sul travetto con elemento interposto e getto superiore di completamento, garantisce pesi propri strutturali dimezzati.<sup>8</sup>

I componenti di tale solaio corrispondono a:

- Travetto rettangolare in legno lamellare dotato di una particolare fresatura ad incastro nella quale viene realizzato un getto in malta cementizia anti ritiro ad alta resistenza e, successivamente, inserito un traliccio metallico in acciaio di tipo Bausta; si differenzia dal sistema precedente proprio per la presenza di malta tissotropica nella fresatura e non unione dei due elementi mediante il semplice incastro.
- Elementi in laterizio, quali blocchi o tavelle.
- Soletta in calcestruzzo di circa 50 mm armata con rete elettrosaldata.

In questo caso l'isolamento non è garantito dal materiale interposto ma normalmente viene ottenuto attraverso l'aggiunta di un pannello di sughero di spessore molto ridotto.

Lo spessore totale del solaio dipende dalle dimensioni del travetto e dalla scelta della tipologia di laterizio interposto, e può variare tra i 200 mm e i 350 mm. I laterizi risolvono il problema della resistenza al fuoco del materiale interposto ma aumentano il peso proprio che si aggira attorno ai 170-190 kg/m<sup>2</sup>.



Figura 1-16 Solaio Latercompound della Coperlegno

Viene inoltre garantita un'elevata rigidità, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 450 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali.

Per quel che concerne le applicazioni, questo tipo di solaio si presenta estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio. Di grande importanza è la facilità di posa in opera garantita proprio dalla leggerezza dei materiali, che risultano essere maneggevoli.

Tale soluzione è economica e sostenibile, grazie alla sua velocità di posa e alla presenza di materiali certificati e con produzione a bassa emissione di energia.

---

### 1.3.3 SOLAIO SOLECO DI PICASISTEMI

---

Il sistema nasce mantenendo inalterata l'impostazione generale del modello classico ma trasformando il rapporto tra i singoli elementi che lo compongono. Attraverso la rivitalizzata sinergia tra la componente in legno lamellare e quella in calcestruzzo è in grado di utilizzare al meglio tutte le caratteristiche degli elementi che lo compongono, garantendo migliori risultati in termini di efficienza globale. Il sistema solaio in legno Soleco permette di ridurre fortemente i pesi propri strutturali, garantendo comunque un comportamento infinitamente rigido a lastra.

I componenti di tale solaio sono:

- Travetti in legno lamellare di abete rosso, armati con connettori speciali a piolo, realizzati in acciaio Fe360; l'inserimento degli stessi avviene mediante avvitatura nelle apposite sedi e fori eseguiti nei travetti, senza l'impiego di colle e/o resine.
- Tavelle in cotto rifinite a vista che, in accoppiamento con una guaina adesiva anti-percolamento ed un pannello in polistirene estruso a densità 30 Kg/m<sup>3</sup>, hanno funzione di cassero isolante alleggerito.
- Armatura integrativa costituita da una rete elettrosaldata F5/15x15 per garantire la distribuzione degli sforzi per la soletta in c.a., e da spezzoni, detti anche “monconi”, F12 ad aderenza migliorata per il collegamento delle teste dei travetti con i cordoli e/o con la travatura principale.

- Soletta collaborante, il cui spessore è di mm 60, che garantisce la distribuzione dello stato tensionale ed assicura un eccellente comportamento a piastra.



Figura 1-17 7.3.3 Solaio Soleco di Picasistemi

Il pannello in EPS ha la duplice funzione sia di alleggerimento del solaio, che di isolamento termico, garantendo così spessori non troppo elevati. Inoltre è facilmente lavorabile con normali attrezzi da cantiere senza produzione di polveri. Il pannello è quindi rapido da installare e permette notevoli risparmi in termini di operazioni di montaggio e di finitura, ottenuta quest'ultima mediante semplice rasatura, nonché di costi, garantendo l'economicità del sistema.

Come affermato questa soluzione presenta, rispetto alle tradizionali tecniche, spessore contenuto attorno ai 170 mm, e peso ridotto di circa 220 kg/m<sup>2</sup>. Viene inoltre garantita un'elevata rigidità, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 500-700 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Per quanto riguarda la resistenza al fuoco, sia il legno che il laterizio risultano resistenti.

Per quel che concerne le applicazioni, questo tipo di solaio si presenta estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio.

Di grande importanza è la facilità di posa in opera garantita soprattutto dall'utilizzo di travetti prefabbricati già armati con i pioli.<sup>9</sup>

### 1.3.4 SOLAIO ARMORAPIDO DELLA ECOSISM

Il solaio introdotto sul mercato dalla Ecosism è composto da lastre in EPS al cui interno è sinterizzata l'armatura metallica portante. La presenza di tralicci in acciaio preassemblati assicura che tutto l'acciaio inferiore necessario in campata raggiunga gli appoggi, costituendo un tirante continuo, senza riduzioni d'area. Situazione questa che ha dimostrato vantaggi notevoli nello sfruttare l'effetto tirante-puntone. Lo sforzo tagliante è sempre raccolto dalle diagonali in acciaio, che in maniera autonoma garantiscono la resistenza degli elementi strutturali, senza contare sul contributo di un calcestruzzo non armato a taglio.<sup>10</sup>

Il sistema è quindi composto da:

- Pannelli di polistirene espanso.
- Tralicci in acciaio
- Soletta in calcestruzzo armata da una rete elettrosaldata.



Figura 1-18 Solaio Armorapido della Ecosism

La presenza delle lastre in EPS garantisce elevati standard di isolamento termico, senza la necessità di aggiunta di ulteriore materiale che produrrebbe un aumento dello spessore del solaio.

Questa soluzione è caratterizzata da ridotto spessore compreso tra i 160 e i 300 mm, e peso proprio di circa 180-200 kg/m<sup>2</sup>, entrambi valori sono inferiori a quelli dei solai tradizionali. Il manufatto Ecosism Armorapido si appoggia sui cordoli perimetrali e il traliccio, che normalmente fuoriesce di mm 150 da ambo i lati, si integra così con il cordolo e, assieme all'armatura di ripartizione superiore, contribuisce a conferire all'impalcato la rigidità necessaria. Fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, in quanto deve aversi buona

trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 200-700 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Il sistema assemblato origina una costruzione monolitica in c.l.s. in grado di resistere al fuoco.

Per quanto riguarda le applicazioni, risulta idoneo per edifici in zone sismiche poiché i benefici ottenuti dal peso ridotto si traducono in minori masse eccitate dal sisma; mantenendo l'effetto di impalcato rigido grazie alla cappa collaborante. Ben si adatta alle esigenze del recupero edilizio grazie alla particolare leggerezza e maneggevolezza che consentono una facile movimentazione manuale offrendo l'opportunità di operare in aree poco agevoli a piè d'opera.

Da rilevare anche che non sono necessarie opere di sostegno. Per la sua installazione sono sufficienti 2 operatori e pochi minuti. La facilità di movimentazione, le dimensioni studiate per l'utilizzo specifico, l'attrezzaggio limitato, il ridotto uso di calcestruzzo e la produzione su misura consentono di realizzare il solaio (finito) in un periodo massimo di 4-5 gg.

---

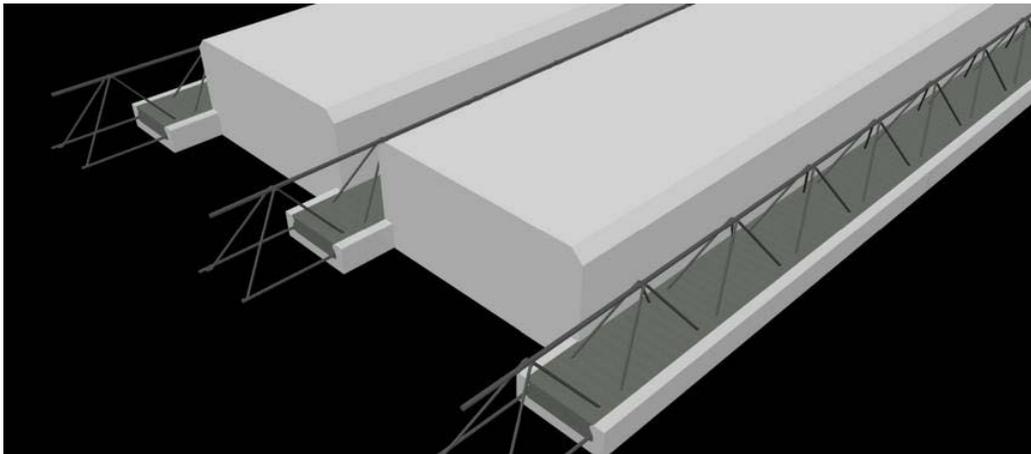
### 1.3.5 SOLAIO STEP DELLA FERRAMATI

---

Il solaio Step è un orizzontamento con travetti prefabbricati tralicciati e blocchi di alleggerimento in polistirene espanso. A differenza dei travetti precompressi, i travetti tralicciati sono dotati di armature aggiuntive che sporgono dalle testate e vengono annegate nelle travi o nei cordoli. Esse sono dimensionate per l'assorbimento di uno sforzo di trazione all'appoggio pari al taglio, nonché agli eventuali sforzi rivenienti dalle azioni sismiche. I tralicci che fuoriescono dall'estradosso del travetto, garantiscono la trasmissione degli sforzi di scorrimento tra la parte gettata in opera ed il travetto stesso. Si possono introdurre travetti coibentati, dotati di un fondello in EPS di mm 25, che ha la funzione di annullamento del “ponte termico” rappresentato dalle nervature. In tal modo si riduce ulteriormente la già bassa trasmittanza termica del solaio, essendo l'EPS uno dei migliori isolanti termici.<sup>11</sup>

Il sistema è quindi formato da:

- Travetti prefabbricati tralicciati con fondello in EPS.
- Blocchi in EPS come elemento di interposizione.
- Soletta in calcestruzzo armata da una rete elettrosaldata.



*Figura 1-19 Solaio Step della Ferramati*

La presenza delle lastre in EPS garantisce elevati standard di isolamento termico, senza la necessità di aggiunta di ulteriore materiale che produrrebbe un aumento dello spessore del solaio.

Questa soluzione presenta ridotto spessore compreso tra i 250 e i 400 mm, e peso proprio di circa 230-350 kg/m<sup>2</sup>, entrambi valori inferiori a quelli dei solai tradizionali. L'impalcato gode della rigidità necessaria, elemento fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 250-700 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Il sistema assemblato origina una costruzione monolitica in c.l.s. in grado di resistere al fuoco.

Questo tipo di solaio si presenta estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio. Altra caratteristica fondamentale è la rapidità e facilità di posa in opera, in quanto, il basso peso da movimentare consente una facile maneggevolezza per gli operatori, risultando inoltre da subito praticabile.

---

### 1.3.6 SOLAIO NEW CLASSIC PLASTBAU DELLA DE.COM

---

Il solaio New Classic Plastbau della Decom è un pannello-cassero autoportante a geometria variabile e a coibentazione termica incorporata, per la formazione dei solai da armare e gettare in opera. Le sue elevate prestazioni sono frutto della collaborazione strutturale fra polistirene espanso e profili metallici zincati opportunamente forati e sagomati.<sup>12</sup>

I componenti principali sono:

- Pannelli in EPS ad alta densità, prodotti con spessori variabili per soddisfare le esigenze di portata e di isolamento richiesti.
- Tralicci in acciaio.
- Soletta in calcestruzzo armata da una rete elettrosaldata.

La presenza dell'EPS nello spessore strutturale garantisce un'elevata coibentazione termica senza la necessità di aggiunta di materiale che andrebbe ad aumentare lo spessore del solaio.

Questa soluzione presenta ridotto spessore di circa 185 mm, e peso proprio attorno ai 185-215 kg/m<sup>2</sup>, entrambi valori inferiori a quelli dei solai tradizionali. In termini di spessore è possibile posizionare l'impiantistica all'interno delle tre cavee longitudinali presenti nel cassero, riducendo l'altezza all'intradosso. La sua conformazione conferisce all'impalcato la rigidità necessaria, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 250-700 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Il sistema assemblato origina una costruzione monolitica in c.l.s. in grado di resistere al fuoco.



*Figura 1-20 Solaio New Classic Plastbau della De.Com*

Questo tipo di solaio si presenta estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio. In particolare, il cassero new classic Plastbau rende possibile la sostituzione dei vecchi solai senza aggravare col suo peso le strutture portanti e le fondazioni. Altra caratteristica fondamentale è la rapidità e facilità di posa in opera, in quanto, il basso peso da movimentare consente una facile maneggevolezza per gli operatori, risultando da subito praticabile; gode infatti di autoportanza fino ad un massimo di 2000 mm e sopporta carichi di prima

fase di circa 150 kg/m<sup>2</sup>. Queste caratteristiche lo rendono sicuro nelle fasi di approntamento della armatura del solaio e di gettata in opera del calcestruzzo.

### 1.3.7 SOLAIO SVELTO DELLA FERRACIN GROUP

Il solaio Svelto della Ferracin group è un cassero in polipropilene associato a travetti di tipo tralicciato che permette di realizzare solai alleggeriti con estrema rapidità di posa sia nelle ristrutturazioni che nelle nuove costruzioni. Il cassero va a sostituire le tradizionali pignatte in laterizio o calcestruzzo alleggerito. È un sistema pratico e veloce che permette di ottenere un solaio più performante, con un peso proprio strutturale minore e che consente anche il passaggio di cablaggi e piccole tubazioni.<sup>13</sup>

Gli elementi che lo compongono sono:

- Cassero in polipropilene.
- Tralicci in acciaio.
- Completamento con rete elettrosaldata superiore e getto di calcestruzzo.



Figura 1-21 7.Solaio Svelto della Ferracin Group

Per quanto riguarda l'isolamento, se necessario, è possibile inserire nella stratigrafia del solaio, materiali isolanti, sia termici che acustici, in modo da non aumentare lo spessore complessivo all'intradosso.

Questa soluzione presenta ridotto spessore compreso tra 150-170 mm, e peso proprio attorno ai 175-225 kg/m<sup>2</sup>, entrambi valori inferiori a quelli dei solai tradizionali. In termini di spessore è possibile, come affermato in precedenza, posizionare l'impiantistica all'interno del solaio. La conformazione conferisce all'impalcato la rigidità necessaria, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, in quanto deve aversi buona trasmissione

delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 400 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Il modulo presenta una discreta resistenza al fuoco.

Questo tipo di orizzontamento si presenta estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio. Caratteristica fondamentale è la rapidità e facilità di posa in opera; il sistema è costruito affinché i moduli si incastrino uno con l'altro. Grazie alla sua leggerezza risulta maneggevole, semplificando il lavoro degli operai, con notevoli risparmi nei costi di manodopera: un'equipe di tre uomini è in grado di posare fino a 200 m<sup>2</sup> di solaio al giorno. È facilmente lavorabile essendo stato studiato pensando alle esigenze che si verificano in cantiere.

### 1.3.8 SOLAIO IN GRC DEL GRUPPOCENTRONORD

L'impalcato viene concepito per essere realizzato dall'accostamento di più lastre prefabbricate, che hanno lunghezza pari alla luce del solaio, larghezza modulare di 2500 mm (con possibilità di sotto moduli) e altezza variabile 200/250/300 mm. Gli elementi sono costituiti da una lastra di base e da degli elementi scatolari con funzione sia portante che di alleggerimento, tra i quali vengono gettati i travetti in calcestruzzo armato. Nelle nervature tra gli elementi scatolari vengono inserite le armature longitudinali, sia lente che da post-compressione, e quindi riempite con calcestruzzo ordinario per quasi tutta la lunghezza dell'elemento, lasciando vuote solo le parti terminali, per permettere la posa dei ferri di collegamento ed il getto di completamento in opera. Nelle nervature trasversali invece, che si creano ogni 2500 mm, vengono disposte delle armature che hanno la funzione di costituire l'ancoraggio per il collegamento laterale in opera degli elementi stessi e creare l'irrigidimento e l'incatenamento trasversale che ne permette l'impiego senza necessità di soletta collaborante anche in zona sismica.<sup>14</sup>

I componenti sono:

- Lastre prefabbricate costituite da una piastra di base e elementi scatolari.
- Armature longitudinali.
- Armature di ancoraggio.
- Getto di completamento in c.l.s.

L'isolamento non risulta però compreso nell'impalcato e deve essere previsto in aggiunta.

La sezione in gran parte costituita da vuoti e gli spessori sottili garantiscono all'elemento il grande pregio di essere molto leggero, il peso complessivo in opera varia da 100 a 120 kg/m<sup>2</sup>, e lo spessore, nettamente ridotto rispetto ai tradizionali solai in laterocemento, di circa 250 mm. La conformazione conferisce all'impalcato la rigidità necessaria, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 400 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Il modulo presenta una discreta resistenza al fuoco.



Figura 1-22 Solaio in Grc del Gruppo Centronord

Le potenziali applicazioni per questi tipi di solai spaziano tra: solai autoportanti in vecchi edifici da ristrutturare o all'interno (piani ammezzati) di edifici esistenti, commerciali o del terziario, in cui non è possibile operare con grosse gru o autogru di cantiere; coperture di edifici civili o industriali, in sostituzione di vecchie coperture ammalorate ed in cui le strutture portanti non possono sopportare i pesi delle normali strutture in c.a. dimensionate secondo i carichi di copertura come da nuova normativa; solai intermedi, sopraelevazioni e coperture in strutture particolari o in zona sismica dove il peso proprio deve essere ridotto al minimo, con indiretti vantaggi di costo strutturale globale; solai in cui gli alleggerimenti strutturali non possono essere realizzati con polistirolo per ragioni di inaccettabilità a causa delle esalazioni di fumi tossico-nocivi in caso di incendio. Risulta quindi estremamente versatile e in grado di rispondere ad esigenze sia legate alle nuove costruzioni sia al recupero edilizio.

Altrettanto importante è la rapidità e facilità di posa in opera, garantita dalla presenza di componenti prefabbricati e leggeri e dall'autoportanza.

### 1.3.9 SOLAIO EMMAFLOOR DELLA EDYL COMPOSITES TECHNOLOGY

Il sistema per solai Emmafloor della E.C.T. Edyl Composites Technology si presenta sotto forma di due soluzioni differenti, sia come solaio tradizionale in calcestruzzo con introduzione di materiali innovativi, sia come sistema a secco. In questo caso si prende in analisi il sistema a secco poiché ha caratteristiche paragonabili con il solaio oggetto della presente tesi.<sup>15</sup>

Uno dei componenti principali del solaio Emmafloor è rappresentato dai profili pultrusi strutturali in fibra di vetro (G.F.R.P.) elementi del tutto simili nelle forme ai classici profili in acciaio, ma dal peso di circa 8 volte inferiore, e dalle prestazioni strutturali paragonabili all'acciaio stesso. L'elemento solaio unisce ad una leggerezza propria la durabilità dei singoli componenti, e soprattutto consente la facilità ed agilità di messa in opera, addirittura personalizzabile ad hoc in base alle esigenze della committenza. La variante a secco si distingue per la totale assenza di cemento caratteristica essenziale in alcune situazioni specifiche.

I componenti fondamentali sono:

- Profili strutturali pultrusi in fibra di vetro
- Pannelli sandwich strutturali.

I primi sono elementi in profilo sottile di materiale composito ottenuti con la tecnica della pultrusione e costituiti da resine organiche rinforzate con fibre lunghe di tipo sintetico (Fiber Reinforced Polymers FRP) generalmente fibre di vetro. Le fibre conferiscono a tali profili un comportamento di tipo elastico fino a rottura e marcatamente ortotropo con netta prevalenza delle proprietà di rigidità e resistenza nella direzione delle fibre. I pannelli invece sono costituiti da due strati resistenti, detti pelli o facce, distanziati tra loro e collegati rigidamente ad un elemento connettivo che prende il nome di core. La struttura così composta ha un comportamento statico notevolmente migliore delle singole parti da cui è costituita. Il core è in genere un materiale leggero e poco resistente, che permette di distanziare le pelli, composte di materiale nobile e di spessore ridotto. Le pelli sono preposte alla distribuzione dei carichi nel piano, la presenza del core è invece utile ad aumentare il valore della rigidità flessionale del pannello, che dipende dalla distanza delle lamine dal piano medio. Solitamente per il core vengono impiegate strutture con celle a nido d'ape (honeycomb), schiume oppure multistrati in legno, mentre per le parti esterne si utilizzano pelli in fibra di vetro o fibra di carbonio.



Figura 1-23 Solaio Emmafloor della Edyl Composites Technology

I pannelli sandwich garantiscono, nel caso di utilizzo di materiale con capacità isolanti nel core, la presenza nello spessore strutturale della componente isolante.

L'impiego di materiali strutturali leggeri, come i pultrusi e i pannelli sandwich, genera un peso proprio del solaio estremamente inferiore a quello dei solai tradizionali, tale valore si aggira attorno ai 40 kg/m<sup>2</sup>. Allo stesso modo anche lo spessore complessivo è estremamente ridotto, circa 130 mm. Il minor peso rispetto al solaio tradizionale e il suo funzionamento a piastra ben si adattano alle nuove direttive antisismiche, garantendo una conformazione in grado di conferire all'impalcato la rigidità necessaria, fondamentale soprattutto negli interventi di sostituzione dei solai nel recupero edilizio, per avere una buona trasmissione delle azioni orizzontali. Tra le caratteristiche tecniche che ne fanno un solaio performante si deve tenere conto anche del carico massimo che è in grado di sostenere, che si aggira attorno ai 500 kg/m<sup>2</sup> aggiuntivi rispetto a quelli strutturali. Il modulo non presenta valori di resistenza al fuoco sufficienti per normativa, dovrà quindi essere garantita da un controsoffitto in classe rei.

Questo tipo di solaio si presenta estremamente versatile, può essere utilizzato in edifici di valenza storica e architettonica, nuove costruzioni e soppalchi. Caratteristica peculiare è anche la facilità e rapidità di posa in opera, dettata dalla leggerezza e manovrabilità di ogni singolo elemento costituente, consentendo di intervenire anche in situazione di difficile accessibilità dei luoghi. Grazie alla possibilità di montare tutto a mano senza l'ausilio di mezzi meccanici si raggiungono notevoli economie, soprattutto se il montaggio avviene in zone particolarmente difficili da raggiungere come i centri storici. Anche il peso ridotto garantisce anche una grande economia, soprattutto in termini di trasporto.

---

<sup>1</sup> Francesco Giovanetti e Rita Argalia, a c. di, *Manuale del recupero del comune di Citta di Castello* (Roma: Edizioni DEI, Tipografia del Genio Civile, 1992).

<sup>2</sup> Sebastiano Serlio (Bologna, 6 settembre 1475 – Fontainebleau, 1554 circa) è stato un architetto e teorico dell'architettura italiano, deve la sua fama al trattato I Sette libri dell'architettura che ebbero una larghissima diffusione contribuendo a diffondere il linguaggio classicista e le nuove tendenze manieriste in tutta Europa.

<sup>3</sup> Villard de Honnecourt, (XIII secolo), è stato un architetto francese, noto soprattutto per il *Livre de portraiture*, una raccolta di disegni, corredati da annotazioni, fondamentale per la conoscenza dell'architettura gotica.

<sup>4</sup> Giovanetti e Argalia, *Manuale del recupero del comune di Citta di Castello*.

<sup>5</sup> Riccardo Gulli, *Recupero sostenibile del patrimonio costruito in ambito sismico* (Mariotti 1820, 2017).

<sup>6</sup> Enrico Nespolo, «I solai collaboranti nella progettazione antisismica», consultato 12 settembre 2017, [http://www.ingegno-web.it/Articolo/1972/I\\_solai\\_collaboranti\\_nella\\_progettazione\\_antisismica.html](http://www.ingegno-web.it/Articolo/1972/I_solai_collaboranti_nella_progettazione_antisismica.html).

<sup>7</sup> «Solaio Compound, solaio lamellare tralicciato antisismico - Coperlegno, case antisismiche, Abitazioni Antisismiche, Solai, Coperture, Tetti e Case Prefabbricate in legno lamellare, Antisismiche.», consultato 9 settembre 2017, [http://www.coperlegno.it/solaio\\_compound.html](http://www.coperlegno.it/solaio_compound.html).

<sup>8</sup> «Latercompound - Il Laterizio integrato nel Solaio Compound», consultato 9 settembre 2017, <http://www.latercompound.it/>.

<sup>9</sup> «Solaio in legno lamellare», consultato 9 settembre 2017, [http://picasistemi.pica.it/viewdoc.asp?co\\_id=105](http://picasistemi.pica.it/viewdoc.asp?co_id=105).

<sup>10</sup> Newwave srl- newwave-media.it, «MODULO SOLAIO», Ecosism srl, consultato 9 settembre 2017, <http://www.ecosism.com/moduli/modulo-solaio/>.

<sup>11</sup> «Sistema STEP: Solaio STEP + muro STEP – Ferramati», consultato 9 settembre 2017, <http://www.ferramati.it/web/prodotti/sistema-step/>.

<sup>12</sup> «Sistema Costruttivo Plastbau® | De.com | Trasformazione e riciclo EPS», consultato 9 settembre 2017, <http://www.decom.it/sistema-costruttivo-plastbau-95.php.htm>.

<sup>13</sup> «Solaio Svelto | Ferracin Group», consultato 9 settembre 2017, [http://www.ferracingroup.it/portfolio-items/solaio\\_svelto/](http://www.ferracingroup.it/portfolio-items/solaio_svelto/).

<sup>14</sup> «Gruppo Centro Nord - L'edilizia fondata su solidi principi», consultato 9 settembre 2017, <http://www.gruppocentronord.it/>.

<sup>15</sup> «ECT SYSTEM - Composites Integrated Solution», consultato 9 settembre 2017, [http://www.ectsystem.eu/ita/solai-alleggeriti-\(emmafloor\)](http://www.ectsystem.eu/ita/solai-alleggeriti-(emmafloor)).



---

## 2 PANNELLO SANDWICH

---

L'elemento di fabbrica, oggetto di questa sperimentazione, è chiamato ad assolvere le funzioni ordinarie di un orizzontamento: sostegno dei carichi e ripartizione degli stessi alla struttura in elevazione, nonché collegamento tra le pareti garantendone una maggiore stabilità. I solai sono estremamente importanti in caso di evento eccezionale, quale il sisma; infatti devono garantire due caratteristiche fondamentali: la continuità strutturale e la rigidità di piano; necessarie entrambe a una corretta ripartizione dell'azione dinamica alla struttura verticale, evitandone così il collasso.

In particolare, la continuità strutturale tra orizzontamento e pareti è necessaria a scongiurare i collassi strutturali definiti come primo modo di danno. Questi risultano essere innescabili da forze sismiche già di bassa entità e possono generare rotazioni e perdite di stabilità degli elementi verticali. Al fine di evitarli deve essere garantito, non solo un buon collegamento tra solaio e parete, ma anche tra gli elementi in elevazione stessi, assicurando un comportamento scatolare dell'edificio. Tale caratteristica si ottiene con l'introduzione di un cordolo continuo su tutti i lati del fabbricato.

La rigidità di piano è una caratteristica necessaria degli orizzontamenti per ottenere una buona trasmissione delle forze del sisma alle pareti.

Altra caratteristica fondamentale coincide con la leggerezza. In passato la sostituzione di solai originari con solai in laterocemento, con adeguati valori di rigidità ma estremamente pesanti, ha portato a un peggioramento delle condizioni statiche dei fabbricati. Questi interventi hanno generato, in caso di sisma, azioni dinamiche elevate sulle pareti, che ne hanno spesso determinato un collasso fuori dal piano a causa del cosiddetto martellamento.

---

### 2.1 ESPERIENZE PRECEDENTI

---

L'idea di sperimentare l'accoppiamento di un grigliato stampato con pannelli di legno nasce prima di questa ricerca di dottorato e ne è stata in qualche modo fonte di ispirazione.

In ambito strutturale il possibile impiego di grigliati stampati risulta particolarmente interessante dove leggerezza, facilità di installazione anche su superfici curve, ottima resistenza chimica e meccanica, limitata dilatazione termica fossero i requisiti ricercati dal progettista.

In quella fase fu scelto di utilizzare il grigliato aperto SCH 38/38 prodotto dalla MM di cui si riportano le schede tecniche.

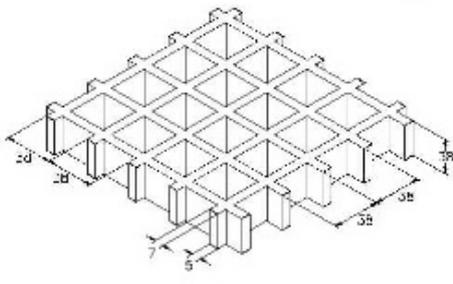
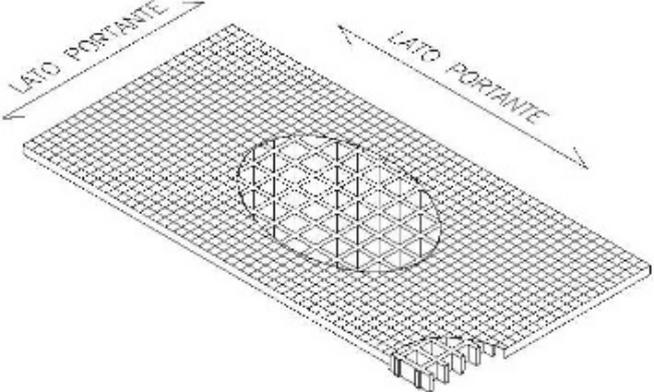
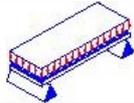
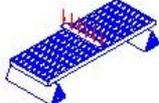
		<b>GRIGLIATI STAMPATI</b>		<b>Grigliato tipo SCH 38/38_IFR</b>
<b>Maglia</b>	mm 38 x 38			
<b>Luce libera</b>	mm 31 x 31			
<b>Altezza</b>	mm 38			
<b>Spessore trave</b>	mm 7 lato superiore			
	mm 5 lato inferiore			
<b>Colore</b>	Grigio RAL 7004 <small>(coloremento RAL indicativo)</small>			
<b>Materie prime</b>	<b>Resina Poliesteri</b>			
	<b>Fibra di vetro Roving Diretto tipo "E"</b>			
	<b>Cariche inorganiche prive di alogeni</b>			
<b>Resina</b>	<b>Modulo di elasticità</b>	<b>Tensione di rottura</b>		
<b>IFR</b>	15000 MPa	325 MPa		
<b>Pannelli standard</b>				
mm 1000 x 2000				
mm 1000 x 3000				
mm 1000 x 4038				
mm 1220 x 3660				
mm 1220 x 4038				
Peso kg/m <sup>2</sup> 18				
<b>toleranza</b>	± mm 5 dimensioni pannello			
	± mm 2 altezza			
<b>Superficie</b>	S	liscia	<i>Antistruciolo livello R10 V10 norma DIN E51130</i>	
	M	concava "tipo meniscus"	<i>Antistruciolo livello R13 V10 norma DIN E51130</i>	
	A	con quarzo	<i>Antistruciolo livello R13 V10 norma DIN E51130</i>	
<b>Reazione al fuoco</b>	<b>Autoestinguente</b>	Spread ≤ 25 norm ASTM E84-98		
		Level B <sub>s</sub> -S1 norm EN 13501-1		
<b>Resistenza all'invecchiamento</b>	Prova di invecchiamento accelerato con lampada UV secondo ASTM G154-06 superata con 5 punti sulla scala dei grigi e senza evidenziare difetti (prova realizzata con 1500 ore di esposizione con cicli alternati di 4 ore UV temperatura 60° e 4 ore condensa temperatura 50°C, irraggiati da lampade UVB 313 nm, irraggiamento 0,71 W/m <sup>2</sup> )			
	Dopo esposizione ai cicli caldo, freddo e umidità secondo la norma UNI EN ISO 9142/04 (n° 21 cicli tipo D3) non presentano difetti residui			
		<b>M.M. S.r.l.</b>		
		Via A. Zanussi 300 / 302, 33100 Udine (Italy)		
		Ph. +39 0432.602218 / 522970 - Fax. +39 0432.522253		
		<a href="mailto:info@mmgrigliati.it">info@mmgrigliati.it</a> - <a href="http://www.mmgrigliati.it">www.mmgrigliati.it</a>		
		<b>SCH 38/38_IFR</b>		
		06.05.2011		
		Rev. 4		
				

Figura 2-1 Scheda tecnica Grigliato SCH 38/38 parte 1

**CARICHI**

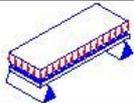
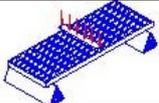
**CARICHI MASSIMI SUGGERITI**

Tipo di supporto	Lineare alle due estremità del pannello
Limiti determinati da	<b>Freccia</b> (abbassamento sotto carico)
la <b>freccia massima ammissibile</b> è pari a 1/200 della distanza tra i supporti	
In accordo alla norma DIN 25437-3 la flessione sotto carico non deve essere maggiore di 1/200 della distanza fra i supporti e la differenza maggiore tra le parti superiori delle superfici delle pavimentazioni adiacenti non deve essere maggiore di 4 mm di altezza.	

CARICO DISTRIBUITO			CARICO CONCENTRATO		
	Distanza tra i supporti [cm]	Carico con freccia pari a 1/200 [kg/m²]		Distanza tra i supporti [cm]	Carico con freccia pari a 1/200 [kg/m]
50	3250	6500	50	1000	2000
70	1150	2350	70	500	1000
90	550	1100	90	300	600
110	300	600	110	200	400

Tutti i carichi inferiori a quelli indicati sono ammissibili

Limiti determinati da	<b>Tensioni ammissibili</b> (sforzi determinati dai carichi)
la <b>tensione massima ammissibile</b> è pari a 1/5 della tensione di rottura (fattore di sicurezza 0.20 – il carico di rottura è pari a 5 volte il carico specificato)	

CARICO DISTRIBUITO			CARICO CONCENTRATO		
	Distanza tra i supporti [cm]	Carico massimo ammissibile [kg/m²]		Distanza tra i supporti [cm]	Carico massimo ammissibile [kg/m]
50	7300		50	1800	
70	3700		70	1300	
90	2250		90	1000	
110	1500		110	800	

Tutti i carichi inferiori a quelli indicati sono ammissibili

-Le caratteristiche sopra riportate vanno intese come valori di riferimento per materiali standard a temperatura ambiente. Pur non dovendo essere considerate come caratteristiche garantite, sono comunque basate sulla nostra esperienza e fornite in buona fede  
 -In accordo alla norma DIN 25437-3 il fattore di conversione di sicurezza dovrebbe essere 0.75 per esposizione all'interno, 0.65 per esposizione all'esterno e 0.50 per esposizione in condizioni aggressive  
 -Indipendentemente dal tipo di esposizione la resistenza chimica deve essere verificata contattando l'ufficio tecnico delle M.M. S.r.l.  
 -In caso di carichi elevati deve essere sempre verificata la resistenza a compressione



**M.M. S.r.l.**

Via A. Zanussi 300 / 302, 33100 Udine (Italy)

Ph. +39 0432.602218 / 522970 - Fax. +39 0432.522253

[info@mmgrigliati.it](mailto:info@mmgrigliati.it) - [www.mmgrigliati.it](http://www.mmgrigliati.it)

**SCH 38/38\_JFR**

06.05.2011

Rev. 4

AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE  
PER LA QUALITÀ CERTIFICATO DA DNV  
= UNI EN ISO 9001:2008 =

Figura 2-2 Scheda tecnica Grigliato SCH 38/38 parte 2

La scelta di accoppiare il grigliato con pannelli di legno multistrato è stata dettata dalle caratteristiche del grigliato stesso che ha un’ottima capacità portante anche con interassi elevati tra gli appoggi, ma subisce abbassamenti considerevoli sotto tali carichi. L’obiettivo di diminuire la freccia del grigliato, ha supportato la scelta di collegare il grigliato con due pannelli di compensato e collegarli tra loro tramite connessioni passanti.



*Figura 2-3 Pannello di compensato, stratigrafia*

I pannelli scelti sono in compensato, hanno quindi buone prestazioni meccaniche ed elevata resistenza all'umidità. Gli spessori dei pannelli sono stati dimensionati in relazione ai materiali ipotizzati per la stratigrafia di completamento. La stratificazione legno – grigliato – legno, è stata prevista utilizzando pannelli di compensato di conifera ad incollaggio fenolico di bassi spessori:

- Compensato superiore, spessore 9,5 mm
- Compensato inferiore, spessore 15,5 mm

Al di sopra dell’impalcato è stata posizionata una barriera al vapore con la funzione di schermare l’elemento costruttivo dalla formazione di condensa dovuta alla presenza di ambienti umidi o differenza di temperatura tra i vani separati dall’elemento costruttivo in oggetto.

Si è scelto di utilizzare uno strato di carta kraft da 90g/mq con spessore inferiore ad 1mm, disposta in fogli larghi 60 cm e di lunghezza variabile, posta tra il grigliato e il pannello di compensato sottostante. In questa particolare configurazione lo strato di carta resistente ha la ulteriore funzione di evitare perdita di materiale di riempimento.



Figura 2-4 Rotolo di carta Kraft

I collegamenti, elemento fondamentale nello studio di questo elemento di fabbrica, sono stati realizzati esclusivamente con connettori meccanici sia per quanto riguarda il collegamento con l’orditura principale sia per la solidarizzazione dei diversi layers componenti l’impalcato sandwich.

Sono stati utilizzati collegamenti passanti con viti, che hanno la funzione di solidarizzare i tre strati dell’impalcato, compensato – grigliato – compensato, e di incrementarne la rigidità. A questi collegamenti sono state attribuite aree di influenza, per l’irrigidimento dell’impalcato, di 50cmq. I collegamenti sono realizzati con rondelle tipo T9 in acciaio inox AISI 316 e viti 8x80 a testa svasata piana con taglio esagonale, rondelle e dadi autobloccanti.

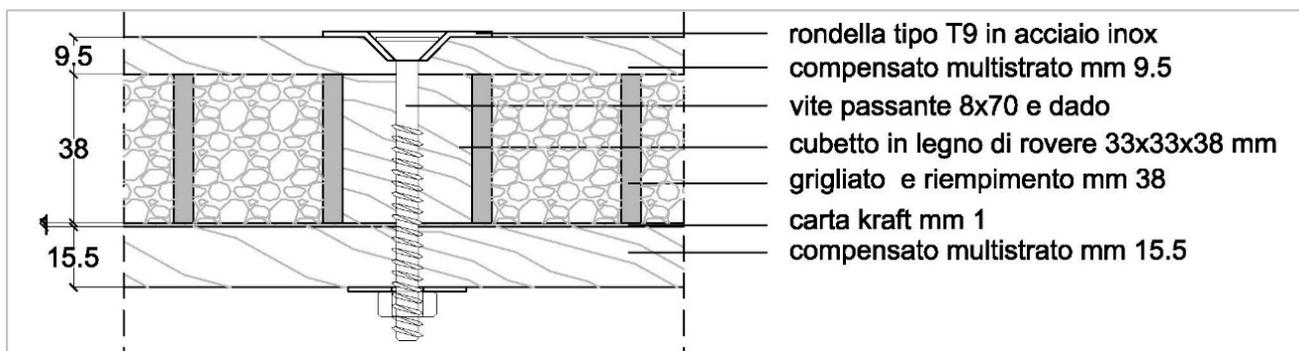


Figura 2-5 Collegamento meccanico passante puntuale

Per “ricucire” le discontinuità fra i diversi elementi nel piano sono stati appositamente progettati dei collegamenti passanti con piastre che hanno la funzione di solidarizzare le disconnessioni tra i grigliati e di incrementarne la rigidità; sono state studiate per assorbire parte degli sforzi agenti nel piano, che il grigliato non sarebbe in grado di assorbire da solo. Le piastre sono in acciaio realizzate su misura e sono collegate tra loro con viti 8x90 a testa svasata piana con taglio esagonale e rondelle e bulloni.

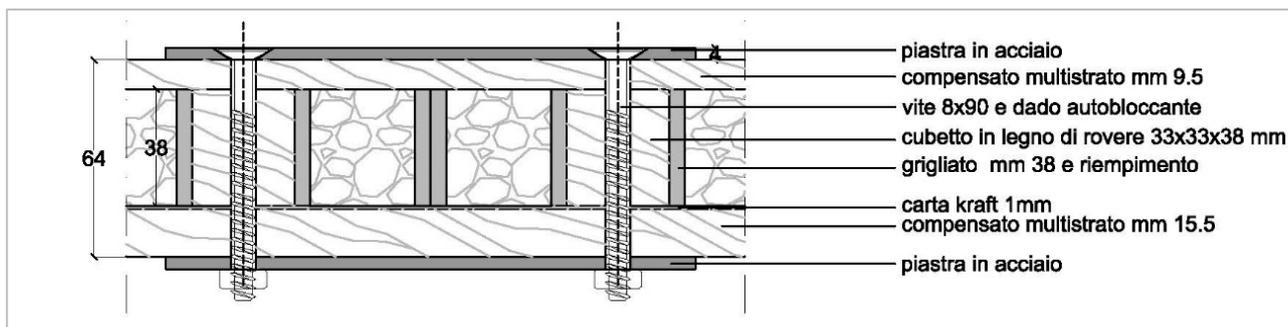


Figura 2-6 Collegamento meccanico passante per recupero discontinuità

I collegamenti diretti tra l’impalcato e la struttura portante sono realizzati con rondelle tipo T9 in acciaio inox AISI 316 e viti 6x90 a testa svasata piana con taglio a croce per legno in acciaio inox

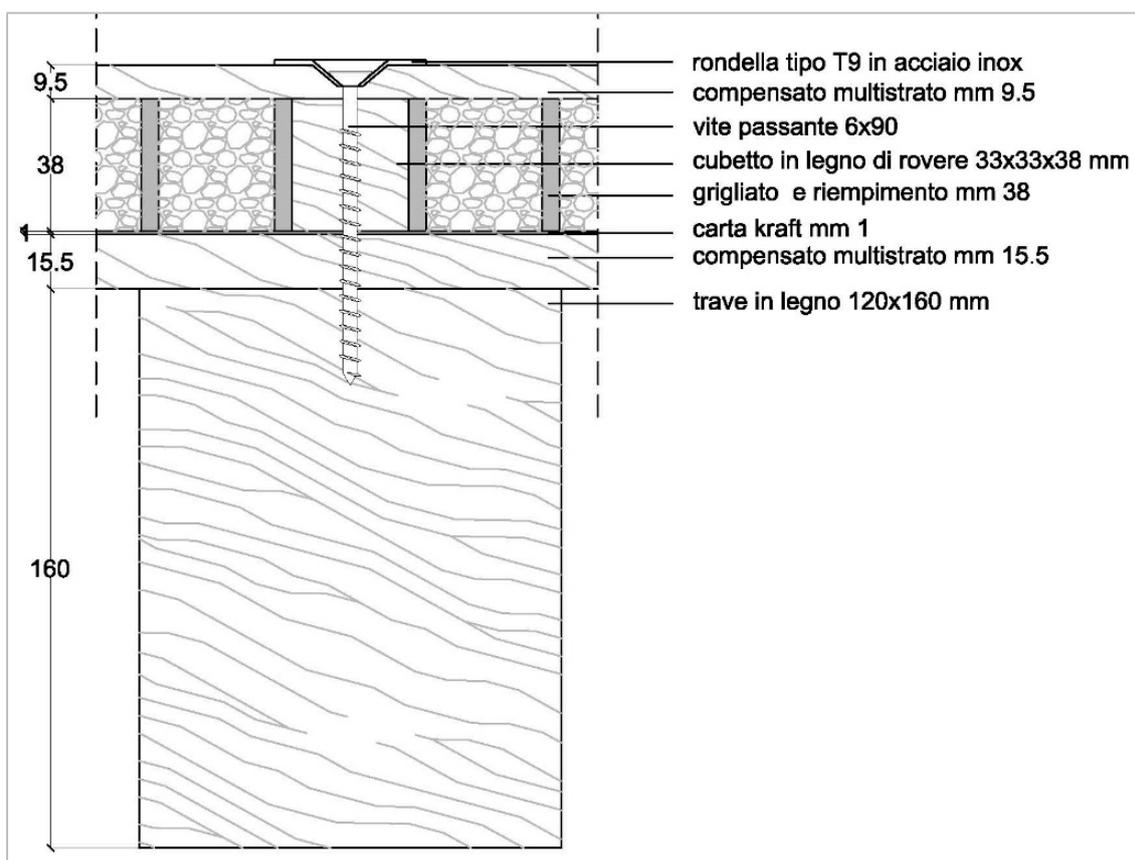


Figura 2-7 Collegamento meccanico su orditura principale

La particolare configurazione dell’impalcato, con maglia aperta quadrata, ha suggerito di sperimentare diversi materiali di riempimento, da posare in opera. La scelta delle caratteristiche di questi materiali, è stata guidata quindi dalla facilità di posa ma anche dal carattere di reversibilità che

sin dai presupposti progettuali si voleva perseguire e dalla loro durabilità. Sono quindi stati scelti materiali in forma granulare di natura:

- minerale: perlite e granulato di marmo
- vegetale: sughero granulare
- petrolchimica: perle di polistirolo

I diversi materiali sono stati alloggiati in un prototipo di impalcato di dimensioni 100x200 cm, dove sono stati testati con prove di trasmittanza in opera e verifiche di resa, facilità e fattibilità di alloggiamento nel grigliato.

I risultati sperimentali hanno portato a preferire il granulato di marmo, commercializzato dalla ditta Fermacell del gruppo Xella di granulometria medio-fine (1-4 mm) che risulta stabile, imputrescibile e non soggetto a degrado. Il materiale, pur avendo una densità di circa 1500kg/mc e non rispettando il requisito di leggerezza, conferisce massa all'impalcato in modo da aumentarne il potere fonoassorbente.

Il criterio di reversibilità riguardo all'uso di questo prodotto nell'impalcato è pienamente rispettato, poiché è possibile rimuovere il materiale, aspirandolo con un bidone aspiratutto di tipo industriale, e stoccarlo per nuovi usi, senza che questo risulti alterato.

Al di sopra dell'impalcato strutturale si è posta, con funzione isolante, della lana di roccia ad alta densità prodotta dalla Rockwool spa. Il prodotto si presenta in forma di pannello rigido in lana di roccia non rivestito ad alta densità, ad elevata resistenza a compressione, calpestabile, per l'isolamento termico, acustico e la sicurezza in caso di incendio. Il pannello è prodotto in due formati, 1200x600 mm e 2000x1200mm, e diversi spessori 30,40,50,60mm. Per la sperimentazione è stato scelto il pannello 1200x600 spessore 30 mm.

Il materiale ha notevoli proprietà meccaniche. L'alta resistenza a compressione (carico puntuale e distribuito) del pannello assicura una calpestabilità ottimale, sia in fase di esecuzione, che ai fini manutentivi. Dal punto di vista acustico la struttura a celle aperte della lana di roccia contribuisce significativamente al miglioramento delle prestazioni fonoisolanti dell'elemento di fabbrica su cui il pannello viene installato. Inoltre, se correttamente inserito tra due strati massivi, come nel caso in esame, diventa l'elemento dissipativo di un sistema massa-molla-massa. Il pannello, incombustibile, se esposto a fiamme libere, non genera né fumo né gocce; aiuta inoltre a prevenire la propagazione del fuoco.

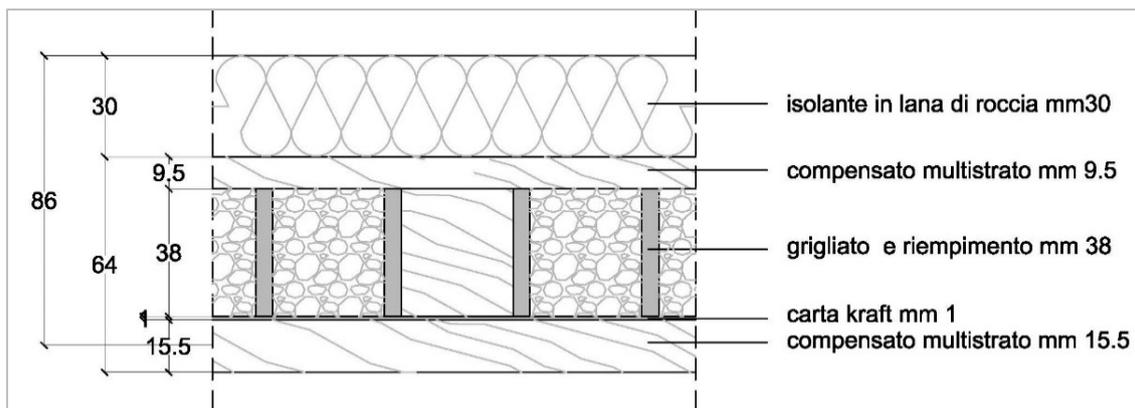


Figura 2-8 Strato isolante in lana di roccia

Sopra l'isolante in lana di roccia, con funzione di ripartizione dei carichi e per completare il sistema massa-molla-massa già anticipato nel paragrafo precedente sono stati inseriti pannelli in gesso fibra, prodotti dalla ditta Fermacell.

Le lastre Fermacell Gessofibra sono composte da due soli componenti naturali: gesso e fibre di cellulosa ottenute da carta riciclata selezionata e sminuzzata. Miscelando questi materiali in acqua (senza altri leganti), il gesso reagisce per calcinazione e avvolge le fibre di cellulosa penetrandole; sottoponendo tale miscela a compressione si ottengono le lastre base di gessofibra. In seguito al taglio, nei vari formati previsti, e all'asciugatura, le lastre vengono levigate e impermeabilizzate con una mano di primer su entrambi i lati. Grazie alla presenza di fibre le lastre hanno elevata stabilità, resistenza meccanica e ottime caratteristiche di resistenza al fuoco.

Per la sperimentazione sono state scelte lastre in gessofibra pre-accoppiate tipo 2E22 da 12,5 mm, per uno spessore totale di 25mm.

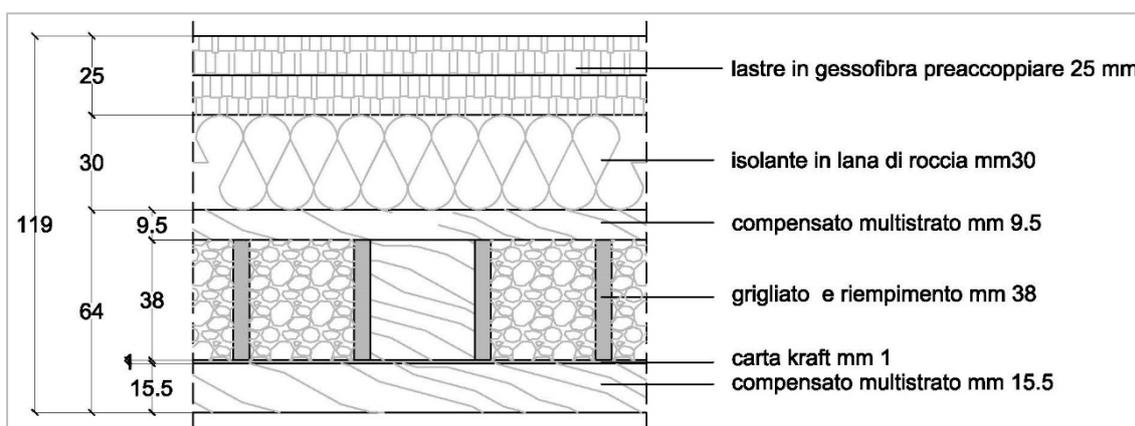


Figura 2-9 Strato di ripartizione in lastre di gessofibra

Il massetto è stato completato con un materassino termo riflettente con la funzione di riflettere il calore prodotto dall'impianto elettrico scaldante posizionato sopra di questo. È stato inserito un

film riscaldante elettrico che può sostituire o integrare un impianto di riscaldamento tradizionale. Questo risulta un sistema a una bassa inerzia ed è efficace se installato in un edificio molto isolato, preferibilmente dall'interno. È stato, infine, previsto l'inserimento di un materassino anti calpestio, posato tra il film scaldante e la pavimentazione in parquet, che ha la funzione di limitare i rumori di calpestio dovuti al pavimento flottante, ma anche di uniformare la dispersione del calore prodotto dall'impianto di riscaldamento elettrico a pavimento.

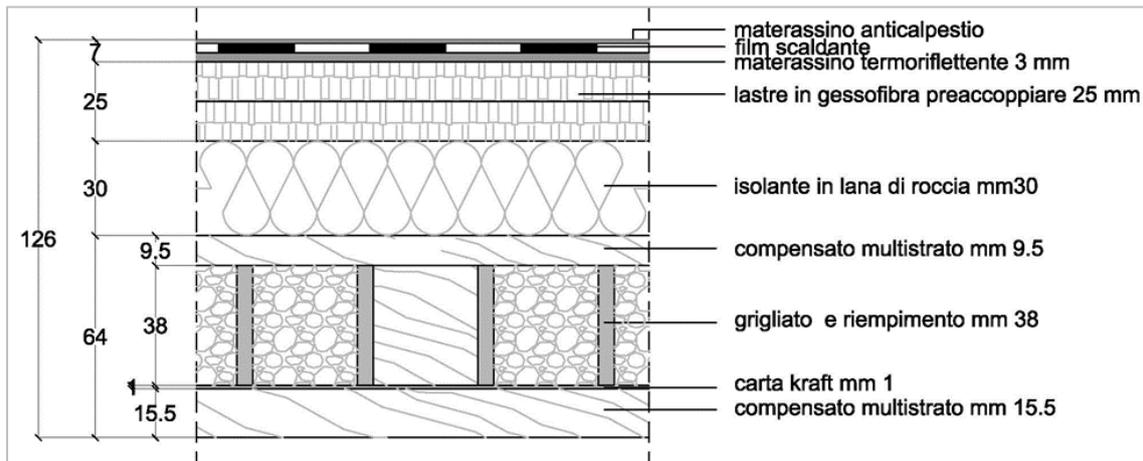


Figura 2-10 Elemento scaldante elettrico

La progettazione e realizzazione della macchina di prova finalizzata ai test termodinamici, si è rivelata fondamentale per individuare i punti salienti delle fasi di montaggio dell'impalcato e quindi propedeutica alla realizzazione del prototipo in scala reale che verrà descritto in seguito.



Figura 2-11 Camera calda per prove termiche

Le fasi di messa in opera dei materiali testati e smontaggio di questi a fine prova, sono stati fondamentali per dimostrare il carattere di reversibilità che ha l'elemento di fabbrica studiato. Ogni

materiale di riempimento, porzione di legname e grigliato è quindi stato recuperato e stoccato per nuovi usi. Inoltre le fasi di sostituzione di materiali da testare hanno mostrato come il materiale di riempimento più idoneo sia di tipo granulare.

Le prove di carico sono state eseguite al fine di evidenziare l'incremento di rigidità e la limitazione flessionale che l'accoppiamento del grigliato, con il compensato di legno e il raffittimento delle connessioni, può subire. Per realizzare la prova di carico a flessione, è stata realizzata una “macchina di prova” ad hoc, che è stata definita con l'aiuto dei tecnici del laboratorio LISG, in base alla disponibilità degli strumenti di misura e degli elementi costituenti la macchina. La “macchina di prova” (Figura 2-12) è stata studiata per testare un elemento di dimensioni 100x200 cm, con un interasse tra gli appoggi di 90 cm; ed è costituita da una vasca, dove:

- la base è formata dall'elemento oggetto di prova
- le pareti del lato lungo, sono realizzate con 4 pannelli in acciaio di dimensioni 30x200 cm, irrigiditi con rinforzi verticali, i pannelli sono stati solidarizzati tra loro con apposito sistema di montaggio e, assemblati, costituiscono una paratia di dimensioni 120x200 cm.
- le pareti del lato corto, sono state realizzate con compensati multistrato di legno, spessore 3cm, dimensioni 120x140, irrigiditi con 2 piattine di ferro dimensioni 120x5cm, spessore 0,5cm.
- l'elemento impermeabilizzante e di contenimento dell'acqua è stato realizzato in tessuto poliestere spalmato in PVC, sagomato a misura.

La vasca è stata costruita su un banco prova, alloggiata e vincolata su appoggi costituiti da travi in acciaio irrigidite, con un interasse di 90 cm. Gli appoggi sono stati a loro volta sopraelevati e disposti su profili in acciaio, per permettere l'alloggiamento della strumentazione sottostante la base della vasca.

Prima di valutare i dati, bisogna tenere in considerazione che la macchina di prova ha manifestato un comportamento anomalo durante i test. È risultato infatti che le paratie in legno posizionate sul lato corto della macchina di prova, abbiano influenzato l'impalcato negli abbassamenti sotto carico e i rientri in piano durante le fasi di scarico. Il legno di cui è composta contro il lato dell'impalcato ha generato un effetto di attrito che ha inevitabilmente influenzato le prove.



*Figura 2-12 Vasca d'acqua per prove di carico*

L'elemento di fabbrica studiato è stato infine realizzato in scala reale per verificare in opera quanto ipotizzato in fase di progettazione, mettere a punto le difficoltà riscontrate nella costruzione dei modelli in dimensioni ridotte utilizzati per le prove descritte in precedenza e soprattutto per ottenere un prototipo su cui realizzare sperimentazioni future.

La costruzione del modello ha inoltre messo in luce i passaggi salienti del processo costruttivo che posso essere migliorati e quelli che invece sono già sufficientemente chiari, nonché gli aspetti tecnici da incrementare. Inoltre la realizzazione dell'elemento di fabbrica in dimensioni paragonabili a quelle di una cella muraria tipica dell'edilizia storica italiana ha permesso di stabilire un tempo medio di montaggio dell'orizzontamento inteso come elemento finito.

Progettazione, test di laboratorio e realizzazione del prototipo hanno confermato la sostanziale correttezza delle supposizioni fatte in merito al miglioramento delle caratteristiche di rigidità ottenibili grazie all'accoppiamento di grigliato e pannelli multistrato. Sono state altresì evidenziate le buone caratteristiche termoacustiche ottenibili attraverso la realizzazione dello strato di completamento a secco, realizzato con materiali già in commercio.

Le sostanziali criticità sono state riscontrate nell'efficacia dei collegamenti passanti, necessari per realizzare la solidarizzazione dei diversi strati dell'impalcato strutturale. I cicli di carico e scarico, seppur eseguiti in regime quasi-statico, hanno determinato una notevole perdita di prestazione dei collegamenti. Venendo a mancare l'accoppiamento rigido tra i diversi layers si sono verificati scorrimenti tra i diversi elementi componenti il sandwich facendo venire meno la “collaborazione” necessaria all'incremento delle prestazioni. L'alesaggio dei fori, specialmente all'interno dei pannelli

multistrato, ha fatto decadere l’ipotesi di conservazione delle sezioni piane, necessaria per garantire un comportamento monolitico della sezione composta legno-grigliato-legno.



Figura 2-13 Fasi di realizzazione del prototipo in scala 1:1

## 2.2 IPOTESI PROGETTUALE

L’obiettivo principale del lavoro di tesi è stato quello di realizzare un elemento costruttivo che avesse una buona rigidità sia per i carichi agenti sul piano, cioè perpendicolarmente all’impalcato, che per quelli agenti nel piano, cioè parallelamente all’elemento.

Per conseguire una maggiore rigidità, l’elemento strutturale portante costituito dal grigliato stampato in PRFV è stato accoppiato con pannelli multistrato di compensato sia inferiormente che superiormente studiando accuratamente la posa di questi ultimi in modo da ottenere uno sfalsamento dei giunti in entrambe le direzioni principali del piano. La scelta di tale metodo di posa è stata guidata dalla volontà di eliminare qualsiasi tipo di discontinuità verticale e di irrigidire conseguentemente quelli che sarebbero stati i punti deboli dell’impalcato. L’incremento prestazionale apportato da questi accorgimenti è stato verificato sperimentalmente con prove di carico a flessione.

Una delle principali caratteristiche dell’impalcato oggetto di studio è la solidarizzazione dei grigliati in PRFV e dei pannelli in legno mediante l’utilizzo di resine epossidiche; tale soluzione

diminuisce considerevolmente i problemi di scorrimento relativo fra i vari strati ed i fenomeni di punzonamento legati all'utilizzo di connettori meccanici, utilizzati nelle esperienze precedenti, che verranno impiegati esclusivamente per il collegamento alla struttura portante ed al cordolo perimetrale.

La scelta dei materiali utilizzati è stata guidata inoltre dal proponimento di ottenere un elemento di fabbrica leggero e di spessore ridotto che fornisse un incremento di rigidità eguagliabile a quelli ottenibili mediante le tecniche tradizionali di consolidamento dei solai lignei ma con una considerevole diminuzione dei carichi. I pannelli di compensato hanno un peso di circa 500 kg/mc e conseguentemente di 5 kg/mq per uno spessore medio di 1 cm mentre il grigliato SCH 38/38DC\_IFR utilizzato pesa 30 kg/mq. Considerando la configurazione standard, e cioè il grigliato accoppiato a due pannelli in multistrato di 9 mm, il peso indicativo dell'intero impalcato è di circa 40 kg/mq per uno spessore di 64 mm.

---

### 2.2.1 PANNELLI DI LEGNO MULTISTRATO

---

Il compensato è un pannello composto di materiale legnoso ottenuto mediante lavorazione di sfogliatura di un tronco, fino ad ottenere un foglio di materiale continuo. Quest'ultimo viene ridotto in fogli, successivamente essiccati per renderne l'umidità idonea al processo di incollaggio. Tali fogli vengono quindi sovrapposti in strati, di norma di numero dispari, con la fibratura incrociata e disposizione simmetrica rispetto allo strato centrale. Successivamente si passa alla fase di incollaggio tra i diversi fogli, con adesivo fenolico, e alla pressatura che consente di rendere il tutto solidale. La disposizione incrociata, con strati a fibratura del legno longitudinale alternati a quelli adiacenti con fibratura trasversale, consente di "compensare" le variazioni dimensionali del pannello, limitando così il comportamento anisotropo tipico del legno massiccio. Ciò permette di ottenere un materiale con elevata uniformità di prestazioni meccaniche nel piano del pannello. La simmetria di composizione ne riduce parimenti le deformazioni di planarità, mentre l'impiego di fogli sottili ma di ampia estensione superficiale elimina il rigonfiamento dovuto all'assorbimento di umidità.



Figura 2-14 Pannelli multistrato

I pannelli scelti sono in compensato di conifera ad incollaggio fenolico ed hanno quindi buone prestazioni meccaniche ed elevata resistenza all'umidità. Lo spessore di 9 mm è stato individuato in base al carico che dovevano sopportare, considerando il peso proprio del pannello, il peso del grigliato e l'interasse tra gli appoggi della struttura in legno.

Nominal Panel Thickness		Span Rating (inches)	Maximum Span (inches)		Allowable Live Loads (psf)														
(mm)	(inches)		With Edge Support	Without Edge Support	Spacing of Supports Center to Center														
					12	16	19.2	24	32	40	48	54	60						
Sheathing Span	9	11 / 32	24 / 0	24	20	190	100	60	30										
	12	15 / 32	32 / 16	32	28		180	120	70	30									
	15	19 / 32	40 / 20	40	32			205	130	60	30								
	18	23 / 32	48 / 24	48	36				175	95	45	35	-						
	21	13 / 16	48 / 24	48	36				175	95	45	35							
	25	1	54 / 32	54	40				130	75	50	35							
Floor Span	15	19 / 32	20 OC	32	32	270	150	100	60	30									
	18	23 / 32	24 OC	48	36		240	160	100	50	30	25							
	21	13 / 16	24 OC	48	36			160	100	50	30	25							
	25	1	32 OC	48	40			295	185	100	60	40							

Note: The allowable spans were determined using a dead load of 10 psf. If the dead load exceeds 10 psf then the live load shall be reduced accordingly. To consider this data, panels shall be a minimum of 24 inches (600mm) wide.

Figura 2-15 Caratteristiche dimensionali dei pannelli multistrato

Structural Properties								
Nominal Panel Thickness (mm)	Plys	Face Thickness (mm)	Average Weight		MOR		MOE	
			kg/m <sup>2</sup>	lb/sqft	∥(N/mm <sup>2</sup> )	⊥(N/mm <sup>2</sup> )	∥(N/mm <sup>2</sup> )	⊥(N/mm <sup>2</sup> )
6.5	3	2.54	3.7	0.8	79	16	7,883	722
9	3	3.20	4.6	1.0	72	15	7,433	754
12	5	2.54	6.4	1.3	66	28	7,009	2,222
15	5	3.20	8.0	1.7	63	33	6,806	2,645
18	7	2.54	9.7	2.0	57	32	6,193	3,151
21	7	3.20	11.2	2.3	56	35	6,790	3,653
25	9	3.20	13.5	2.8	54	33	7,240	2,947
30	11	2.54	16.2	3.4	51	42	5,915	4,594

Note: Weight is measured considering a density of 540 kg/m<sup>3</sup> at 9% moisture content. Strength values were obtained following European EN 310 standard and represent averages.

**Glue**

AraucoPly is glued with a WBP phenolic adhesive. The glue line meets European EN 314 standard. Formaldehyde emission is within E1 level.

**Grade and Profiles**

- Following grades are available: III/II; II/III
- T&G, Square and ship lap edges are available.
- Grooved surfaces as siding, V groove and W groove, are available.

**Uses and Applications**

- Structural (flooring, roofing, industrial)
- None Structural (furniture)
- Interior Fittings

Figura 2-16 Caratteristiche meccaniche dei pannelli multistrato

## 2.2.2 IL GRIGLIATO STAMPATO IN PRFV

Il progresso nel campo dell'ingegneria edile e civile è sempre più connesso con lo sviluppo di strutture leggere e resistenti alle sollecitazioni meccaniche, ambientali e termiche. I materiali compositi ben si sposano con questa filosofia: costituiti da fibre continue annegate all'interno di una matrice, consentono una riduzione significativa del peso delle strutture rispetto ai materiali convenzionali, dai quali si distinguono anche per il fatto di non essere corrodibili. Negli ultimi anni si è assistito ad un'ampia diffusione dei materiali compositi nel settore ingegneristico, non solo per applicazioni relative a strutture di nuova costruzione ma anche ad edifici esistenti. In questo lavoro di ricerca si vogliono applicare le conoscenze già sperimentate nel campo dei compositi agli interventi di consolidamento strutturale dei solai per il recupero di strutture deteriorate o per il loro adeguamento sismico.

Lo studio dei compositi è una scienza e una tecnologia che richiede un'interazione stretta di discipline diverse come progetto e analisi strutturale, analisi dei materiali, meccanica dei materiali ed ingegneria di processo. Un progetto di ottimizzazione della composizione del materiale e allo stesso tempo strutturale.

Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra ha origini remote: già nella Bibbia i primi riferimenti al rinforzo di laterizi con fibre di paglia risalgono all'antico Egitto. Nel XIX secolo le barrette di ferro erano usate per rinforzare le murature e nella prima metà del XX secolo venne

realizzata la prima barca in vetroresina parallelamente allo studio delle plastiche rinforzate per l'impiego aeronautico e per apparecchi elettrici. Fin dai primi anni '60 sono stati utilizzati composti fibrosi nell'industria navale, meccanica e aerospaziale insieme alle prime fibre di boro e carbonio ad alta resistenza. Compositi con matrici metalliche come boro e alluminio già negli anni '70 e solo dal '73 la Dupont introdusse le fibre aramidiche. Negli stessi le applicazioni si espansero al settore sportivo e biomedico. Gli anni '80 portarono ad un significativo sviluppo di fibre al alto modulo di elasticità. Potenzialmente le conoscenze a disposizione datano già quasi 60 anni ma una serie di fattori concomitanti però hanno causato un ritardo considerevole nell'utilizzo di questi materiali nel mondo delle costruzioni in quanto le prime ricerche per l'applicazione nell'ingegneria civile risalgono al 1985. Leader di questa tecnologia furono paesi come il Giappone, solo successivamente gli Stati Uniti e infine, in maniera piuttosto cauta e sparsa anche l'Europa.

Oggi l'enfasi è posta sullo sviluppo di più moderni compositi con matrici metalliche e ceramiche per le applicazioni ad alta temperatura. Innumerevoli applicazioni quali tubi interrati e container, barche, veicoli di terra, strutture aeronautiche e spaziali, applicazioni nell'edilizia civile, componenti per automobili, attrezzi sportivi, prodotti biomedici e moltissimi altri prodotti progettati per avere alte prestazioni meccaniche e/o stabilità dimensionale nei diversi ambienti accoppiati e bassi pesi.

#### *2.2.2.1 PROPRIETÀ DEI COMPONENTI*

Rispetto ai materiali monolitici, i compositi apportano rilevanti vantaggi dal punto di vista della resistenza e dell'elevata rigidità, hanno una lunga vita a fatica, bassa densità, alta resistenza chimica e alla corrosione, isolamento termico. Sono inoltre facilmente adattabili alle diverse funzioni imputabili alle strutture.

Il carattere eterogeneo e anisotropo del materiale unito all'alta resistenza specifica (rapporto resistenza/densità) e all'alta rigidità specifica (rapporto modulo E/densità) sono la base delle ottime prestazioni strutturali offerte da tali materiali.

L'analisi e la successiva verifica sperimentale dei compositi richiede un gran numero di campioni di base e l'inserimento dei dati relativi alle proprietà medie dei materiali e quindi della disposizione dei propri costituenti. Ciò comporta uno svantaggio rispetto ai materiali monolitici che sono caratterizzati meccanicamente in maniera più semplice: sono sufficienti due valori di resistenza e due costanti elastiche.

I compositi possono operare per lunghi periodi di tempo in ambienti aggressivi, di contro sono sensibili a sbalzi igrotermici. Contro l'erosione e i danneggiamenti di superficie è necessario applicare

un rivestimento protettivo. I danneggiamenti che avvengono all'interno del composito possono essere facilmente riparati ma sono necessarie sofisticate tecniche non distruttive per rilevare e monitorare il loro stato di salute. I materiali convenzionali come i metalli, al contrario, soggetti a problemi di corrosione in ambiente aggressivo e successiva propagazione fino al cedimento vero e proprio, permettono di rilevare in maniera facile il danneggiamento ma non è altrettanto facile la loro riparazione.

Nei compositi la matrice ha la funzione di proteggere le fibre dall'abrasione e dalla corrosione ambientale, tenere unite le fibre e distribuire il carico su esse. Questa, ha inoltre una notevole influenza sulle proprietà del composito stesso quali: modulo trasversale, resistenza a taglio e compressione. Esistono varie tipologie di matrici a seconda della loro composizione chimica ma l'utilizzo è limitato a un piccolo gruppo. Si tratta delle matrici polimeriche a base di resine termoindurente che a loro volta possono essere epossidiche, poliestere o vinilestere. Nel presente lavoro si considerano matrici a base di resine poliestere le quali presentano una viscosità e resistenza meccanica inferiore rispetto alle epossidiche ma anche un minore costo.

Le fibre sono gli elementi che determinano le proprietà meccaniche e la resistenza del composito. Il loro elevato rapporto tra lunghezza e diametro permette un ingente trasferimento delle sollecitazioni con la matrice. Sottoposte a trazione esibiscono un comportamento elastico lineare fino a rottura, caratterizzato da elevati valori di resistenza e modulo elastico, confrontabile con quello dell'acciaio. Sulla base della forma di rinforzo, i comuni materiali compositi possono essere classificati come segue:

- a fibra casuale (fibra corta)
- a fibra continua (fibra lunga)
- a particelle come rinforzo
- a Filler compositi

Le fibre più utilizzate per la produzione di materiali compositi nell'edilizia sono:

- Carbonio (CFRP)
- Vetro (GFRP)
- Organiche, ad esempio aramidiche (AFRP)
- Minerali, ad esempio il basalto

Proprio queste ultime, le fibre di basalto, sono state introdotte solo recentemente e sono ancora in via di sperimentazione. Si trovano inoltre esempi di fibre naturali come: iuta, lino, canapa, cocco e banana.

Le fibre di vetro rappresentano il tipo più comune di rinforzo per i compositi a matrice polimerica grazie al loro basso costo, alle elevate resistenze alla trazione e all' attacco chimico. Gli svantaggi riguardano invece il ridotto modulo elastico, bassa resistenza a fatica e scarsa adesioni a matrici polimeriche.<sup>1</sup>

	Modulo di elasticità normale $E$	Resistenza a trazione $\sigma_r$	Deformazione a rottura $\epsilon_r$	Coefficiente di dilatazione termica $\alpha$	Densità $\rho$
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46
Fibre di carbonio (basso modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.8
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.8
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44
Fibre Kevlar	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10
Basalto da trazione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	

Figura 2-17 Caratteristiche meccaniche delle fibre

### 2.2.2.2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il Giappone è il primo paese a legiferare sull'applicazione dei compositi per l'edilizia. Seguito dagli Stati Uniti grazie all'ausilio di tre principali associazioni che si occupano di normazione quali: ACI 440, ASTM, e il COMPOSITE INSTITUTE.

In Italia, alla diffusione di queste tecnologie innovative non corrisponde, tuttavia, un aggiornamento del quadro normativo, che allo stato attuale è, come per tutte le costruzioni in genere, fondamentalmente costituito dalle Norme Tecniche per le costruzioni D.M. 14/01/2008 e dalla circolare esplicativa n. 617 del 02/02/2009. Tali norme riconoscono la possibilità di utilizzare materiali non tradizionali, tra cui rientrano i compositi fibrorinforzati e si sottolinea la possibilità di utilizzare su costruzioni esistenti "materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità, ovvero quelli elencati al cap. 12".

Dal punto di vista della qualificazione e accettazione del materiale, come anche per il progetto e le verifiche strutturali, rimandano alle Istruzioni del consiglio Superiore dei lavori pubblici, alle linee guida e ai documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Più specificatamente, il paragrafo 4.6 e il cap. 11 delle NTC del 2008, stabiliscono che non si possono utilizzare materiali non tradizionali senza il preventivo assenso del consiglio Superiore dei lavori pubblici. È necessario ottenere la certificazione di Idoneità Tecnica all'Impiego, rilasciata dal Servizio Tecnico centrale (STC).

Nel 2004 il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) ha emanato il documento CNR DT 200: *"Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di Interventi di consolidamento Statico mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati"*, la cui prima revisione è stata emanata nel 2012 (CNR DT 200 R1/2012). Nel 2009 le CNR DT 200 sono state approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP), che le ha divulgate sotto forma di linee guida Nazionali (24/07/2009), aggiungendo anche le indicazioni per le prove di accettazione in situ. Da questo momento è quindi possibile utilizzare i compositi costituiti da matrice epossidica e fibre di carbonio, vetro o aramidiche (si escludono invece le matrici cementizie e le altre fibre).

Nel 2009 è stata diffusa una prima bozza di linee guida per la riparazione ed il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni, predisposta dal consorzio della rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica ReLUIS. Sono attualmente in via di redazione, da parte di una commissione istituita dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, le linee guida per la qualificazione di compositi rinforzati a matrice inorganica da utilizzare per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

Tra le diverse linee guida del CNR sul consolidamento mediante compositi, si citano anche le:

- CNR DT 201/2005 - Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di consolidamento Statico di Strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati;
- CNR DT 202/2005 - Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di consolidamento Statico di Strutture Metalliche mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati;
- CNR DT 203/2006 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato;
- CNR DT 205/2007 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di Strutture realizzate con profili pultrusi di Materiale composito Fibrorinforzato (FRP).

- CNR DT 200 r1/2012, che per loro genesi e natura non sono filtrano la numerosa bibliografia nazionale ed internazionale fornendo un aiuto progettuale ai tecnici, lasciando, ovviamente, a questi ultimi la responsabilità finale delle scelte operate.

Sebbene particolare attenzione sia posta riguardo alla qualificazione e al controllo dei materiali per l'impiego strutturale, non sono ancora disponibili criteri adeguatamente condivisi, con i conseguenti problemi in fase di progettazione, di accettazione in cantiere e nel collaudo finale.

### 2.2.2.3 GRIGLIATO STAMPATO SCH38/38 DC (MM GRIGLIATI)

I grigliati in PRFV (Plastica Rinforzata con Fibre di Vetro) utilizzati per le fasi di sperimentazione di questo lavoro sono stati forniti dalla MM Grigliati di Udine e sono realizzati mediante la tecnologia RTM (Resin Transfer Moulding), processo di stampaggio ad iniezione.

Il rinforzo con fibre di vetro, sotto forma di fili continui (a *roving* diretto) viene disposto a secco attraverso un sistema di pretensionamento, all'interno di una matrice in acciaio opportunamente e preventivamente trattata con agenti distaccanti.

La distribuzione della fibra avviene ortogonalmente al piano del grigliato e risulta molto importante ai fini della resistenza meccanica del manufatto. La matrice viene quindi richiusa ermeticamente da un coperchio mediante un sistema ad azionamento idraulico. Tramite un foro viene successivamente iniettata la resina termoindurente con l'ausilio di una pompa ad iniezione a miscelazione automatica.



Figura 2-18 Grigliato stampato in PRFV SCH 38/38\_DC

Si possono iniettare diverse tipologie di resine termoindurenti come, poliesteri, vinilesteri ed epossidiche opportunamente additivate con promotori e catalizzatori; l'attenzione sugli aspetti di eco compatibilità ha negli ultimi anni concentrato l'attenzione sulla possibilità di impiego anche di resine Biobased e fibre di rinforzo naturali. La resina entra nello stampo andando ad impregnare tutto il rinforzo preventivamente disposto; il materiale in eccesso fuoriesce infine dal foro posizionato all'estremità opposta della matrice. La resina viene preparata ed iniettata in stampi termostatati alla temperatura di 35 °C, questo al fine di rendere il processo omogeneo. Si ottiene pertanto un manufatto monolitico avente una struttura composta da 40% di elementi di rinforzo (Fibra di vetro, Fibra di carbonio ecc.) e dal 60% di resina.

Attraverso il sistema di estrazione ad espulsori del quale ciascuna matrice è dotata, il manufatto viene staccato e sollevato.

Lo stampaggio dei grigliati mediante la tecnologia RTM consente un'omogenea polimerizzazione del manufatto, in quanto la resina viene additivata con il sistema di catalisi in un'unica miscela. La chiusura totale dello stampo garantisce una migliore e completa polimerizzazione della resina, mantenendo in fase di picco esotermico, gran parte del calore sprigionato dalla reazione all'interno della matrice.

L'impatto ambientale del processo risulta essere molto limitato in quanto la reticolazione dello stirene all'interno dello stampo chiuso, avviene in percentuali molto elevate e prossime al 99%.

La tecnologia RTM permette di progettare e realizzare design di grigliato specifici per tipo di maglia, spessore e formato, con superfici chiuse e struttura sandwich, anche per lotti di produzione non eccessivamente grandi.

I rinforzi di alcuni punti specifici in prossimità degli eventuali ancoraggi possono essere preventivamente studiati ed individuati (possono essere usate fibre più performanti come le fibre di carbonio, aramidiche e/o materiali tradizionali o inserti metallici o in altri materiali).

In ambito strutturale il possibile impiego di grigliati stampati risulta particolarmente interessante dove leggerezza, facilità di installazione anche su superfici curve, ottima resistenza chimica e meccanica, limitata dilatazione termica fossero i requisiti ricercati dal progettista.

Diversamente dalla sperimentazione precedente, dove l'utilizzo di connettori meccanici suggeriva di utilizzare i grigliati a maglia aperta, per lo sviluppo della nuova ipotesi progettuale si è optato per l'utilizzo dei grigliati a maglia chiusa con doppia copertura. Nella produzione corrente della ditta MM vengono realizzati diversi formati ed è stata scelta la tipologia SCH 38/38\_DC che si differenzia dalla tipologia SCH 38/38 solo per la presenza delle chiusure orizzontali superiore ed inferiore.

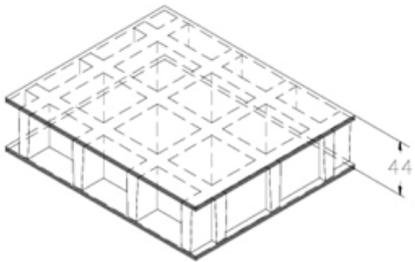
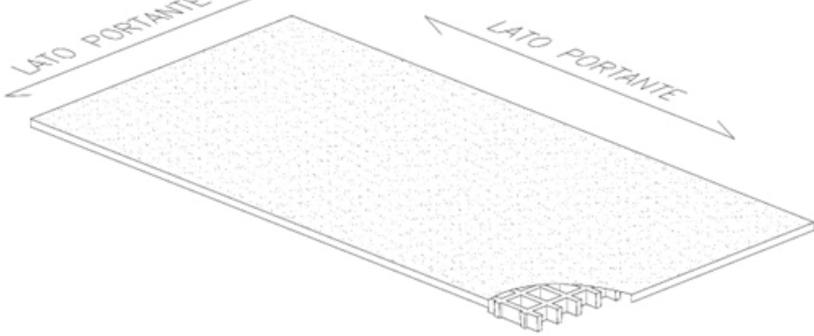
SCH 38/38DC_IFR		GRIGLIATI STAMPATI	
06.05.2011 - Rev. 4			
<b>Maglia</b>	mm 38 x 38		
<b>Altezza</b>	mm 44		
<b>Copertura</b>	mm 3 superiore		
	mm 3 inferiore		
<b>Spessore trave</b>	mm 7 lato superiore		
	mm 5 lato inferiore		
<b>Colore</b>	Grigio RAL 7004 <small>riferimento RAL indicativo</small>		
<b>Materie prime</b>	<b>Resina Poliestere</b>		
	<b>Fibra di vetro Roving Diretto, Mat e Stuoia tipo "E"</b>		
	<b>Cariche inorganiche prive di alogeni</b>		
<b>Resina</b>	<b>Modulo di elasticità</b>	<b>Tensione di rottura</b>	
IFR	15000 MPa	130 MPa	
<b>Pannelli standard</b>			
mm 1000 x 1800			
mm 1000 x 3660			
mm 1220 x 3660			
<b>Peso kg/m<sup>2</sup> 30</b>			
<b>tolleranza</b>			
	± mm2 altezza		
<b>Superficie</b>	A	con quarzo	Antisdrucchiolo livello R13 V4 norma DIN 51130
<b>Reazione al fuoco</b>	<b>Autoestinguente</b>	Spread ≤ 25 norm ASTM E84-98	
		Level B <sub>f</sub> -S1 norm EN 13501-1	
<b>Resistenza all'invecchiamento</b>	<b>Prova di invecchiamento accelerato con lampada UV secondo ASTM G154-06 supe-rata con 5 punti sulla scala dei grigi e senza evidenziare difetti</b> (prova realizzata con 1500 ore di esposizione con cicli alternati di 4 ore UV temperatura 60° e 4 ore condensa temperatura 50°C, irraggiati da lampade UVB 313 nm, irraggiamento 0,71 W/m <sup>2</sup> )		
	<b>Dopo esposizione ai cicli caldo, freddo e umidità secondo la norma UNI EN ISO 9142/04 (n° 21 cicli tipo D3) non presentano difetti residui</b>		

Figura 2-19 Scheda tecnica grigliato stampato SCH 38/38\_DC parte 1

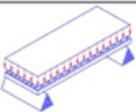
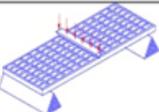
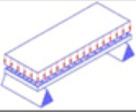
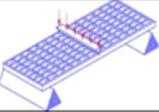
CARICHI			
<b>CARICHI MASSIMI SUGGERITI</b>			
Tipo di supporto		Lineare alle due estremità del pannello	
Limiti determinati da		Freccia (abbassamento sotto carico)	
<b>la freccia massima ammissibile è pari a 1/200 della distanza tra i supporti</b>			
In accordo alla norma DIN 24537-3 la flessione sotto carico non deve essere maggiore di 1/200 della distanza fra i supporti e la differenza maggiore tra le parti superiori delle superfici delle pavimentazioni adiacenti non deve essere maggiore di 4 mm di altezza.			
<b>CARICO DISTRIBUITO</b>		<b>CARICO CONCENTRATO</b>	
			
Distanza tra i supporti	Carico con freccia pari a 1/200	Carico con freccia pari a 1/100	Distanza tra i supporti
[cm]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[cm]
50	15350	30700	50
70	5550	11150	70
90	2600	5250	90
110	1400	2850	110
Tutti i carichi inferiori a quelli indicati sono ammissibili			
Limiti determinati da		Tensioni ammissibili (sforzi determinati dai carichi)	
<b>la tensione massima ammissibile è pari a 1/5 della tensione di rottura</b> (fattore di sicurezza 0.20 – il carico di rottura è pari a 5 volte il carico specificato)			
<b>CARICO DISTRIBUITO</b>		<b>CARICO CONCENTRATO</b>	
			
Distanza tra i supporti	Carico massimo ammissibile	Distanza tra i supporti	Carico massimo ammissibile
[cm]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[cm]	[kg/m <sup>2</sup> ]
50	12600	50	3150
70	6400	70	2250
90	3850	90	1750
110	2600	110	1400
Tutti i carichi inferiori a quelli indicati sono ammissibili			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le caratteristiche sopra riportate vanno intese come valori di riferimento per materiali standard a temperatura ambiente. Pur non dovendo essere considerate come caratteristiche garantite, sono comunque basate sulla nostra esperienza e fornite in buona fede.</li> <li>- In accordo alla norma DIN 24537-3 il fattore di conversione di sicurezza dovrebbe essere 0.75 per esposizione all'interno, 0.65 per esposizione all'esterno e 0.50 per esposizione in condizioni aggressive.</li> <li>- Indipendentemente dal tipo di esposizione la resistenza chimica deve essere verificata contattando l'ufficio tecnico delle M.M. S.r.l.</li> <li>- In caso di carichi elevati deve essere sempre verificata la resistenza a compressione.</li> </ul>			

Figura 2-20 Scheda tecnica grigliato stampato SCH 38/38\_DC parte 2

A fronte di uno spessore complessivo leggermente più elevato di 44 mm contro i 38 cm della versione aperta, si ha un incremento delle caratteristiche di resistenza per effetto della presenza delle

coperture che diventano funzionali alla realizzazione del collegamento ai pannelli multistrato per mezzo di adesivi.

L'obiettivo è quello di realizzare un impalcato composto legno-grigliato-legno che possa essere realizzato in officina pronto per l'utilizzo in cantiere sia all'interno del modulo costruttivo sia, eventualmente, per opere di consolidamento di solai esistenti.

---

### 2.2.3 SISTEMA DI INCOLLAGGIO

---

Proprio per l'importanza rivestita dall'interfaccia adesiva tra legno e vetroresina la sperimentazione ha visto l'utilizzo di diversi adesivi. La ricerca delle migliori caratteristiche in termini di aderenza, elasticità ma anche praticità di utilizzo ha richiesto una comparazione tra cinque tipologie di adesivi forniti da diversi produttori, al fine di determinare quale assicuri migliore adesione tra i materiali e più elevate caratteristiche meccaniche all'intero impalcato.

In base alla norma UNI EN 923 un materiale adesivo è definito come “*sostanza non metallica in grado di congiungere materiali mediante fissaggio superficiale (adesione), e in modo tale che il legame ottenuto possieda adeguata forza interna (coesione)*”.

Il principale scopo degli adesivi è quello di trasmettere le tensioni tangenziali che si generano a seguito dello scorrimento relativo tra due substrati. Il fenomeno dell'adesione è frutto di una serie di meccanismi fisico-chimici che si stabiliscono tra le molecole dell'adesivo e dall'aderendo.

Lo sviluppo del mercato delle costruzioni, sempre più caratterizzato da tempi e prestazioni certe, ha fatto sì che in particolari applicazioni si passasse da prodotti tradizionali a base cementizia, all'utilizzo di adesivi a base di resine sintetiche. Esistono molte tipologie di adesivi naturali e sintetici (elastomeri, resine termoplastiche e termoindurenti mono o bicomponente).

Le resine epossidiche, ad esempio, sono un'importante classe di materiali polimerici termoindurenti; grazie alle loro proprietà meccaniche quali l'alta resistenza e l'alta rigidità si utilizzano per diverse applicazioni: dai rivestimenti per metalli ai comuni adesivi e alle matrici per compositi ad alte prestazioni.

Tali resine dal punto di vista chimico, sono caratterizzate dalla presenza di una molecola contenente almeno due gruppi epossidici e da un agente curante. Tali gruppi sono composti di un atomo di ossigeno legato a due di carbonio a loro volta uniti. Essendo polimeri amorfi, ovvero la disposizione delle catene nello spazio è casuale perché la struttura reticolata impedisce il movimento delle molecole, sono caratterizzati da una sola temperatura denominata temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ), solitamente elevata. Il passaggio attraverso la transizione vetrosa è accompagnato da

notevoli cambiamenti di proprietà fisiche quali rigidità, capacità termica e coefficiente di dilatazione termica.

Per ottenere la reticolazione della resina, essa deve essere addizionata con un indurente, costituito dal gruppo amminico  $-NH_2$ , che funziona da catalizzatore della reazione chimica. Il gruppo amminico apre il gruppo epossidico dando luogo alla reazione di polimerizzazione. Il fenomeno di solidificazione di queste resine è complesso: la reazione di reticolazione (curing), può avvenire a caldo e a freddo ma con tempi più lunghi. L'indurimento si compone di una fase di gelazione in cui la resina non riesce a fluire o cambiare forma senza rompere alcuni legami, e una fase di vetrificazione.

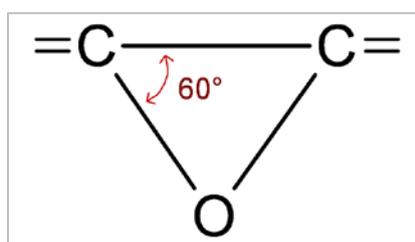


Fig. 2.7 Gruppo epossidico

Le resine, hanno il vantaggio di poter essere trattate a temperature e pressioni non elevate e di possedere elevate caratteristiche meccaniche. Inoltre la resistenza chimica ai solventi e all'umidità è di gran lunga superiore alle altre resine termoindurenti. Durante la reticolazione non lasciano sottoprodotti di reazione comportando quindi un basso ritiro, inferiore al 2%. Purtroppo a causa dell'elevato grado di reticolazione sono fragili, con bassa tenacità a frattura e la tendenza all'assorbimento di piccole quantità di acqua che comporta un calo delle caratteristiche meccaniche. Inoltre le resine epossidiche sono uno dei pochi adesivi utilizzabili con i metalli.

Gli adesivi a base poliuretanica, invece, fanno parte della categoria degli adesivi strutturali. Questi, sono in grado di attivarsi a temperatura ambiente grazie all'umidità dell'aria. La gran parte dei poliuretani a singolo componente si basa su un polimero che termina con un gruppo isocianatico che viene catalizzato con un sale o con un'ammina terziaria. La loro peculiarità è quella di formare legami forti con elevata resistenza al peel, misura della forza di legame, presentano una buona flessibilità, resistenza ad attacchi chimici e all'abrasione. Rispetto ad altri adesivi non mostrano ottima risposta alle elevate temperature specialmente se superiori dei 120 °C.

Nelle diverse fasi di sperimentazione sono stati utilizzate 2 tipologie di resine epossidiche bicomponente con caratteristiche diverse, un adesivo a base poliuretanica e un particolare polimero a base d'acqua.

### 2.2.3.1 IPN (INTERPENETRATED POLYMER NETWORK)

Il sistema IPN è un prodotto bicomponente, a base acqua, costituito da due resine supportate su una matrice inorganica, microcristallina, tixotropica. Nella fase di polimerizzazione si crea un reticolo interpenetrato rinforzato da microcristalli della fase inorganica, che conferisce alla matrice elevate proprietà meccaniche e resistenza termica. Il sistema è formato da due componenti, A e B, con rapporto di catalisi 0,5:1. La bassa viscosità ne permette l'applicazione a pennello o rullo.

Questo adesivo può essere utilizzato direttamente su supporti di calcestruzzo, di muratura, in legno, opportunamente preparati. Il grigliato si è dimostrato idoneo per l'utilizzo di questo sistema con una preventiva lavorazione delle superfici.

Tra le caratteristiche principali si annoverano la resistenza all'ambiente alcalino, al fuoco e resistenza termica superiore a 150°C.

Caratteristiche del sistema IPN:

- Ecologico: prodotto a base acqua, privo di solventi o monomeri volatili, tutti i componenti del sistema sono di uso tradizionale in edilizia.
- Compatibile: compatibile con le malte e gli ambienti alcalini, presenta una elevata adesione ai supporti a base cemento, calcestruzzo, calce e legno.
- Chimicamente inerte: il sistema non modifica chimicamente le fibre con cui viene a contatto, presenta un ph neutro e un'elevata adesione alle fibre di qualsiasi natura (carbonio, vetro, aramide, polimeri a cristalli liquidi, policondensati, poliarilati).
- Termoresistente: non presenta alcuna fusione o transizione del secondo ordine (tg), termicamente inerte oltre la temperatura di decomposizione di malte e calcestruzzi, non brucia.
- Struttura microporosa: traspirabile, permeabile al vapore d'acqua con un basso assorbimento d'acqua.
- Elevate proprietà meccaniche: le prove di trazione dimostrano una resistenza meccanica del rinforzo impregnato pari all'80 % di quella dello stesso composito impregnato con resina epossidica.
- Elevata energia di deformazione: in combinazione con matrici cementizie o a base calce cambia completamente il quadro fessurativo della malta, con sviluppo di elevate deformazioni a rottura ed elevato assorbimento di energia, senza distacco della malta dal rinforzo.
- Tempo di maturazione: 28 giorni.

Proprietà meccaniche	IPN
Adesione al calcestruzzo	$\geq 3 \text{ N/mm}^2$
Resistenza a flessione	$\geq 5 \text{ N/mm}^2$
Deformazione a rottura	$\geq 1,2\%$
Modulo elastico a flessione	50
Assorbimento acqua	$\geq 1\%$

Figura 2-21 Caratteristiche meccaniche IPN

### 2.2.3.2 RESINA EPOSSIDICA RC02

La resina epossidica RC02 è un adesivo strutturale liquido bicomponente, esente da solventi, a media viscosità; possiede ottime proprietà meccaniche. Resina con funzione adesiva ed impregnante, ottimizzata per l'applicazione dei nastri o dei tessuti nei rinforzi esterni.

Tale adesivo garantisce un incollaggio efficace perché possiede un'ottima adesione a tutti i materiali da costruzione (c.l.s, acciaio, laterizio) sia in condizioni di asciutto che di umido. La reazione fra i due componenti, resina ed indurente, avviene per poliaddizione ovvero senza la formazione di prodotti secondari determinando un indurimento senza ritiro. Il dosaggio del componente A e del componente B deve essere eseguito in modo molto preciso nelle proporzioni indicate, per pesata, con un rapporto 2:1. Le quantità di resina da preparare devono essere commisurate al lavoro da eseguire nei tempi di gel della resina (30 min. a 20-25°C). Per le stagioni estiva e invernale è prevista la fornitura di un induritore (componente B) rispettivamente ritardato o accelerato. L'applicazione dell'adesivo può essere eseguita a pennello o rullo.

Caratteristiche della resina epossidica:

- Elevate proprietà meccaniche (resistenza a compressione e a trazione).
- Basso modulo elastico.
- Completa irreversibilità della reazione di indurimento e quindi stabilità e resistenza all'invecchiamento del prodotto indurito.
- Elevata resistenza chimica nei confronti di soluzioni acide e basiche e di inquinanti gassosi.
- Proprietà meccaniche elevate dopo poche ore dall'applicazione.

- Confezioni predosate, pronte all'uso.
- Tempo di maturazione: 4-5 giorni.

Proprietà meccaniche	RESINA EPOSSIDICA
Adesione al calcestruzzo	$> 3 \text{ N/mm}^2$
Resistenza a trazione	$> 35 \text{ N/mm}^2$
Modulo a trazione	$> 2500 \text{ N/mm}^2$
Allungamento a trazione	$> 2,8\%$
Resistenza a flessione	$> 45 \text{ N/mm}^2$
Modulo a flessione	$> 2000 \text{ N/mm}^2$
Resistenza a taglio	$> 25 \text{ N/mm}^2$

Figura 2-22 Caratteristiche meccaniche resina epossidica

### 2.2.3.3 RESINA EPOSSIDICA BIRE SIN

Nel presente studio, è stata utilizzata il prodotto Biresin® cr82 e Biresin® ch80, resina epossidica bicomponente adatta per la stesura manuale e per diversi settori d'impiego, dalla nautica all'industria dei compositi.

Si tratta di due elementi costituenti con funzione rispettivamente di matrice e di rinforzo, opportunamente mescolati secondo proporzioni stabilite dalla scheda tecnica del prodotto. Il risultato è un polimero lineare e reticolato. Il basso peso molecolare delle resine epossidiche non indurite e allo stato liquido conferisce mobilità permettendo di bagnare qualsiasi materia. Si riportano di seguito le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche del materiale.

Physical Data		Resin (A)		Hardener (B)		
Individual Components		Biresin® CR82	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10
Mixing Ratio, parts by	Weight	100	27			
Mixing Ratio, parts by	Volume		32	31	32	32
Colour		translucent	colourless to yellow	colourless to yellow or blue		colourless to yellow
Viscosity, 25°C	mPa.s	~1,600	~50	~45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1.11	0.95	0.99	0.95	0.95
		<b>Mixture</b>				
Potlife, 100 g / RT, approx. values	min		50	80	220	330
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s		850	600	400	390

Figura 2-23 Caratteristiche fisico-chimiche della resina epossidica per la sperimentazione

Typical Mechanical Properties of Fully Cured Neat Resin (source: Sika internal)						
Biresin® CR82 resin (A)	with hardener (B) Biresin®		CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Tensile strength	ISO 527	MPa	94	90	84	82
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	3,000	3,000	2,900	2,900
Elongation at break	ISO 527	%	4.9	5.6	6.4	6.2
Flexural strength	ISO 178	MPa	140	130	127	118
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,300	3,200	2,900	2,800
Compressive strength	ISO 604	MPa	120	105	110	110
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.14	1.14	1.14	1.14
Shore hardness	ISO 868	-	D 85	D 85	D 85	D 85
Impact resistance	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	38	66	55	56

Figura 2-24 Caratteristiche fisico-chimiche della resina epossidica per la sperimentazione

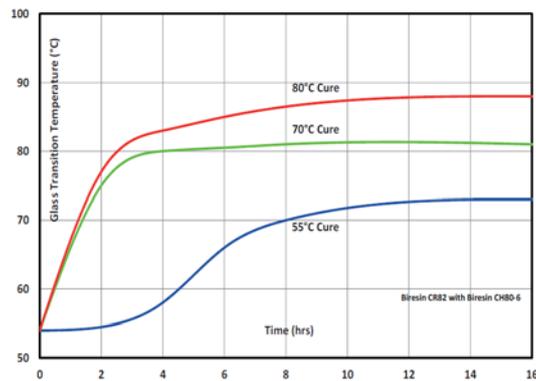


Figura 2-25 Grafico della temperatura transizione vetrosa

#### 2.2.3.4 ADESIVO A BASE DI POLIURETANO SIKAFLEX

Gli adesivi a base poliuretano fanno parte della categoria degli adesivi strutturali. Questi, sono in grado di attivarsi a temperatura ambiente grazie all'umidità dell'aria. La gran parte dei poliuretani a singolo componente si basa su un polimero che termina con un gruppo isocianatico che viene catalizzato con un sale o con un'ammina terziaria. La loro peculiarità è quella di formare legami forti con elevata resistenza al peel, misura della forza di legame, presentano una buona flessibilità, resistenza ad attacchi chimici e all'abrasione. Rispetto ad altri adesivi non mostrano ottima risposta alle elevate temperature specialmente se superiori dei 120 °C.

Il prodotto utilizzato è Sikaflex 298-FC, sigillante universale idoneo per la maggior parte delle applicazioni di sigillatura nella realizzazione industriale di veicoli commerciali.

Si tratta di un sigillante monocomponente basato sulla tecnologia dei polimeri a terminazione silanica esente da isocianati e solventi, da silicone e PVC. Il processo di indurimento avviene per esposizione all'umidità atmosferica con rapida formazione di pellicola superficiale. Alle basse temperature la percentuale acquosa dell'aria essendo inferiore rallenta il processo di indurimento. Durante la fase la reazione chimica che porta alla formazione di una catena polimerica, detta anche

fase di polimerizzazione, si verifica un ritiro del 3 %. La temperatura di transizione vetrosa  $T_G$  è pari a  $-50\text{ }^\circ\text{C}$ .

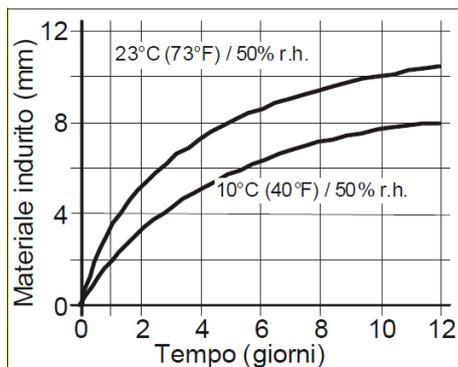


Figura 2-26 Velocità di indurimento

Il prodotto è caratterizzato da buone proprietà di sigillatura sia per interni che per esterni e per i materiali comunemente utilizzati nell'industria dei veicoli commerciali, come ad esempio metalli, ABS, PC, vetroresina e legno. Prodotto resistente all'acqua, all'acqua di mare, ad agenti di pulizia acquosi; resistente nel breve periodo a carburanti, oli minerali,

grassi ed oli vegetali e animali; non resistente agli acidi organici, acidi minerali concentrati, soluzioni caustiche o solventi. Le suddette informazioni sono di carattere generale.

Base chimica		Polimero a terminazione silanica
Colore (CQP <sup>1</sup> 001-1)		Bianco, grigio chiaro, nero
Meccanismo di indurimento		Umidità atmosferica
Densità (non polimerizzato)	dipende dal colore	1.48 kg/l
Proprietà di non scorrimento (tixotropia)		Buone
Temperatura di applicazione	ambiente	5 – 40 °C
Tempo di fuori polvere <sup>2)</sup> (CQP 019-1)		25 min
Tempo aperto <sup>2)</sup> (CQP 526-1)		20 min
Velocità di indurimento (CQP 049-1)		vedi diagramma 1
Ritiro volumetrico (CQP 014-1)		3 %
Durezza Shore A (CQP 023-1 / ISO 868)		25
Resistenza a trazione (CQP 036-1 / ISO 37)		1.1 MPa
Allungamento a rottura (CQP 036-1 / ISO 37)		300 %
Resistenza alla lacerazione (CQP 045-1 / ISO 34)		5.0 N/mm
Temperatura di transizione vetrosa (CQP 509-1 / ISO 4663)		-50 °C
Temperatura di servizio (CQP 513-1)		90 °C
	4 ore	120 °C
Stabilità (stoccato a T < +25°C) (CQP 016-1)	cartuccia/unipack	12 mesi
	Fustino/fusto	9 mesi

<sup>1)</sup> CQP = Corporate Quality Procedure

<sup>2)</sup> 23°C / 50% u.r.

Figura 2-27 Caratteristiche fisico-chimiche dell'adesivo poliuretano per la sperimentazione

<sup>1)</sup> Claudio Badini, *Materiali compositi per l'ingegneria* (Torino: CELID, 2003).

## 3 ATTIVITA' DI LABORATORIO

Data l'importanza di conoscere le caratteristiche meccaniche dell'impalcato sandwich proposto, il fine principale del lavoro sperimentale condotto in questa tesi è quello di evidenziare l'incremento di rigidità e la limitazione flessionale che l'accoppiamento del grigliato con i pannelli multistrato di legno può manifestare.

Nelle prove sperimentali effettuate in laboratorio sono state testate diverse configurazioni sia in termini di discontinuità all'interno del grigliato stampato sia in funzione dei differenti adesivi utilizzati. Per completare il lavoro sono state anche testate configurazioni del sandwich con un core strutturale costituito da un materiale meno performante del grigliato in PRFV.

In tutto sono state svolte 4 campagne di test presso il Laboratorio LISG sito in via Terracini 28. Il laboratorio e il personale di supporto hanno costituito un supporto essenziale per la messa a punto dei test sperimentali sia in termini di know-how che di strumentazione.

### 3.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per effettuare le prove si è dovuta definire la configurazione della macchina di prova e la dimensione standard dei provini. Sono stati utilizzati due diversi banchi di prova, il primo dotato di un pistone a controllo di carico, il secondo, invece, munito di una cella di carico a controllo di spostamento. Per acquisire ed analizzare i dati durante le prove sono stati utilizzati estensimetri lineari, estensimetri bidirezionali, trasduttori di spostamento magnetici, e una fotocamera digitale per la correlazione dell'immagine (DIC).

#### 3.1.1 PROVA DI CARICO A QUATTRO COLTELLI

Per le prove a flessione su impalcati di legno è uso comune effettuare prove di carico a quattro punti. L'applicazione del carico in due punti equidistanti dall'appoggio consente di ottenere una zona centrale soggetta a momento costante e taglio nullo.

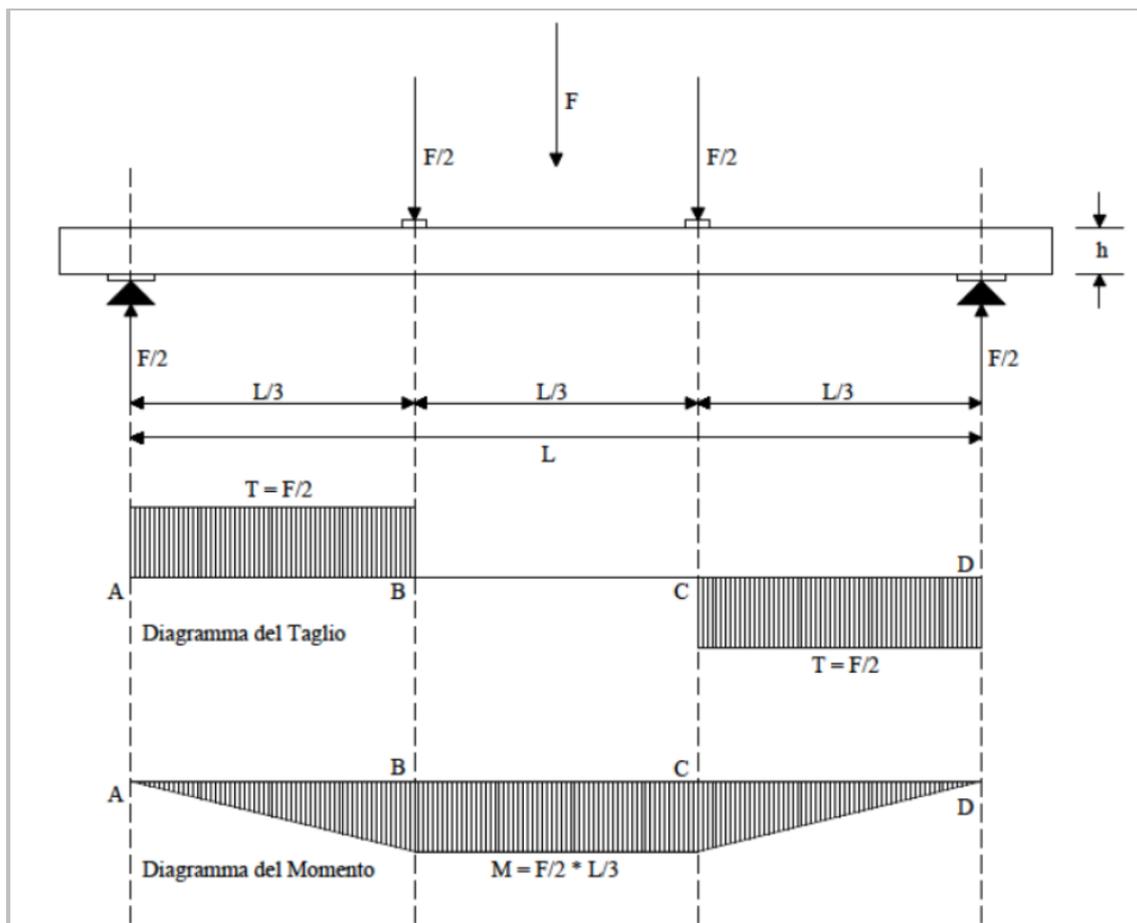


Figura 3-1 Schema generale della Prova a Flessione a quattro punti

Uno schema così concepito permette di minimizzare gli effetti dovuti alla sollecitazione tagliante lì dove il momento raggiunge i suoi massimi valori, per meglio valutare le caratteristiche resistenti a flessione. Il particolare stato di sollecitazione indotto ai provini testati ha anche permesso di effettuare prove su configurazioni particolari dell'impalcato sandwich che presentassero delle discontinuità verticali in uno o più strati costituenti la sezione resistente.

Attraverso la prova a flessione si possono ricavare le seguenti caratteristiche meccaniche:

- Modulo elastico locale a flessione;
- Modulo elastico globale a flessione;
- Resistenza a flessione parallela alle fibre;
- Modulo di taglio (metodo Flessionale).

Per la realizzazione della prova di carico a flessione è stata studiata una configurazione della macchina di prova tale da testare un elemento di dimensioni 1220x300 mm, con interasse tra gli appoggi di 1000 mm. Tale scelta è stata effettuata al fine di ottenere una condizione prossima a quella

ipotizzata nelle configurazioni di posa, in cui le travi lignee, su cui poggia l'impalcato, abbiano luce pari a 1000 mm.

Il carico è impartito da una pressa attraverso un ripartitore e due coltelli di carico posizionati simmetricamente a 350 mm dagli appoggi (Figura 3-2).

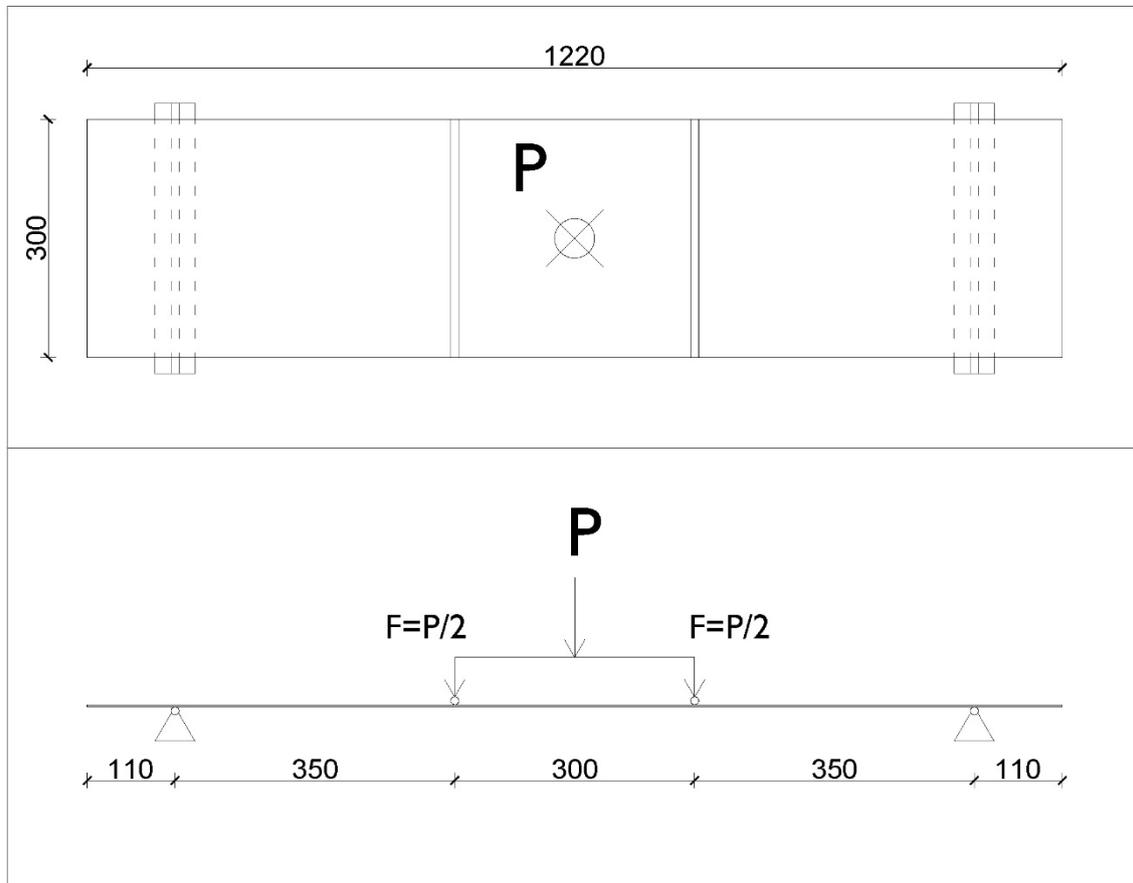


Figura 3-2 Schema di carico della prova a 4 coltelli messa in opera

Nelle diverse fasi sperimentali si sono utilizzati due diversi banchi di prova. Un telaio prova travi equipaggiato con un pistone idraulico a controllo manuale di marca Losenhausenwerk con portata massima di 200 kN e una escursione verticale di 250 mm. Su questo banco prova sono state effettuate le prime due fasi della sperimentazione che hanno necessitato di maggiore spazio per accogliere la strumentazione digitale. Data la limitazione dovuta al controllo manuale si sono potute eseguire prove monotone e cicliche quasi statiche. Il secondo banco prova, utilizzato nella terza fase di sperimentazione, è equipaggiato con un pistone azionato da un attuatore idraulico servocontrollato di marca MTS con portata massima di 500 kN ed una escursione verticale di 500 mm. Grazie al controllo automatico sono state eseguite prove monotone e cicliche quasi statiche a controllo di spostamento ma è stato possibile effettuare anche prove dinamiche cicliche (test di fatica). Le diverse caratteristiche delle apparecchiature hanno consentito di testare a fondo le proprietà dei provini nelle

diverse configurazioni garantendo sempre un appropriato rapporto tra la scala di misurazione e le grandezze da misurare.

### 3.1.2 ESTENSIMETRI

L'estensimetro, detto comunemente strain gauge, è uno strumento atto a rilevare le deformazioni meccaniche di elementi sottoposti a carichi statici o dinamici trasformandole in variazioni di resistività. È costituito da un supporto isolante di carta o resina sintetica su cui è posta una serpentina metallica o un semiconduttore. Il filamento metallico, che può essere fra gli altri di platino, nichel, nichel-cromo, costantana, ha un diametro molto piccolo, nell'ordine del centesimo di millimetro, e la base su cui poggia può andare da pochi millimetri, per gli estensimetri stampati, a qualche centimetro. Gli estensimetri a semiconduttore, per esempio al silicio, hanno una sensibilità molto più elevata fornendo un segnale molto più forte a parità di superficie utile. Questo fa sì che il trasduttore possa avere dimensioni contenute nell'ordine del mezzo millimetro ma li rende al contempo molto sensibili alla variazione di temperatura e di difficile manipolazione a causa delle dimensioni ridottissime.

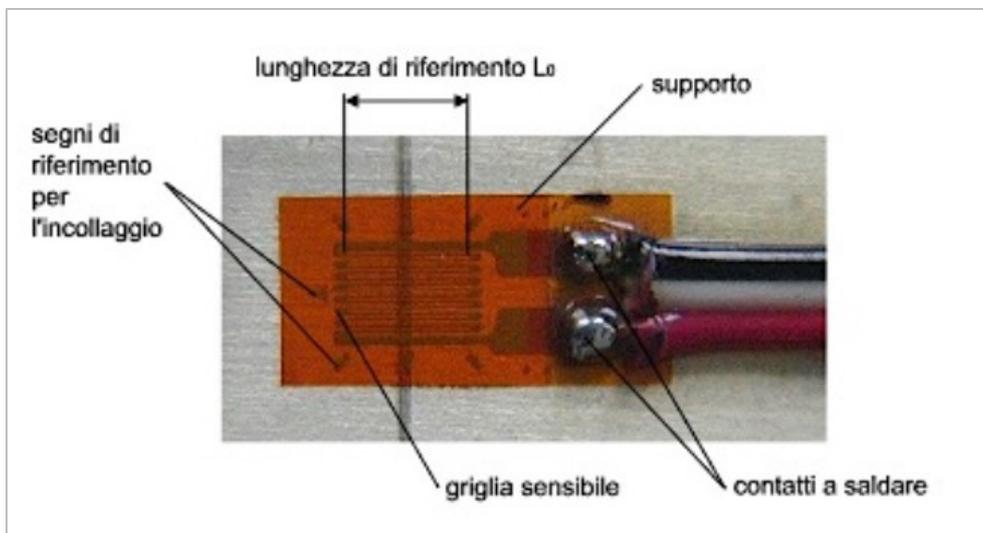


Figura 3-3 Componenti e caratteristiche di un estensimetro

L'applicazione dell'estensimetro alla struttura avviene mediante una speciale procedura d'incollaggio atta a garantire la perfetta aderenza delle due superfici evitando scorrimenti relativi. In questo modo le deformazioni nell'elemento equipaggiato sono seguite esattamente dal trasduttore garantendo una misurazione corretta. Caricando la struttura, il filamento metallico subisce alterazioni

di geometria, allungamento o accorciamento e riduzione o aumento della sezione con conseguente variazione di resistività. L'allungamento è pari a:

$$\Delta l = \frac{1}{E} \frac{F}{S} l$$

dove E è il modulo elastico, F è la forza agente, S la sezione ed l la lunghezza del tratto di filo.

La variazione di sezione è data invece da:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta l}{l}$$

dove  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

Come noto, la resistenza è proporzionale alla lunghezza l del filo ed inversamente proporzionale alla sezione S del conduttore mentre  $\rho$  è la resistività, caratteristica del materiale e significativamente dipendente dalla temperatura.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Il differenziale della resistenza vale:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

che trascurando momentaneamente il termine con la resistività e sostituendo da sopra diventa:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + 2\nu \frac{\Delta l}{l} = (1 + 2\nu) \frac{dl}{l} = K \frac{dl}{l}$$

avendo introdotto K, detta costante di taratura o "gauge factor", parametro indicante la sensibilità dell'estensimetro.

Tipo di lega	Composizione (%)	Gauge Factor (K)
Costantana	45Ni, 55Cu	2,0
Karma	74Ni, 20 Cr, 3Fe, 3Al	2,1
Platino Tungsteno	92Pt, 8W	4,0
Nicromo	80Ni, 20Cr	2,0
Nichel	100Ni	12,0

Tabella 3-1 Principali leghe utilizzate per la realizzazione di estensimetri e loro caratteristiche

Gli estensimetri, che sono alimentati con una corrente di bassa intensità variabile dai 15 ai 100 mA per evitare deformazioni termiche dovute all'auto riscaldamento, sono tipicamente disposti su un circuito a ponte utilizzato per la misura della variazione di resistenza. Si fa notare in conclusione, che per costruzione stessa dello strumento, non è possibile conoscere puntualmente i valori di deformazione della struttura, ma se ne ritrova il valore medio nella zona delimitata dalla base. Per questo motivo è essenziale l'impiego di estensimetri di dimensioni ridotte per tutte quelle applicazioni in cui è necessario stimare con puntualità i valori di deformazione della struttura.

In questa sperimentazione sono stati utilizzati due tipi di estensimetri (Figura 3-4):

- 4 estensimetri lineari FLA-3-11 in grado di valutare le deformazioni in un'unica direzione
- 3 rosette FCA-3-11 composte da due estensimetri ortogonali tra loro e in grado di valutare le deformazioni lungo due direzioni

TYPE	<b>FLA-3-11</b>		TEST CONDITION	23°C 50%RH
LOT NO.	<b>A51551A</b>	BATCH NO. <b>KJ25K</b>	GAUGE FACTOR	
GAUGE LENGTH	<b>3</b>	mm	<b>2.10</b>	<b>±1 %</b>
GAUGE RESISTANCE	<b>120±0.3</b>	Ω	TEMP. COMPENSATION FOR	<b>11</b> ×10 <sup>-5</sup> /°C
QUANTITY	<b>10</b>		TRANSVERSE SENSITIVITY	<b>0.1</b> %

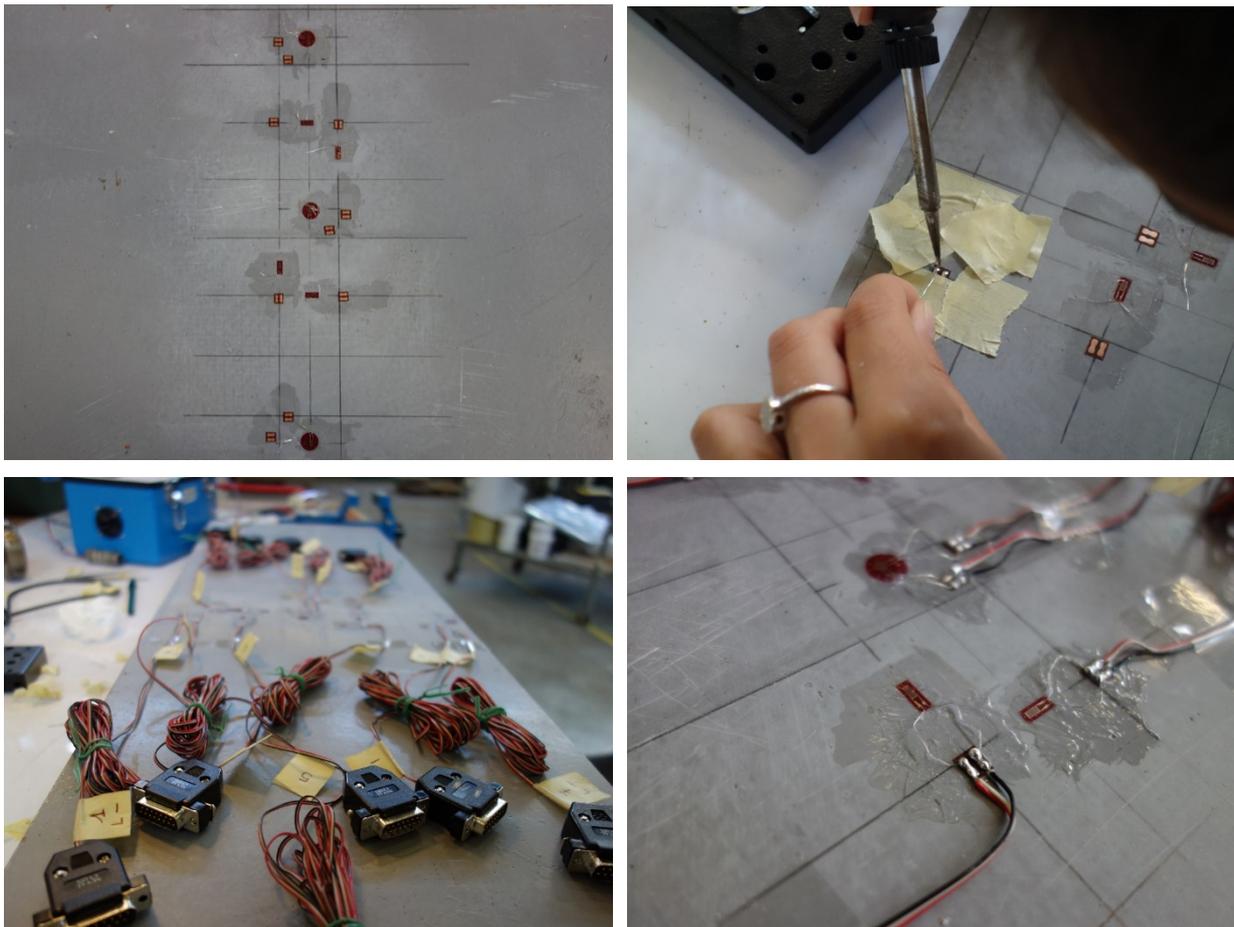
TYPE	<b>FCA-3-11</b>		TEST CONDITION	23°C 50%RH
LOT NO.	<b>A60152A</b>	BATCH NO. <b>LL07K</b>	GAUGE FACTOR	
GAUGE LENGTH	<b>3</b>	mm	<b>1=2.12 2=2.12</b>	<b>±1 %</b>
GAUGE RESISTANCE	<b>120±0.5</b>	Ω	TEMP. COMPENSATION FOR	<b>11</b> ×10 <sup>-5</sup> /°C
QUANTITY	<b>10</b>		TRANSVERSE SENSITIVITY	<b>0.2</b> %

Figura 3-4 Caratteristiche degli estensimetri utilizzati nelle prove

Tali estensimetri sono stati applicati all'intradosso di uno dei provini e l'acquisizione dei dati provenienti da questi trasduttori è stata utile per la validazione delle curve di deformazione e

spostamento calcolate mediante la tecnica di correlazione di immagini digitali (DIC), principale strumento di rilevazione durante le prove sperimentali oggetto di questa tesi.

Per il corretto posizionamento degli estensimetri al fine di caratterizzare il comportamento dei provini esaminati, è stato necessario riprodurre la maglia presente all'interno del grigliato sull'intradosso del provino. La superficie è stata levigata con carta vetrata e pulita con alcol isopropilico e, avendo cura di non maneggiarli direttamente con le mani, gli estensimetri sono stati pre-posizionati con l'aiuto di un particolare nastro adesivo.



*Figura 3-5 Incollaggio e preparazione degli estensimetri*

Per l'incollaggio è stato utilizzato un adesivo epossidico. Tale operazione è stata fatta sempre avendo cura di non compromettere il funzionamento dell'estensimetro evitando il contatto diretto. Allo stesso modo sono state incollate le basette che permetteranno il collegamento degli estensimetri ai cavi per mezzo della stagnatura.

Avendo cura di proteggere gli estensimetri è stata quindi realizzata la base di stagno per il collegamento dei cavi con connettori per il collegamento ai sistemi di acquisizione. Prima di

effettuare il collegamento alla macchina di rilevazione dei dati gli estensimetri sono stati numerati in modo univoco in modo da renderne possibile il riconoscimento.

Per precauzione, fino al momento di effettiva realizzazione della prova, è stato applicato un protettivo su estensimetri e relativi collegamenti (Figura 3-5).

### 3.1.3 TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO

Per determinare gli abbassamenti dell'elemento di prova, sono stati utilizzati dei trasduttori di spostamento WSF 2/50 a variazione di induttanza con portata di 50mm.

I trasduttori LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) sono dispositivi elettromagnetici usati per la misura di piccoli spostamenti lineari. La tensione è applicata all'avvolgimento primario A, e causa una corrente indotta nell'avvolgimento secondario B. I dispositivi sono alimentati e i dati da loro misurati sono acquisiti tramite un sistema di tecnologia National tipo SCXI, composto da centralina e terminale di acquisizione dati (Figura 3-6).

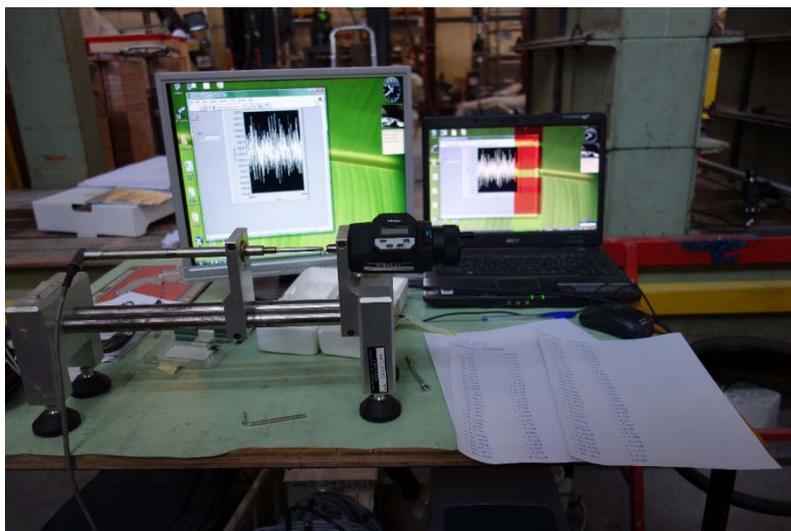


Figura 3-6 Calibrazione dei trasduttori di spostamento

Prima di posizionare i trasduttori è stato necessario eseguire la calibrazione di questi ultimi con apposita strumentazione. Sono stati rilevati i dati in uscita al variare dell'allungamento di ogni trasduttore con intervalli di 5 mm per due cicli consecutivi.

Il corretto funzionamento dello strumento per reale misurazione degli spostamenti dell'elemento caricato, prevede l'installazione dei trasduttori su basi magnetiche a bracci regolabili. Tali basi magnetiche sono state fissate alle guide laterali della pressa utilizzata per le prove e i bracci

regolati fino a trovare la giusta dislocazione dello strumento. La superficie di rilevazione dello spostamento è stata regolarizzata applicando dei vetrini normalizzati (Figura 3-7).



Figura 3-7 Installazione di un trasduttore con vetrino normalizzato

### 3.1.4 DIGITAL IMAGE CORRELATION

La tecnica di correlazione di immagini digitali si inserisce nell'ambito della più ampia Computer Vision, cioè dell'insieme di metodologie che riguardano l'estrapolazione, memorizzazione, elaborazione e presentazione di qualsiasi oggetto attraverso un sistema computerizzato. La DIC consente di determinare spostamenti e deformazioni mediante il confronto delle immagini del componente in esame, acquisite rispettivamente nello stato indeformato e, in seguito all'applicazione del carico, deformato.

Come accadeva nelle tecniche speckle<sup>1</sup>, il tutto può essere applicato al caso piano per la misura delle grandezze relative, ed al caso generale tridimensionale.

Per la sperimentazione oggetto di questa tesi è stata utilizzata la tecnica DIC 3D che utilizza per la digitalizzazione delle immagini acquisite il principio della Stereo Correlation. Tale approccio permette di ottenere informazioni tridimensionali su spostamenti e deformazioni, combinando una ripresa da più punti e un'elaborazione delle immagini che tiene conto dei dati provenienti da questi. In relazione ad un sistema di riferimento globale si cerca di misurare coordinate di punti relativi a

diverse configurazioni. A questo proposito si registrano immagini multiple del modello in esame ricavate da differenti punti di vista e quindi accoppiate con l'utilizzo di algoritmi.

Nel caso tridimensionale si utilizzano due telecamere in modo da osservare l'oggetto da due direzioni differenti (Figura 3-8); si ottiene così una visione binoculare simile a quella umana. La tecnica a correlazioni di immagini tridimensionale può essere applicata anche a superfici non piane che subiscono spostamenti fuori dal piano: essa dà informazioni riguardanti sia la forma del corpo, sia il campo di spostamenti in tre dimensioni.

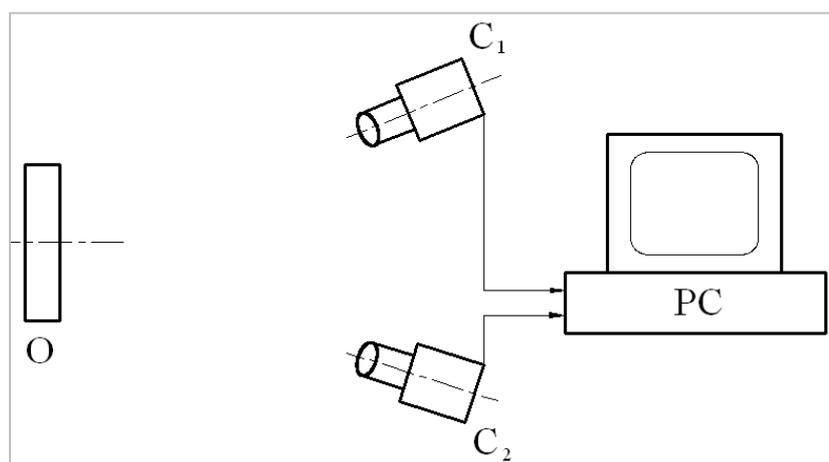


Figura 3-8 Principio stereoscopico alla base del funzionamento delle fotocamere DIC

Per ciò che riguarda la forma del corpo, si paragonano le sub-immagini corrispondenti riprese dalle due telecamere con il corpo in uno stato di riferimento che può essere, per esempio, quello indeformato, mentre per ciò che riguarda il campo degli spostamenti si paragonano le sub-immagini relative al corpo indeformato con quelle relative al corpo deformato.

Nella Stereo Correlation di norma si utilizzano sette sistemi di riferimento per la determinazione dei dati (Figura 3-10):

- un sistema di riferimento globale, XYZ, posto in genere in corrispondenza del provino,
- tre sistemi di riferimento per ciascuna telecamera,
  - $X_c Y_c Z_c$  ( $c = \text{camera}$ ), con origine nel centro della lente,
  - $X_i Y_i Z_i$  ( $i = \text{immagine}$ ) con origine nel centro del piano immagine, corrispondenti a  $X_c Y_c$ , ma spostate in direzione  $z$  di una lunghezza uguale alla distanza focale  $f$ ,
  - $X_s Y_s Z_s$  ( $s = \text{sensore}$ ) con origine in un angolo del piano immagine, corrispondenti a  $X_i Y_i$ , ma spostati, nelle direzioni  $x$  e  $y$ , di distanze uguali alle coordinate del centro del piano immagine.

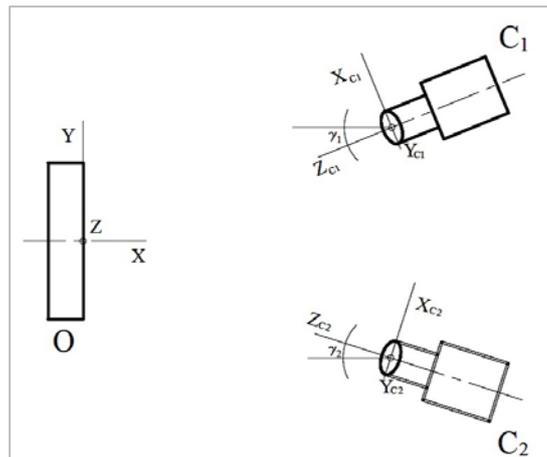


Figura 3-9 Sistemi di riferimento della DIC 3D

Le telecamere utilizzate permettono la rilevazione delle immagini ad alta velocità e, dal momento che questa è di solito più alta di quella di registrazione del PC, si abbinano a sistemi di circuiti integrati che permettono elevate velocità di immagazzinamento dati. Di solito vengono preferiti sensori allo stato solido, come quelli CCD (charge couple device), che garantiscono una buona accuratezza, piccoli ingombri, stabilità e insensibilità a variazioni di temperatura. Inoltre hanno lunga durata, consumano poco ed operano con potenze basse. Come rovescio della medaglia si potrebbe avere la nascita di frange moiré dovute all'interferenza tra i pixel del sensore e quelli del monitor.

Le caratteristiche delle telecamere dipendono da parametri intrinseci e da parametri estrinseci. I parametri intrinseci, che definiscono le caratteristiche proprie della telecamera, sono la distanza focale  $f$  della lente, le coordinate del centro dell'immagine ( $C_x$ ,  $C_y$ ), il fattore di dispersione della lente  $k$ , l'aspect ratio dei pixel,  $\lambda$ . I parametri estrinseci, che definiscono la posizione di ciascuna telecamera e quindi dipendono dalla particolare scelta della disposizione sperimentale, sono invece gli angoli  $\alpha$  di rotazione attorno all'asse  $Z_c$  (swing angle),  $\beta$  di rotazione attorno all'asse  $X_c$  (tilt angle) e  $\gamma$  di rotazione attorno all'asse  $Y_c$  (pan angle). Ugualmente estrinseche sono le coordinate  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  che definiscono la posizione del centro della lente della telecamera.

Nella letteratura tecnica e nei manuali che accompagnano le pratiche utilizzate nella meccanica sperimentale, sono reperibili le relazioni analitiche che legano le coordinate di un punto dell'oggetto ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) alle coordinate bidimensionali nel piano del sensore ( $X_s$ ,  $Y_s$ ). Si fa notare che l'utilizzo di una sola telecamera non consente di determinare le coordinate spaziali ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) di un punto  $P$  nel piano oggetto, perché ad un determinato punto nel piano immagine  $P_i$  corrispondono infinite posizioni del punto nello spazio e in particolare tutti i punti che si trovano sulla retta che

unisce il punto  $P_i$  al centro della lente. L'uso di due telecamere consente di eliminare tale ambiguità (Figura 3-9).

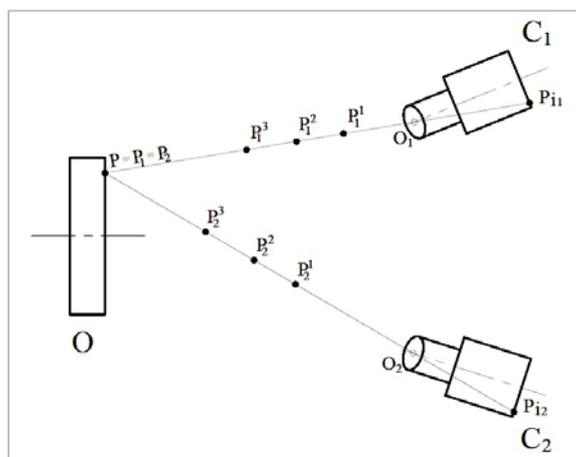


Figura 3-10 Principi stereometrici di funzionamento

La precisione della tecnica tridimensionale dipende dall'accuratezza con la quale sono determinati i parametri intrinseci ed estrinseci delle due telecamere. A tal fine si utilizzano dei reticoli di taratura aventi geometria nota con precisione, opportunamente disposti di fronte alle telecamere. Per le procedure di taratura si è fatto uso delle informazioni sperimentali contenute nella bibliografia specializzata e del manuale di impiego del sistema VIC 3D 2010 Correlated Solutions.<sup>2</sup>

### 3.1.5 INSTALLAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE

Sino ad ora si è discusso teoricamente circa i requisiti necessari e la strumentazione utile per lo svolgimento delle prove così come progettate, nonché dell'acquisizione dei dati provenienti dai differenti trasduttori e fotocamere. È ovvio che per arrivare alla creazione conforme prima e al salvataggio poi di questi dati è essenziale la corretta predisposizione di tutte le attrezzature coinvolte nella sequenza di prove.

Si comincia dalla disposizione dei due computer dedicati all'acquisizione dei segnali e dei fotogrammi, quindi vengono collegati i moduli per la gestione dei dati estensimetrici e i cavi provenienti dalla cella di carico e dagli lvdt, come pure viene stabilita la connessione tramite rete ethernet con le camere, una volta alimentati adeguatamente tutti gli apparati. Si pone un primo provino sugli appoggi costruiti appositamente per questa sperimentazione, si posizionano i coltelli di carico e la pressa, quindi si fanno diversi tentativi per disporre al meglio gli impianti di illuminazione

a disposizione. Questa fase è tanto semplice quanto importante poiché bisogna assicurare la miglior illuminazione possibile del pattern, come già sufficientemente discusso.

A questo punto è già possibile effettuare le prime verifiche preliminari sulla strumentazione installata. Una volta collegati gli estensimetri del campione e gli lvdt si può prendere visione dei diversi segnali in uscita per escludere errori nel cablaggio o anomalie rilevanti. Allo stesso modo, esaminando i fotogrammi provenienti dalle camere possono essere regolati più finemente i fasci luminosi per un'illuminazione intensa e nel contempo omogenea nel tratto di provino d'interesse, e di conseguenza configurati in remoto i tempi di esposizione delle camere.

---

### 3.1.6 ILLUMINAZIONE

---

Prima di ogni altra cosa è di fondamentale importanza riuscire a garantire un'illuminazione adeguata al metodo in esame per lo studio delle deformazioni nei provini. Questo è quasi sempre vero quando si adotta un approccio di misura senza contatto, ovvero quando si implementa un'analisi di tipo ottico, e il metodo DIC non si differenzia da questo. Per assicurare tale richiesta è necessario utilizzare della luce artificiale con la quale investire i provini e principalmente le aree soggette alla successiva analisi DIC, quindi quelle più centrali e lontane dagli appoggi.

Per evitare fluttuazioni nella luce, e dunque cercare di escludere differenze fra fotogrammi appartenenti alla stessa sequenza, è fondamentale avere un'illuminazione il più possibile uniforme ed intensa. Inoltre è utile evitare per quanto possibile il problema del surriscaldamento di zone d'aria prossime alla fonte luminosa con la conseguente creazione di flussi aerei tali da distorcere l'immagine inquadrata dalla fotocamera. Per queste ragioni sono state utilizzate potenti lampade a luce fredda schermate da teli bianchi per garantire una migliore diffusione del fascio luminoso (Figura 3-11).

Gli obiettivi dell'illuminazione artificiale prevista sono essenzialmente due, ovvero assicurare che il pattern di punti sul provino manifesti, una volta acquisito, una scala di grigi abbastanza ampia. Questo significa rendere lo sfondo sufficientemente chiaro (bianco) e i puntini scuri (neri) senza andare però in saturazione nelle aree oggetto di analisi DIC, ma anche garantire una luminosità per quanto possibile uniforme in queste stesse zone. Poiché, sebbene la matematica in uso nell'algoritmo di analisi DIC aiuti nel rendere quest'ultimo un requisito minore, è comunque bene prevedere un'illuminazione omogenea per il pattern che altrimenti, in seguito alle deformazioni, presenterà subset non solo traslati e deformati ma anche visibilmente differenti in luminosità.



Figura 3-11 Sistema di illuminazione adottato

### 3.1.7 CALIBRAZIONE DELLE CAMERE

Le due fotocamere sono risultate lo strumento di misura fondamentale per il tipo di analisi e per le prove effettuate. Grazie alle immagini acquisite mediante esse verranno calcolati spostamenti e deformazioni attraverso la tecnica DIC 3D. Risulta perciò evidente che una messa a fuoco più precisa, massimizzata da un approccio sistematico e a supporto del solo occhio umano, possa contribuire ad avere immagini più nitide e a non sfocare in maniera eccessiva e non controllata le immagini a seguito della sfocatura gaussiana imposta in fase di analisi dalla strumentazione. Questa possibilità è data dal poter visionare, e dunque valutare numericamente, in tempo pressoché reale i fotogrammi generati ed inviati al computer dedicato via ethernet dalla camera. Il seguente passo è quello della calibrazione della camera. Per realizzare questo passaggio è utile acquisire più immagini possibili di una griglia con caratteristiche note posta via via in posizione/assetto diverso (Figura 3-12). Giacché la calibrazione va effettuata per tutte e due le camere presenti sulla scena, viene effettuato uno scatto contemporaneo degli apparecchi.

La calibrazione è indispensabile per conoscere le distanze focali degli strumenti adoperati nella configurazione adottata, oltre che a stimare alcuni parametri quali le distorsioni. Per questo motivo è importante procedere alla realizzazione della stessa soltanto una volta fissate le fotocamere e messe a fuoco le inquadrature delle stesse.

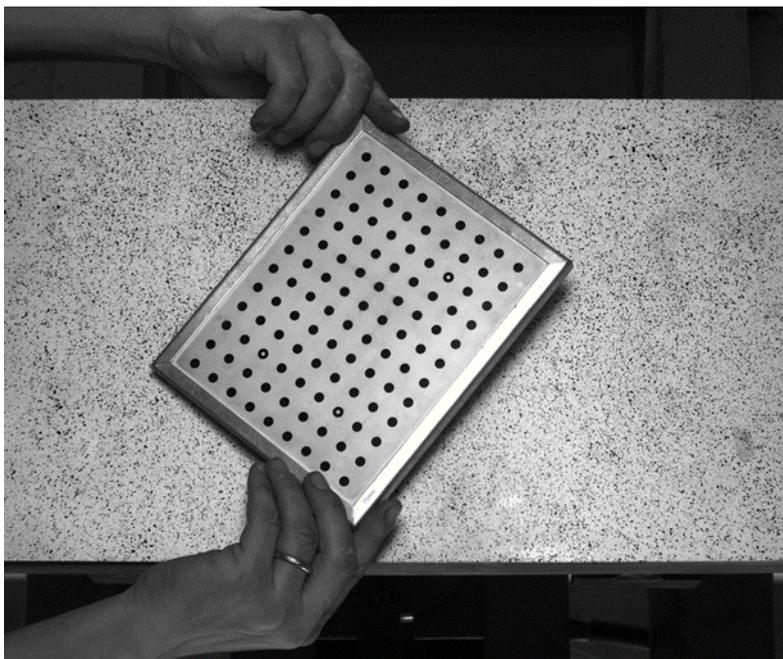


Figura 3-12 Griglia di calibrazione delle fotocamere DIC

Acquisita l'intera sequenza di scatti è necessario processare le immagini salvate, per questo scopo è stato utilizzato il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions.

Al termine dell'elaborazione dell'intera sequenza di scatti caricata, il software analizza i dati raccolti e quindi propone i risultati ottenuti. Questi sono molteplici, i più importanti sono le lunghezze focali e i coefficienti di distorsione.

Inoltre, vengono forniti dati come le coordinate del punto centrale, la stima delle incertezze per i risultati proposti e indicazioni su errori di misura ritrovati nei diversi scatti.

### 3.1.8 PATTERN

Per potere analizzare spostamenti e deformazioni attraverso il metodo DIC è necessario che la superficie del provino presenti una distribuzione casuale di grigi, come ad esempio un pattern di punti, che si modifichi unitamente a tale superficie in modo da veicolare il dato della deformazione una volta che il provino è sottoposto ad uno stato di sforzi diverso da quello originario. La scelta e l'implementazione di un pattern di punti efficace per ricoprire la superficie piana da misurare sono questioni di primaria rilevanza per assicurare una buona accuratezza del metodo DIC.

Il pattern, in taluni casi, può essere rappresentato dalla stessa texture superficiale del provino, ma questo non si verifica per le prove in esame. Per i provini in uso, dopo aver valutato attentamente le diverse opzioni, si è scelto di adottare una variante del metodo tradizionalmente più utilizzato per la generazione di pattern con queste caratteristiche, ovvero la verniciatura a spruzzo di tinte idonee.

Questa soluzione comporta indubbi vantaggi, primo fra tutti la possibilità di realizzare pattern anche su corpi tridimensionali interessati ad analisi DIC 3D come in questa sperimentazione, oltre che non necessitare di investimenti troppo ingenti né in tempo né in risorse finanziarie.

Passando in rassegna sinteticamente ma compiutamente le fasi per la preparazione superficiale dei provini, si è nell'ordine provveduto a carteggiare con apposita macchina levigatrice l'area intradossale degli stessi e dunque rimuovere le polveri formatesi in modo da garantire una successiva migliore adesione delle vernici.

Quindi si è distribuito un primo strato di smalto di colore bianco opaco sull'intera superficie trattata dei campioni. Questo serve da sfondo al pattern vero e proprio, riducendo le capacità di riflessione e nel contempo massimizzando il contrasto finale una volta creati i puntini. Si evidenzia che è necessario realizzare una copertura completa ed uniforme mantenendo però obbligatoriamente limitato lo spessore di vernice impiegata, pena la generazione di una patina non perfettamente aderente al provino durante la prova e dunque una misurazione errata di spostamenti e deformazioni. Per fare ciò è consigliata una verniciatura a spruzzo con un alto tenore d'aria unitamente a passate veloci su aree estese.



Figura 3-13 Fasi di generazione del pattern

Una volta asciugato questo primo strato di fondo bianco, si procede a creare il puntinato attraverso verniciatura a spruzzo mediante l'ausilio di una spazzola a setole grosse impregnata con un'idonea tintura colore nero.

Lasciando asciugare completamente anche questo strato di inchiostro si giunge ad un pattern consistente per misurazioni col metodo DIC. Come già accennato, il provino ora non è più riflettente e presenta una distribuzione di grigi casuale che si deforma unitamente al provino durante le successive prove (Figura 3-13).

### 3.1.9 VERIFICA DEL SISTEMA DIC

Prima di procedere con le successive fasi di sperimentazione, è stato testato un singolo provino costituito da un grigliato di dimensioni uguali a quelle dei provini utilizzati per le prove successive. Al suo intradosso sono stati applicati 7 estensimetri (4 di tipo lineare e 3 rosette). L'acquisizione dei dati provenienti da questi trasduttori è stata utile per la validazione delle curve di deformazione e spostamento calcolate mediante la tecnica di correlazione di immagini digitali (DIC) che verrà utilizzata in tutti i test seguenti.

Il posizionamento degli estensimetri in diverse parti del grigliato in seguito al tracciamento delle maglie di questo sulla superficie oggetto di indagine, è stato guidato dalla volontà di studiare nel dettaglio la deformazione del materiale e più precisamente di verificare se durante l'inflessione si manifestassero comportamenti diversi lungo le coste ed all'interno delle maglie (Figura 3-14).

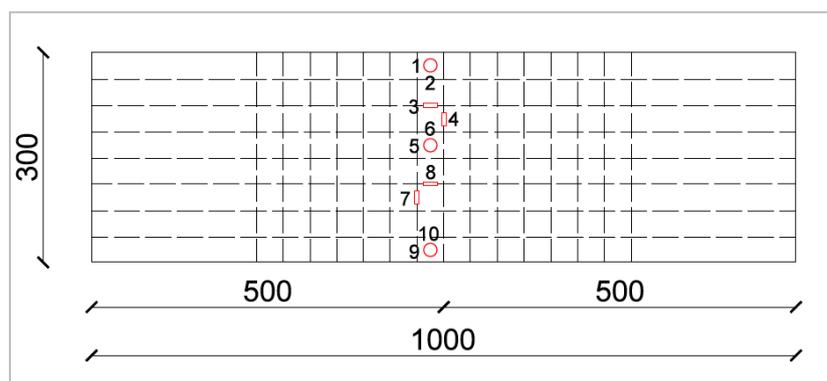


Figura 3-14 Schema di posizionamento degli estensimetri

Sono stati eseguiti tre cicli di carico. Il primo ciclo ha raggiunto 4,84 kN, il secondo 8,87 kN ed infine il provino è stato caricato fino a 36,79 kN. Le due strumentazioni hanno fornito gli stessi risultati e le deformazioni rilevate risultano sovrapponibili confrontando punti omologhi rilevati

mediante gli estensimetri (Figura 3-15) e attraverso il sistema digitale di correlazione delle immagini (Figura 3-16).

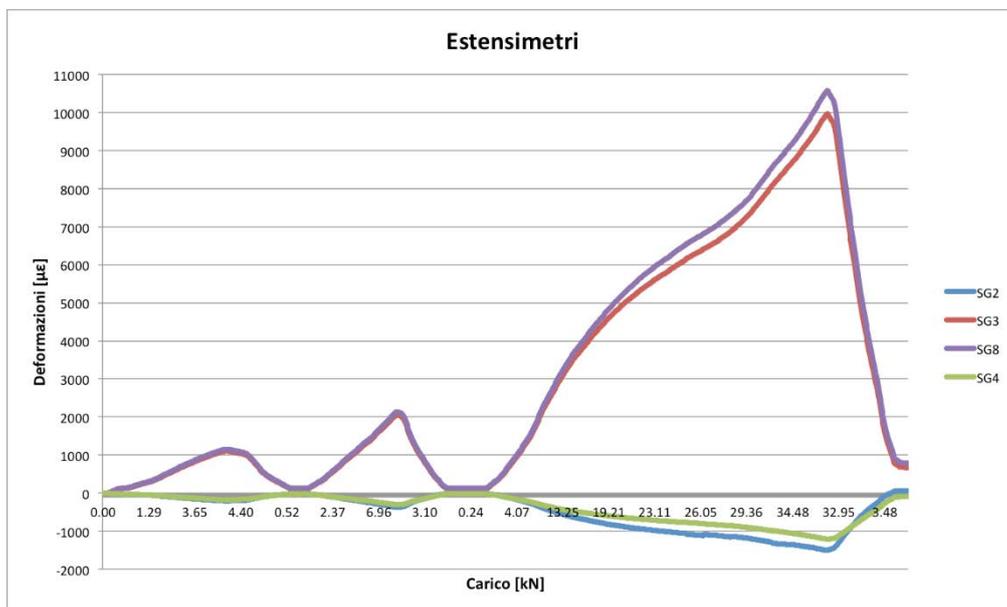


Figura 3-15 Grafico carico-deformazioni ottenuto dagli estensimetri

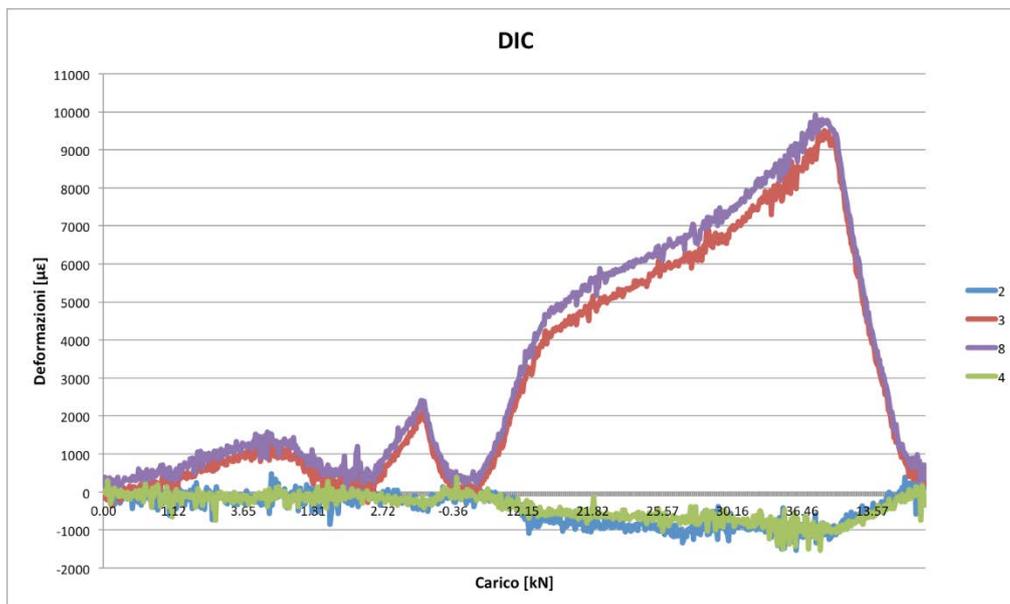


Figura 3-16 Grafico carico-deformazioni ottenuto dal sistema DIC

Analizzando i risultati ottenuti secondo le due direzioni principali di deformazione (longitudinale e trasversale) si è anche verificato il comportamento pressoché bidirezionale del grigliato. La maglia quadrata costituente il grigliato stampato non subisce pertanto effetti di bordo e i risultati confermano che il provino si deforma in modo uniforme e non presenta perciò punti di

debolezza localizzati. I grafici riportati rappresentano rispettivamente le deformazioni longitudinali (Figura 3-17) e trasversali (Figura 3-18).

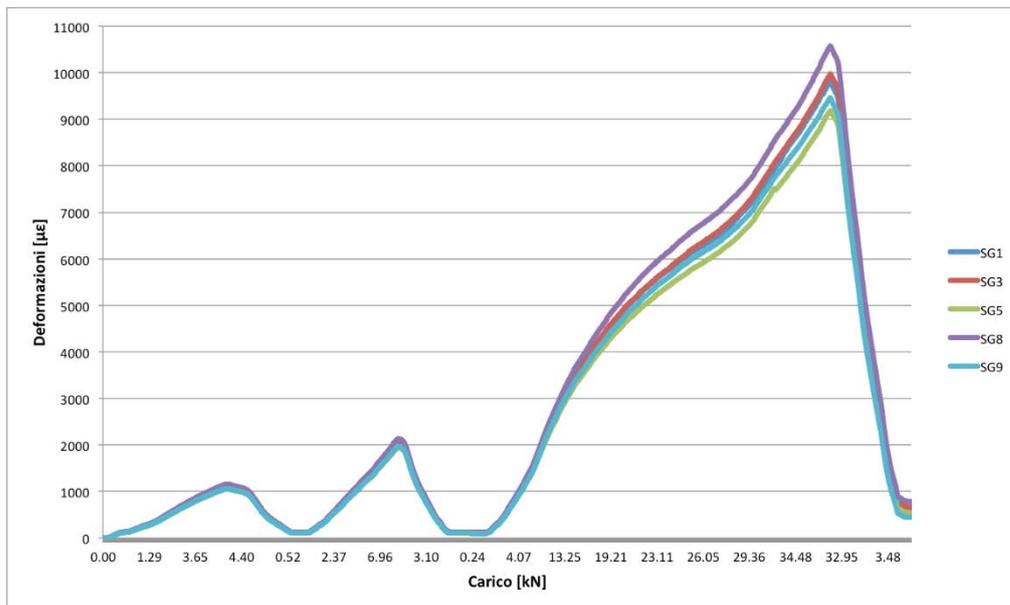


Figura 3-17 Grafico carico-deformazioni trasversali ottenuto dagli estensimetri

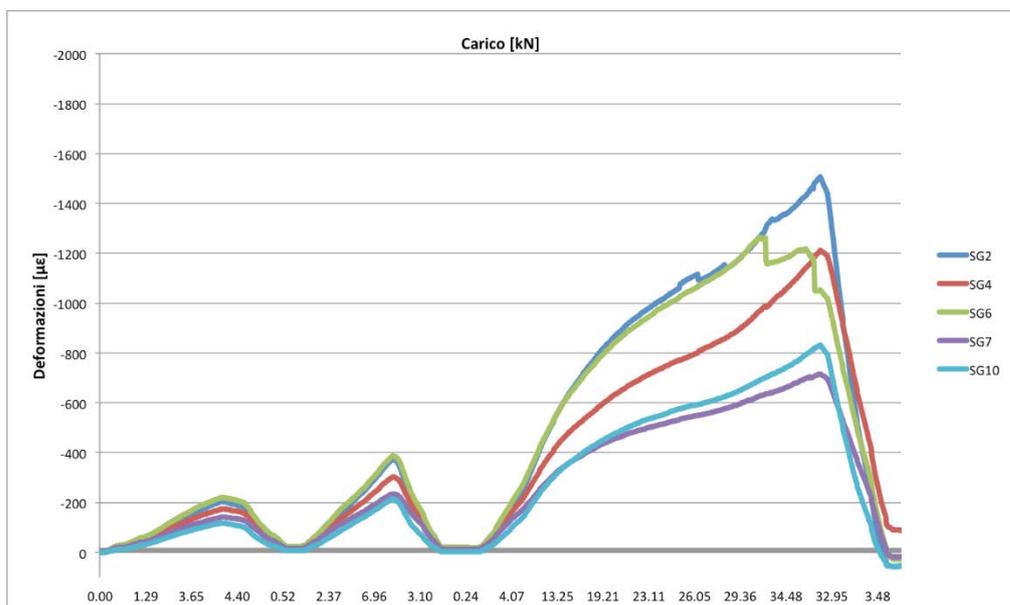


Figura 3-18 Grafico carico-deformazioni longitudinali ottenuto dagli estensimetri

## 3.2 I FASE DI SPERIMENTAZIONE

---

Uno dei fini principali del lavoro sperimentale condotto in questa prima fase è quello di evidenziare l'incremento di rigidità e la limitazione flessionale che l'accoppiamento del grigliato con i pannelli multistrato di legno può subire.

Altro obiettivo risiede invece nella scelta dell'incollaggio, si è deciso infatti di testare due tipologie diverse di adesivo corrispondenti a IPN, un adesivo ad acqua, e alla resina epossidica, su provini con le medesime caratteristiche. Inoltre si è scelto di effettuare sia delle prove monotone sia cicliche sui provini, in modo da definire il carico di rottura e la possibile presenza di residuo plastico nell'impalcato soggetto a cicli di carico-scarico.

### 3.2.1 CONFEZIONAMENTO PROVINI

---

Le prove definite corrispondono a dieci diverse configurazioni che differiscono nelle caratteristiche del provino. Le dimensioni sono sempre 1220x300 mm ma i vari layers componenti sono assemblati in modo da rappresentare il più ampio spettro possibile di combinazioni. Oltre a differenziarsi per le due tipologie di incollaggio da verificare (IPN e resina epossidica RC02), i provini sono stati confezionati per presentare all'interno del core strutturale diversi tipi di discontinuità (in mezzeria e all'appoggio) e sono stati sottoposti a diverse condizioni di carico (monotona e ciclica). Si riportano nelle immagini che seguono le diverse configurazioni testate (Figura 3-19, Figura 3-20, Figura 3-21).

I provini da confezionare presentavano caratteristiche diverse sia per la loro conformazione sia per il tipo di incollaggio scelto. Le fasi di preparazione sono state differenziate in base alla configurazione da realizzare. L'interfaccia, per scelta progettuale e su suggerimento del fornitore degli adesivi, è caratterizzata dalla presenza di una rete in fibra di vetro.

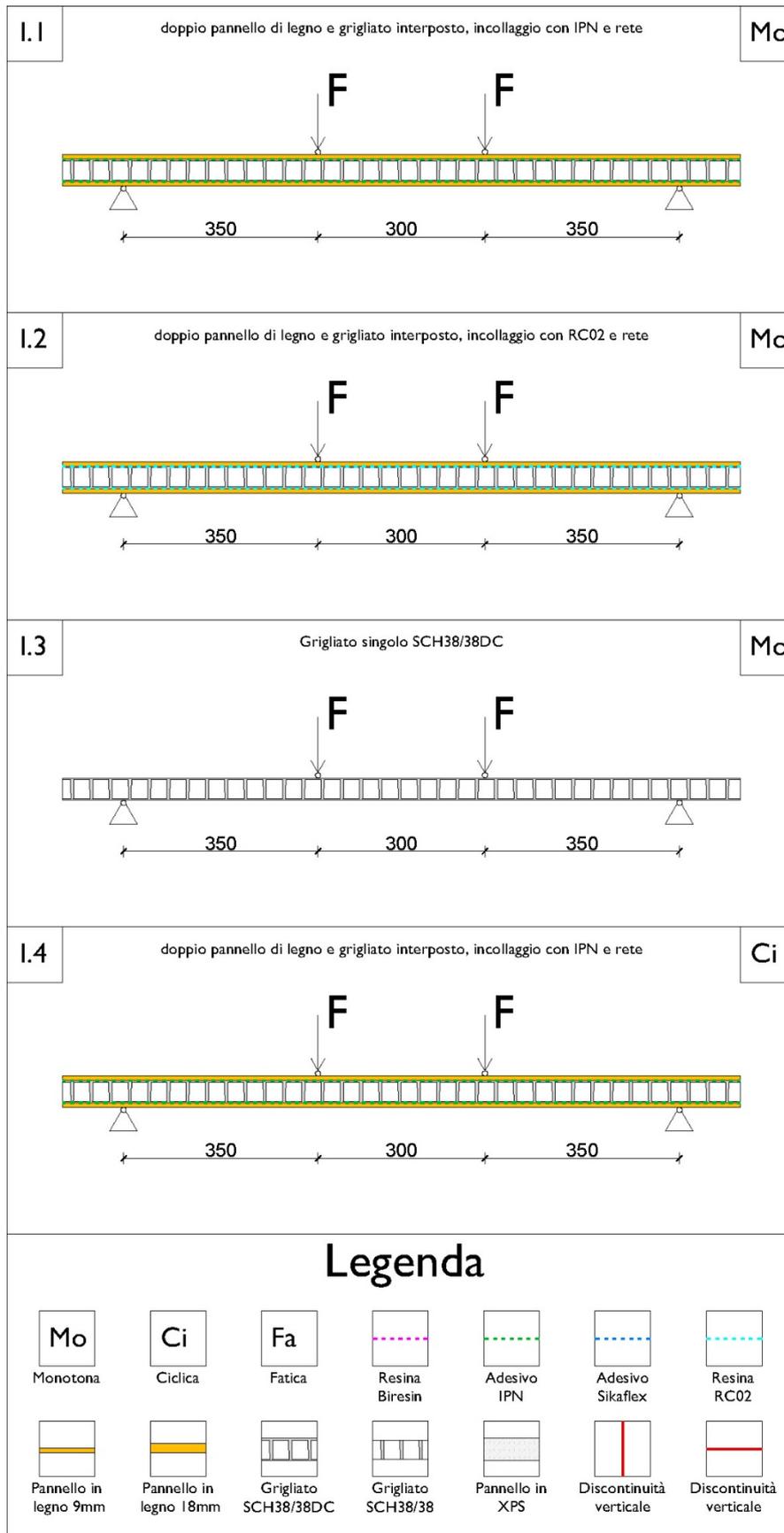


Figura 3-19 Configurazioni provini prima fase da I.1 a I.4

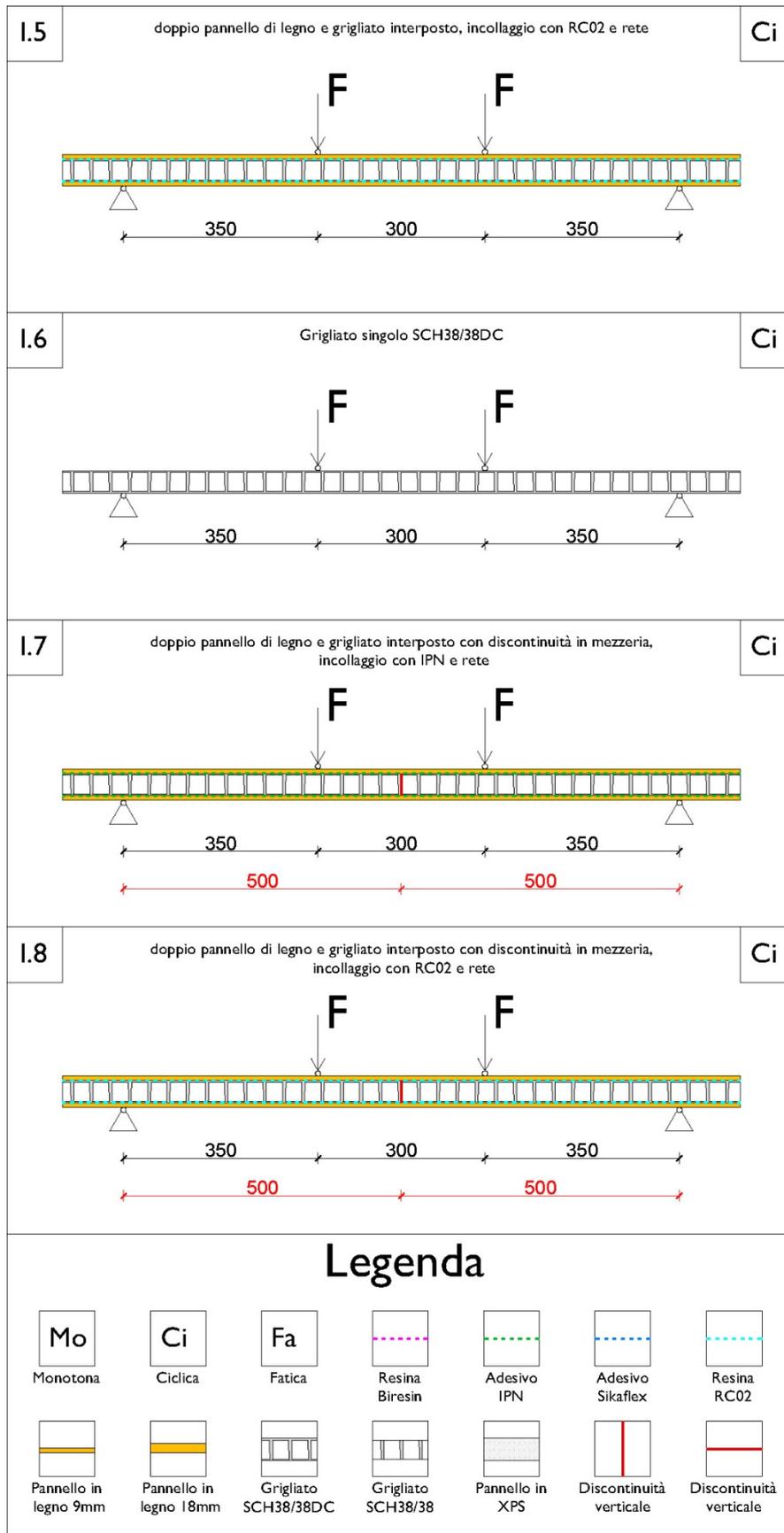


Figura 3-20 Configurazioni provini prima fase da I.5 a I.8

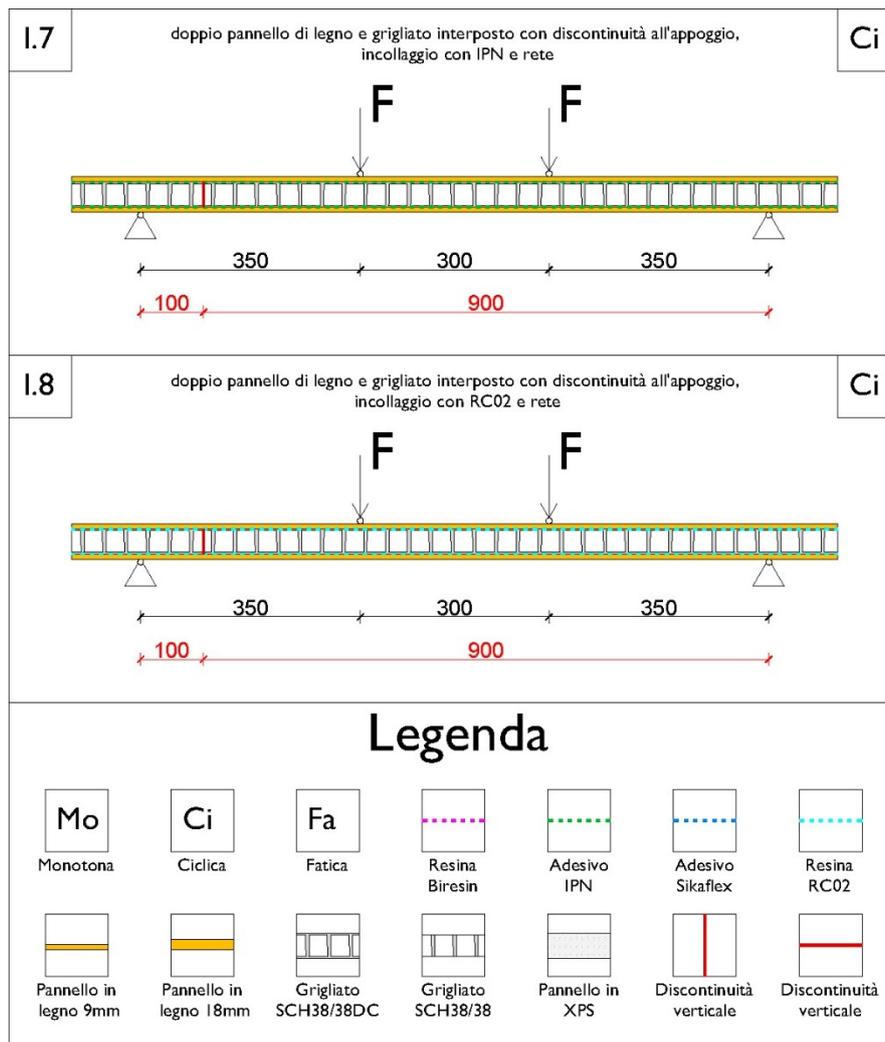


Figura 3-21 Configurazioni provini prima fase da I.7 a I.8

Prima di cominciare la fase di incollaggio sono stati preparati i grigliati sia per quanto riguarda la lavorazione delle superfici, come si riporta di seguito, sia per quel che concerne i tagli necessari per le configurazioni di impalcato che prevedono la presenza di discontinuità nello strato del grigliato. Il taglio è stato effettuato con l'ausilio di una sega idraulica per garantire una maggiore precisione (Figura 3-22).



Figura 3-22 Taglio del grigliato

Per quanto riguarda i provini confezionati con l’adesivo IPN, per assicurare una migliore adesione dell’interfaccia legno/grigliato è stato necessario provvedere a una preventiva lavorazione delle superfici del grigliato, le quali, presentando caratteristiche differenti, hanno richiesto preparazioni diverse. La ditta Betontex, che ha provveduto all’approvvigionamento del materiale per l’incollaggio, ha fornito le direttive sulle caratteristiche necessarie per una funzionalità ottimale dell’adesivo, in particolare, per quanto riguarda l’IPN, le superfici dovevano risultare opache e porose. La superficie liscia è stata dapprima levigata, in modo da diminuirne la lucentezza e, successivamente, lavorata con frese a tazza per trapano in modo da aumentarne la porosità.



*Figura 3-23 Lavorazione superficie liscia del grigliato*

Per quel che concerne la superficie scabra, poiché i solchi e le creste potevano ostacolare la stesura uniforme dell’adesivo, si è operata una piattatura manuale tramite pietra, in grado di asportare le parti in eccesso senza andare ad annullare la porosità, che tale scabrosità garantiva, necessaria all’incollaggio.



*Figura 3-24 Lavorazione superficie scabra del grigliato*

Tali provini sono stati i primi ad essere confezionati in quanto l'IPN necessita di un tempo di maturazione di circa 28 giorni. Si è provveduto nel corso della prima giornata, all'incollaggio dei pannelli multistrato in legno sulle superfici lisce dei quattro grigliati per cui era previsto l'utilizzo di questo adesivo. Il giorno successivo è stato invece eseguito l'incollaggio sul lato scabro, il quale ha richiesto l'utilizzo di maggiori quantità di materiale. La prima giornata di lavoro ha anche permesso di determinare la quantità ottimale di adesivo e di agente tixotropico da aggiungere allo stesso, per ottenere le caratteristiche di incollaggio richieste sia dal punto di vista della quantità sia della lavorabilità.

In breve si riporta una sintesi delle lavorazioni effettuate per realizzare i provini con l'adesivo IPN della Betontex:

- Preparazione delle superfici del grigliato; levigatura e lavorazione con la fresatrice a tazza della superficie liscia e piallatura manuale con la pietra di quella scabra.
- Stesura dell'IPN sulla superficie liscia e sul pannello di legno.
- Applicazione della rete in fibra di vetro.
- Seconda stesura dell'IPN sulla rete.
- Incollaggio del pannello ligneo.
- Posizionamento dei pesi.
- Stesura dell'IPN sulla superficie scabra e sul pannello di legno.
- Applicazione della rete in fibra di vetro.
- Seconda stesura dell'IPN sulla rete.
- Incollaggio del pannello ligneo.
- Posizionamento dei pesi.



Figura 3-25 Preparazione dell'adesivo IPN e prima stesura

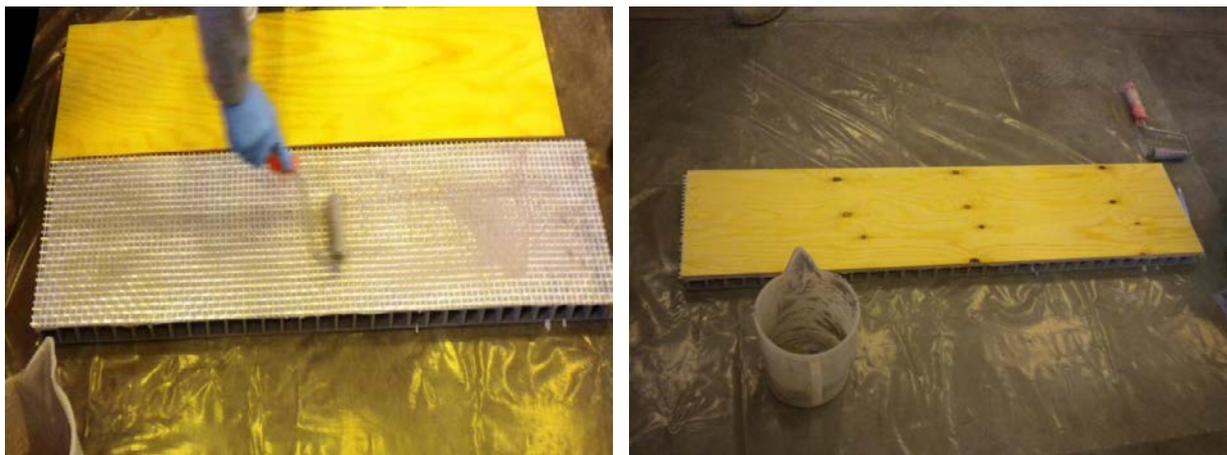


Figura 3-26 Applicazione della Rete in fibra di vetro, seconda stesura IPN e provino completo

Il confezionamento dei quattro provini che prevedevano un'interfaccia composta da rete in fibra di vetro e resina epossidica non ha comportato un anticipo eccessivo delle lavorazioni rispetto all'esecuzione delle prove in quanto il materiale adesivo richiedeva un tempo di maturazione di soli quattro giorni. Operativamente si è seguito il medesimo iter dei provini con l'IPN salvo che, in questo caso non era necessario provvedere preventivamente una lavorazione delle superfici.

I quattro provini presentano tra loro le stesse caratteristiche di incollaggio. Il 50% del quantitativo totale del materiale adesivo consegnatoci dalla ditta Betontex è stato utilizzato per le superfici lisce del grigliato, l'altro 50% per quelle scabre.

Dapprima si è provveduto alla preparazione del primer che funge da aggrappante e deve essere utilizzato in particolare nel caso in cui le superfici da incollare non siano porose. Lo stesso è stato applicato sia sulla superficie liscia del grigliato che sul quella del pannello ligneo.



Figura 3-27 Preparazione e stesura del primer

Dopo aver atteso un'ora per far sì che il primer acquisisse una consistenza simile alla colla, si è proceduto alla stesura della resina, formata da due componenti A e B con rapporto quantitativo 2:1, su entrambi i supporti e, prima dell'incollaggio, è stata interposta la rete in fibra di vetro.



Figura 3-28 Preparazione e applicazione della resina epossidica RC02

Posizionato il pannello multistrato si è provveduto all'applicazione di pesi che garantissero una distribuzione uniforme dell'adesivo.

Nel corso della giornata seguente, ci si è occupati dell'incollaggio della superficie scabra del grigliato. Le operazioni effettuate hanno coinciso con quelle del primo giorno: preparazione del primer, stesura di questo su superficie scabra e lignea, applicazione della resina sulle stesse, posizionamento della rete e del pannello.

In breve si riporta una sintesi delle lavorazioni effettuate per realizzare i provini con l'adesivo RC02 della Betontex:

- Stesura del Primer sia sulla superficie liscia del grigliato sia su quella del legno.
- Trascorsa un'ora, stesura della resina epossidica sia sulla superficie liscia del grigliato sia su quella del legno.
- Applicazione della rete in fibra di vetro.
- Seconda stesura della resina epossidica sulla rete.
- Incollaggio del pannello ligneo.
- Posizionamento dei pesi.
- Stesura del Primer sia sulla superficie scabra del grigliato sia su quella del legno
- Trascorsa un'ora, stesura della resina epossidica sia sulla superficie scabra del grigliato sia su quella del legno

- Applicazione della rete in fibra di vetro.
- Seconda stesura della resina epossidica sulla rete.
- Incollaggio del pannello ligneo.
- Posizionamento dei pesi.

Alla fine della preparazione dei provini, una volta assicurati i tempi di presa degli adesivi, si è provveduto alla generazione dei pattern (come descritto nel paragrafo 9.1.8) sulle superfici intradossali dei pannelli. La preparazione della superficie con una texture puntinata bianca e nera è di fondamentale importanza per il corretto rilevamento degli stati deformativi attraverso la DIC.

### 3.2.2 RACCOLTA DATI

Le attività di laboratorio inerenti alla prima fase di sperimentazione si sono svolte nel periodo compreso tra febbraio e marzo 2015 presso il laboratorio LISG alla presenza dei tecnici Roberto Carli e Mario Marcolongo e con la collaborazione dell'ingegnere Matilde Signorello.

La macchina di prova è stata allestita sul telaio prova travi Losenhausenwerk a controllo di carico. (paragrafo 3.1.1). Le schede dettagliate delle prove sono raccolte in appendice<sup>3</sup> e qui se ne riportano i dati significativi. (Tabella 3-2)

N°	Descrizione provino	tipologia prova	f max	P max	f rif	P rif	EJ medio
			(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
I.1	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con IPN e rete	Monotona	20,73	43,07	2,29	5,00	39,986
I.2	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con RC02 e rete	Monotona	17,18	39,22	2,49	5,00	36,680
I.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	Monotona	83,11	48,89	8,40	5,00	10,899
I.4	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con IPN e rete	Ciclica	19,33	44,13	2,32	5,00	39,529
I.5	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	24,08	47,17	2,30	5,00	39,732
I.6	Grigliato singolo SCH38/38DC	Ciclica	76,33	46,66	6,90	5,00	13,272
I.7	doppio pannello di legno e grigliato interposto con discontinuità in mezzeria, incollaggio con IPN e rete	Ciclica	16,93	36,11	2,12	5,00	43,160
I.8	doppio pannello di legno e grigliato interposto con discontinuità in mezzeria, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	17,39	36,59	2,62	5,00	34,994
I.9	doppio pannello di legno e grigliato interposto con discontinuità all'appoggio, incollaggio con IPN e rete	Ciclica	12,67	29,30	2,27	5,00	40,357
I.10	doppio pannello di legno e grigliato interposto con discontinuità all'appoggio, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	19,91	40,66	2,40	5,00	38,114

Tabella 3-2 Risultati I fase di sperimentazione

Nella tabella sono stati inseriti, la freccia massima a rottura  $f_{\max}$  di tutti i provini in corrispondenza del carico di rottura  $P_{\max}$ . Ai fini del calcolo della rigidezza media viene anche riportato il valore della freccia di riferimento  $f_{\text{rif}}$  in corrispondenza del carico convenzionale preso a riferimento  $P_{\text{rif}} = 5 \text{ kN}$

### 3.2.3 CONFRONTO PROVE

Una volta effettuate tutte e dieci le prove, estrapolati e elaborati i risultati delle stesse, è possibile metterli in relazione in modo da definire maggiormente le caratteristiche dell'impalcato e delle due tipologie di incollaggio.

Sono stati effettuati dei confronti sia in orizzontale tra prove che prevedevano stessa tipologia di incollaggio e diverse configurazioni sia in verticale tra stesse configurazioni con tipologie di incollaggio differenti.

Il primo confronto è effettuato tra le tre prove monotone eseguite sui provini I.1, I.2 e I.3. In questo confronto il grigliato non manifesta discontinuità verticali mentre variano le tipologie di incollaggio.

L'aggiunta dei pannelli in multistrato in legno ha portato ad un notevole aumento della rigidezza totale, comportando però anche una diminuzione del carico corrispondente alla crisi del provino rispetto al singolo grigliato.

Quanto detto è vero, se intendiamo come crisi del provino il momento in cui uno degli elementi che lo compongono giunge a rottura. Si è assistito infatti alla sola rottura del pannello multistrato ligneo sottostante, sottoposto a trazione, a un carico inferiore a quello massimo del singolo grigliato. Questo fa presupporre che, nel caso in cui il provino fosse stato ancora caricato, la curva carico-spostamento, in seguito alla rottura del legno, si sarebbe posizionata in prossimità di quella del grigliato singolo, garantendo un carico massimo prossimo, se non maggiore, a quello del provino in questione. In questo caso ne avrebbe però risentito la rigidezza che, nel momento in cui il pannello ligneo smette di lavorare, subisce un forte calo.

Per quel che concerne i due impalcati completi con incollaggio differente i risultati non si distaccano troppo gli uni dagli altri lasciando grande libertà nella scelta dell'adesivo.

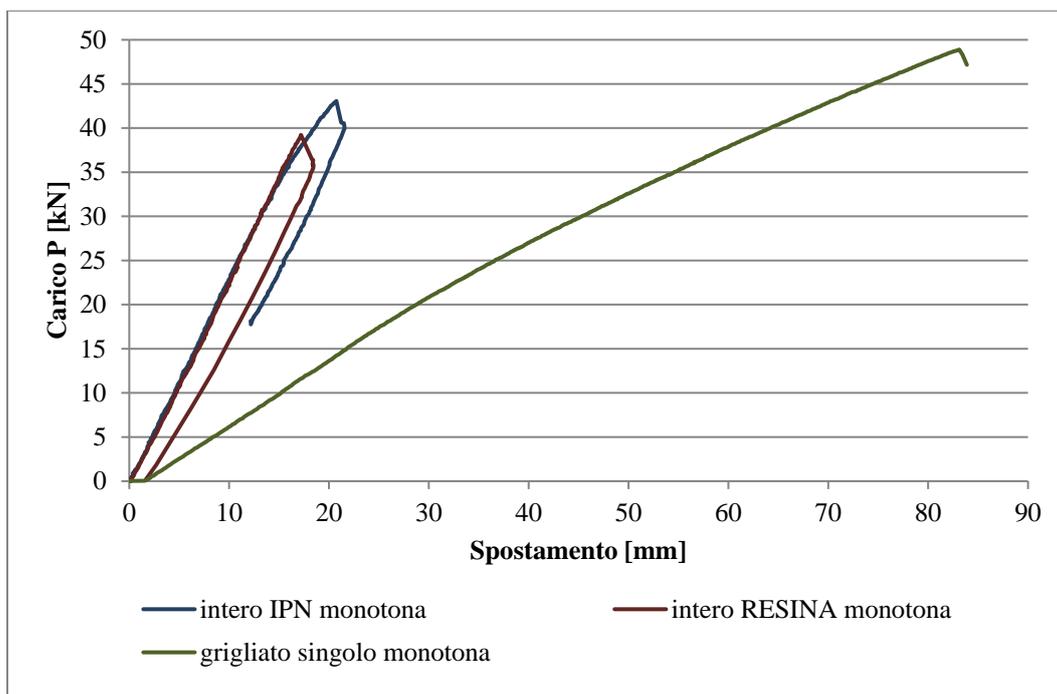


Figura 3-29 Prova monotona su impalcato completo senza discontinuità e grigliato singolo

Il secondo confronto è effettuato tra le prove monotona e ciclica eseguite sui provini I.1 e I.4. In questo confronto il grigliato non manifesta discontinuità verticali e l'incollaggio è eseguito con l'adesivo a base d'acqua IPN.

L'andamento della curva carico-spostamento del provino nel caso di prova ciclica e monotona non è soggetto a modifiche sostanziali.

Il grafico relativo alla prova ciclica dimostra che non è presente un residuo plastico, tanto che la curva tende a ripercorrere lo stesso percorso durante il ciclo di carico e quello di scarico. La mancanza di residuo plastico garantisce, soprattutto per valori di carico al di sotto di 10 kN, un comportamento elastico del provino. Tale caratteristica porta l'impalcato a riprendere la conformazione originaria una volta interrotta l'applicazione del carico. Questa tipologia di prova permette di affermare che, in normali condizioni di utilizzo, le deformazioni massime raggiunte non aumentino e rimangano inferiori a quelle concesse.

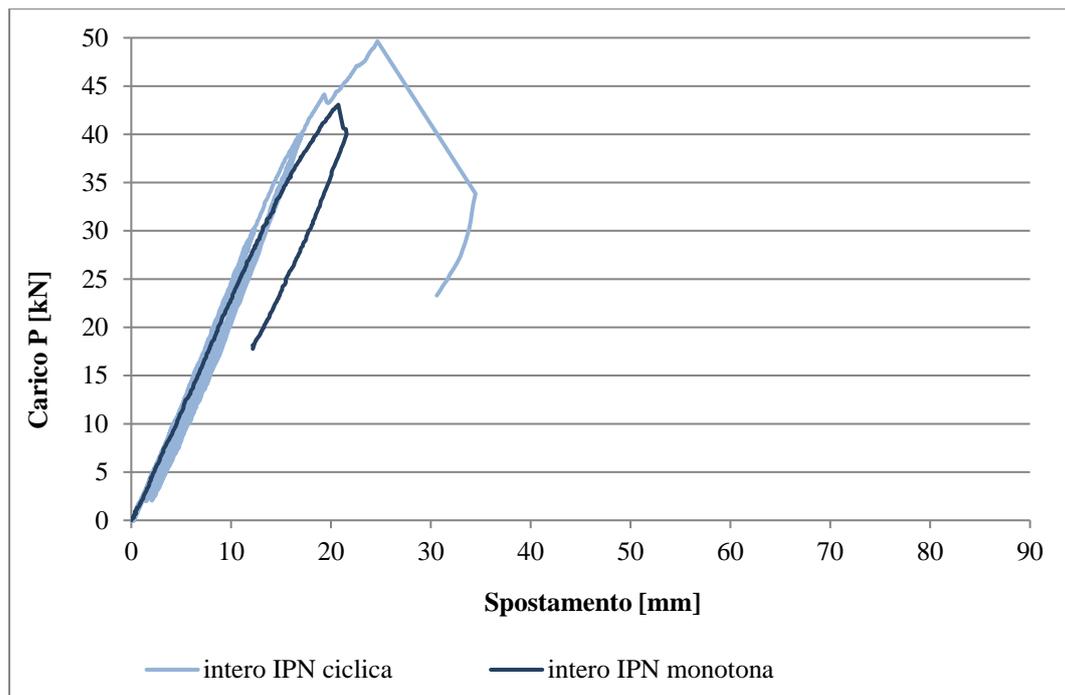


Figura 3-30 Prova ciclica e monotona su impalcato con IPN senza discontinuità

Il terzo confronto è effettuato tra le prove monotona e ciclica eseguite sui provini I.2 e I.5. In questo confronto il grigliato non manifesta discontinuità verticali e l'incollaggio è eseguito con la resina epossidica RC02.

Anche in questo caso l'andamento della curva carico-spostamento del provino per la prova ciclica e quella monotona non è soggetto a modifiche sostanziali.

Il grafico relativo alla prova ciclica dimostra che non è presente un residuo plastico, tanto che la curva tende a ripercorrere lo stesso percorso durante il ciclo di carico e quello di scarico. La mancanza di residuo plastico garantisce, soprattutto per valori di carico al di sotto di 10 kN, un comportamento elastico del provino. Tale caratteristica porta quindi l'impalcato a riprendere la conformazione originaria una volta interrotta l'applicazione del carico. Questa tipologia di prova permette di affermare che, in normali condizioni di utilizzo, le deformazioni massime raggiunte non aumentino e rimangano inferiori a quelle concesse.

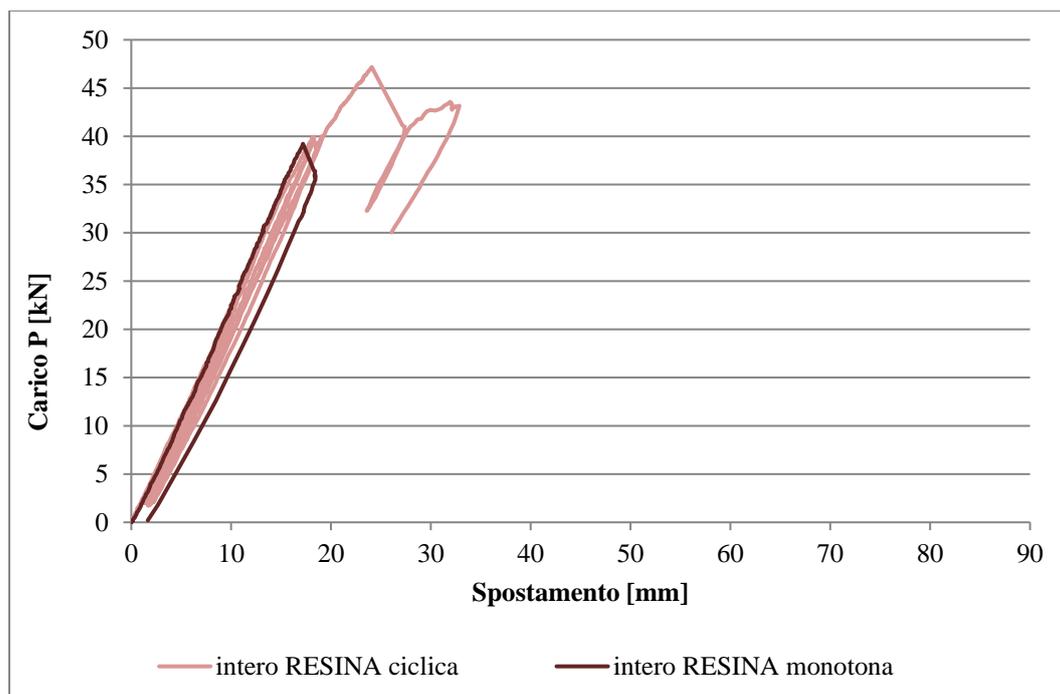


Figura 3-31 Prova ciclica e monotona su impalcato con RESINA RC02 senza discontinuità

Il quarto confronto è effettuato tra le prove monotona e ciclica eseguite sui provini I.3 e I.6. In questo confronto il grigliato non manifesta discontinuità verticali ed è testato nella sua configurazione originale senza i pannelli multistrato.

L'andamento della curva carico-spostamento del provino nel caso di prova ciclica e monotona non è soggetto a modifiche sostanziali.

Al contrario delle precedenti prove, però, il grigliato singolo risulta avere un comportamento maggiormente plastico, che genera residuo plastico nel corso della prova ciclica. Tale caratteristica è riscontrabile nel fatto che la curva si discosta da quella di partenza in maniera evidente. Proprio per questa caratteristica la necessità di aggiungere i pannelli multistrato risulta confermata e a favore di sicurezza.

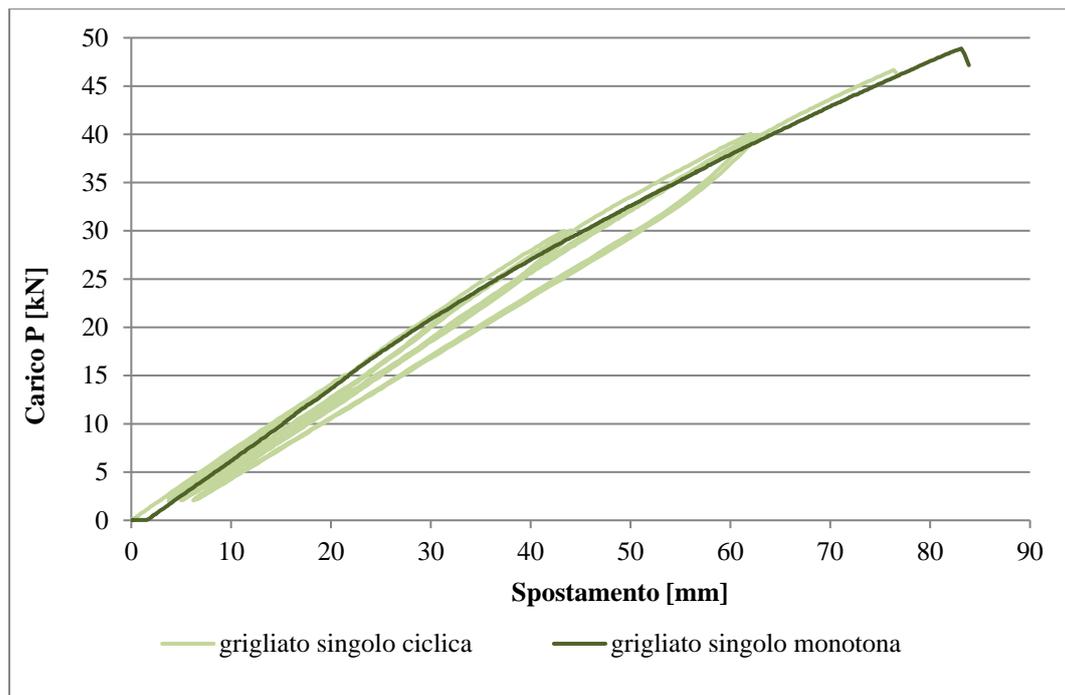


Figura 3-32 Prova ciclica e monotona su grigliato singolo senza discontinuità

Il quarto confronto è effettuato tra le prove cicliche eseguite sui provini I.7 e I.8. In questo confronto il grigliato manifesta una discontinuità verticale in mezzeria mentre variano le tipologie di incollaggio.

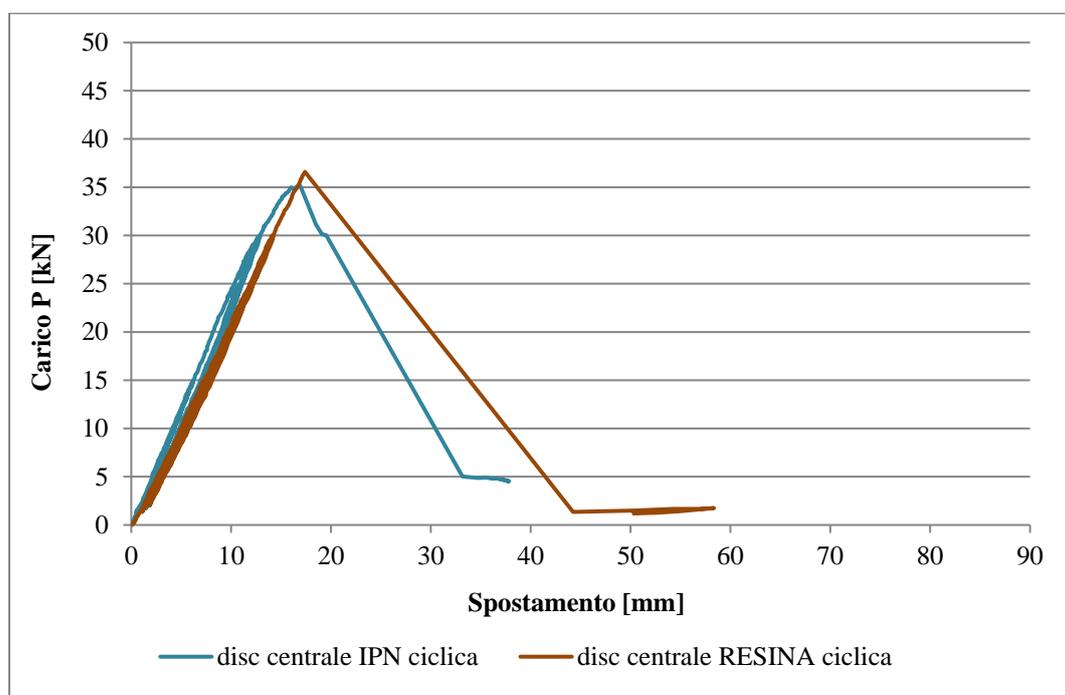


Figura 3-33 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità del grigliato in mezzeria

Con la presenza della discontinuità centrale del grigliato, il comportamento dei due provini, rispettivamente con incollaggio in IPN e resina epossidica, è risultato estremamente simile; con una leggera diminuzione delle prestazioni nel caso dell'IPN. Diminuzione che si noterà anche in seguito quando la discontinuità del grigliato è posta a 100 mm dall'appoggio.

A tale proposito la stessa azienda produttrice dell'incollaggio ha confermato che quel tipo di adesivo risulti, per le sue caratteristiche tecniche e meccaniche, leggermente inferiore rispetto alla resina epossidica. Per quanto riguarda il residuo plastico invece è, come per le altre prove sull'impalcato, pressoché inesistente.

Il quinto confronto è effettuato tra le prove cicliche eseguite sui provini I.9 e I.10. In questo confronto il grigliato manifesta una discontinuità verticale verso l'appoggio, dove il taglio è massimo, mentre variano le tipologie di incollaggio.

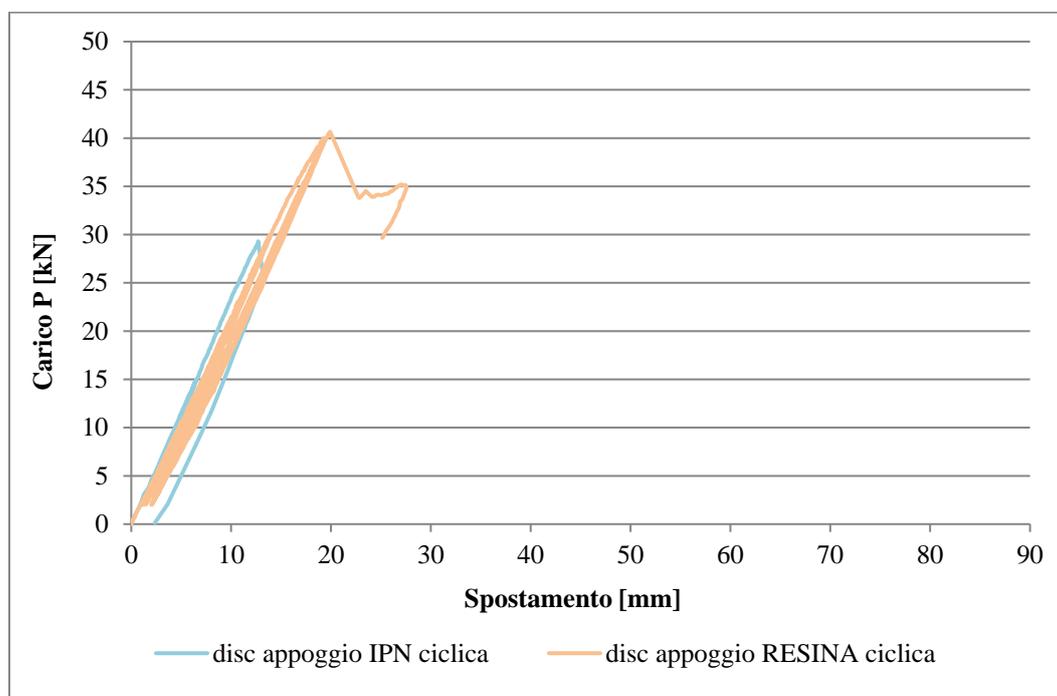


Figura 3-34 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità del grigliato a 100 mm dall'appoggio

Come affermato in precedenza le caratteristiche prestazionali del pacchetto che prevede l'incollaggio in IPN sono risultate inferiori a quelle dell'impalcato che come adesivo prevedeva la resina epossidica. Non si è giunti, nel caso dell'IPN, alla rottura del pannello in legno ma si è assistito allo scollaggio dello stesso. Come già anticipato nella descrizione del provino I.9, probabilmente questo problema, generatosi all'interfaccia legno-grigliato, è legato a una mancanza di resistenza alla sollecitazione a taglio dell'adesivo, che una volta divenuta troppo elevata ha generato il distacco delle due superfici nel punto di maggiore sollecitazione e fragilità.

Il sesto confronto è effettuato tra le prove monotone e cicliche eseguite sui provini I.1, I.4, I.7, I.9. In questo confronto vengono analizzate verticalmente tutte le configurazioni del sandwich realizzate con l'adesivo a base d'acqua IPN per evidenziare eventuali comportamenti anomali.

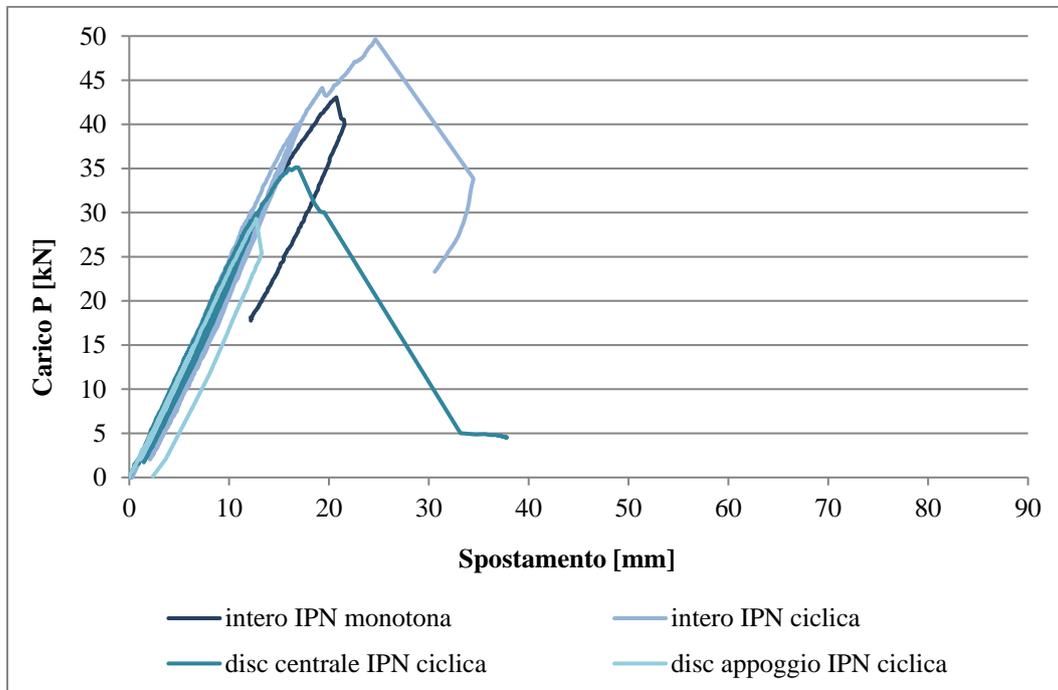


Figura 3-35 Prove monotone e cicliche su impalcato con IPN nelle diverse configurazioni

Dal grafico scaturisce che, con la presenza di discontinuità nel grigliato, il carico di rottura diminuisce, in particolare, nel caso in cui la giuntura sia soggetta sia a taglio che a momento, che avviene nella sezione posta a 100 mm dall'appoggio.

Per quanto riguarda la parte iniziale del grafico, che coincide con quella di reale interesse, il comportamento risulta essere omogeneo tra le diverse prove sia in presenza sia in assenza di discontinuità.

Il settimo confronto è effettuato tra le prove monotone e cicliche eseguite sui provini I.2, I.5, I.8, I.10. In questo confronto vengono analizzate verticalmente tutte le configurazioni del sandwich realizzate con la resina epossidica RC02 per evidenziare eventuali comportamenti anomali.

Dal grafico scaturisce che, con la presenza di discontinuità nel grigliato, il carico di rottura diminuisce leggermente nel caso in cui la giuntura si trovi in mezzzeria. Al contrario dell'IPN non vi sono modifiche sostanziali tra l'impalcato privo di discontinuità e quello con discontinuità in prossimità dell'appoggio. Probabilmente perché l'interfaccia risponde in modo idoneo alle sollecitazioni di taglio senza divenire la zona più fragile dell'intero provino.

Per quanto riguarda la parte iniziale del grafico, che coincide con quella di reale interesse, il comportamento risulta essere omogeneo tra le diverse prove sia in presenza sia in assenza di discontinuità.

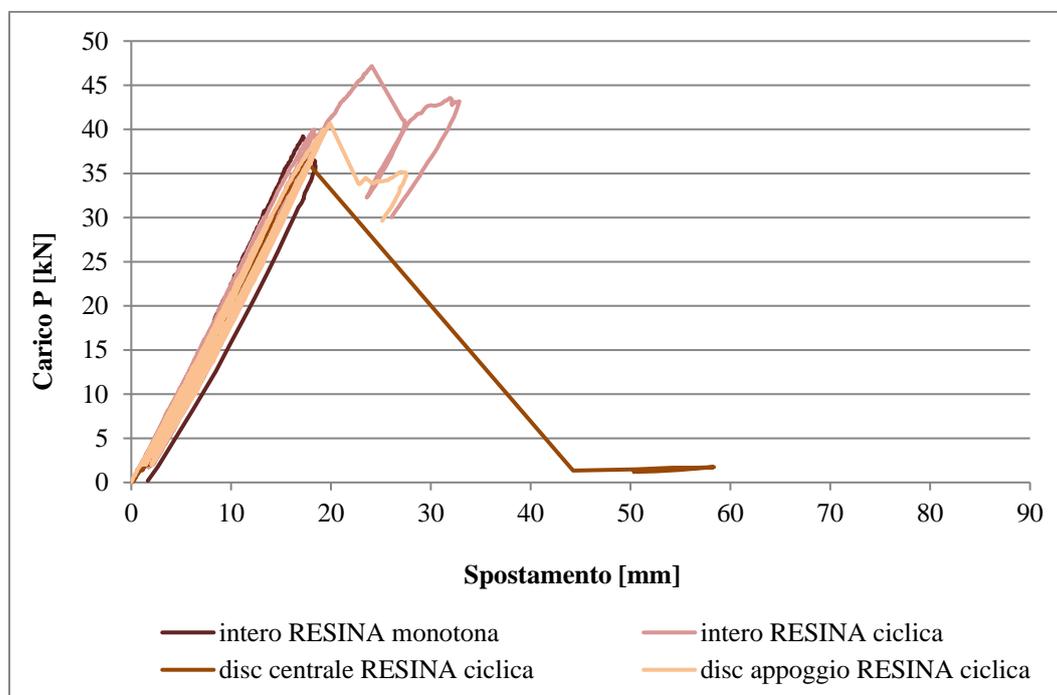


Figura 3-36 Prove monotona e cicliche su impalcato con RESINA EPOSSIDICA nelle diverse configurazioni

In generale il confronto tra i diversi adesivi, IPN e resina epossidica, ha dimostrato che la risposta meccanica dei due risulta pressoché coincidente, in termini di carico massimo sostenibile e di rigidità. Gli aspetti che portano a preferire la resina sono legati a un fattore di praticità di posa in opera e ai tempi di maturazione, per l'adesivo scelto si aggirano attorno ai 4 giorni al contrario dell'IPN che necessita di 28 giorni per maturare. La lavorabilità dell'IPN, come si è potuto constatare nel corso del confezionamento dei provini, ha una dipendenza diretta con la sua preparazione. Essa si modifica con l'aggiunta dell'agente tixotropico. Basta un punto percentuale sul peso totale per passare da un materiale adesivo estremamente liquido a uno poco lavorabile. Lo stesso adesivo ha mostrato segni di cedimento nella prova con il giunto tra i grigliati posto in prossimità dell'appoggio, comportando un distacco dell'interfaccia, assimilabile con una mancata resistenza in caso di sollecitazioni a taglio elevate.

Grazie alla modifica dell'interfaccia rispetto alla connessione meccanica dei diversi layers e potendo contare anche sull'ulteriore apporto della rete in fibra di vetro si è assistito all'incremento di rigidità e limitazione flessionale come ipotizzato. Si è potuto constatare, attraverso le prove monotone, che i carichi di rottura sono estremamente elevati. Infine, le prove cicliche hanno

dimostrato la mancanza di residuo plastico, tale da assicurare un buon comportamento meccanico dell'impalcato sottoposto a cicli di carico-scarico.

### 3.3 II FASE DI SPERIMENTAZIONE

---

L'analisi relativa alla rigidità e limitazione flessionale dell'impalcato ha dimostrato che l'aggiunta dei pannelli lignei garantisce un incremento di tali caratteristiche rispetto al grigliato singolo.

Analizzando i moduli elastici del sistema e dei singoli componenti risulta evidente che il grigliato non viene sfruttato nel pieno delle sue potenzialità meccaniche, in quanto la percentuale di momento flettente massimo, ripresa dallo stesso, non raggiunge valori elevati. L'errato posizionamento del grigliato, che ne implica uno scarso sfruttamento, è evidenziato dal fatto che, al momento della rottura, si è assistito alla comparsa di lesioni sul pannello ligneo inferiore, soggetto a trazione, mentre il materiale composito, all'interno dell'impalcato, non ha subito rotture.

Tale caratteristica è visibile anche dai risultati ottenuti nella fase di sperimentazione. L'aggiunta dei pannelli multistrato genera un incremento della rigidità ma provoca al contempo una diminuzione del carico a cui corrisponde la crisi dell'impalcato rispetto a quello del grigliato singolo. Tale riduzione si aggira attorno al 20%. Nel determinare il contributo del grigliato nella configurazione a sandwich è scaturito che questo sia estremamente limitato, raggiungendo valori di circa il 30% di sollecitazioni riprese rispetto a quelle totali.

Si è provveduto quindi ad una seconda ipotesi operativa. Questa prevede l'omissione del grigliato dalla configurazione a sandwich, essendo lo stesso un materiale costoso e poco sfruttato in questa configurazione. Si ipotizza la sua sostituzione con un materiale meno performante e meno costoso, che possa però garantire teoricamente valori di rigidità comparabili con la soluzione che prevedeva la presenza del grigliato.

Si è scelto di sostituire il grigliato stampato in PRFV con dei pannelli di XPS che, almeno in fase analitica consentirebbero di avere valori di rigidità comparabili. È da verificare se tale soluzione possa assicurare carichi massimi accettabili con quelli di normali condizioni di utilizzo. Per farlo è necessaria una seconda fase di sperimentazione. Viene quindi interposto ai due pannelli multistrato lignei un pannello di polistirene estruso (XPS) di differenti spessori al fine di determinare se le rigidità e i carichi massimi sono comparabili con quelli dell'impalcato contenente il grigliato. Avendo ottenuto risultati migliori con la resina epossidica RC02 nella precedente fase sperimentale, si è utilizzato questo sistema di incollaggio per tutti i provini.

### 3.3.1 CONFEZIONAMENTO PROVINI

---

Le prove definite corrispondono a 12 diverse configurazioni che differiscono nelle caratteristiche del provino. Le dimensioni sono sempre 1220x300 mm per adattarsi alla stessa macchina di prova e restituire risultati confrontabili. I vari layers componenti sono assemblati in modo da rappresentare il più ampio spettro possibile di combinazioni. Come detto si è scelto di utilizzare una sola tipologia di incollaggio (resina epossidica RC02) e i provini sono stati confezionati per presentare all'interno del core strutturale diversi spessori di XPS (40mm, 60 mm, 80 mm). Tutti i provini sono stati sottoposti a prove cicliche. Si riportano nelle immagini che seguono le diverse configurazioni testate (Figura 3-113; Figura 3-114; Figura 3-115).

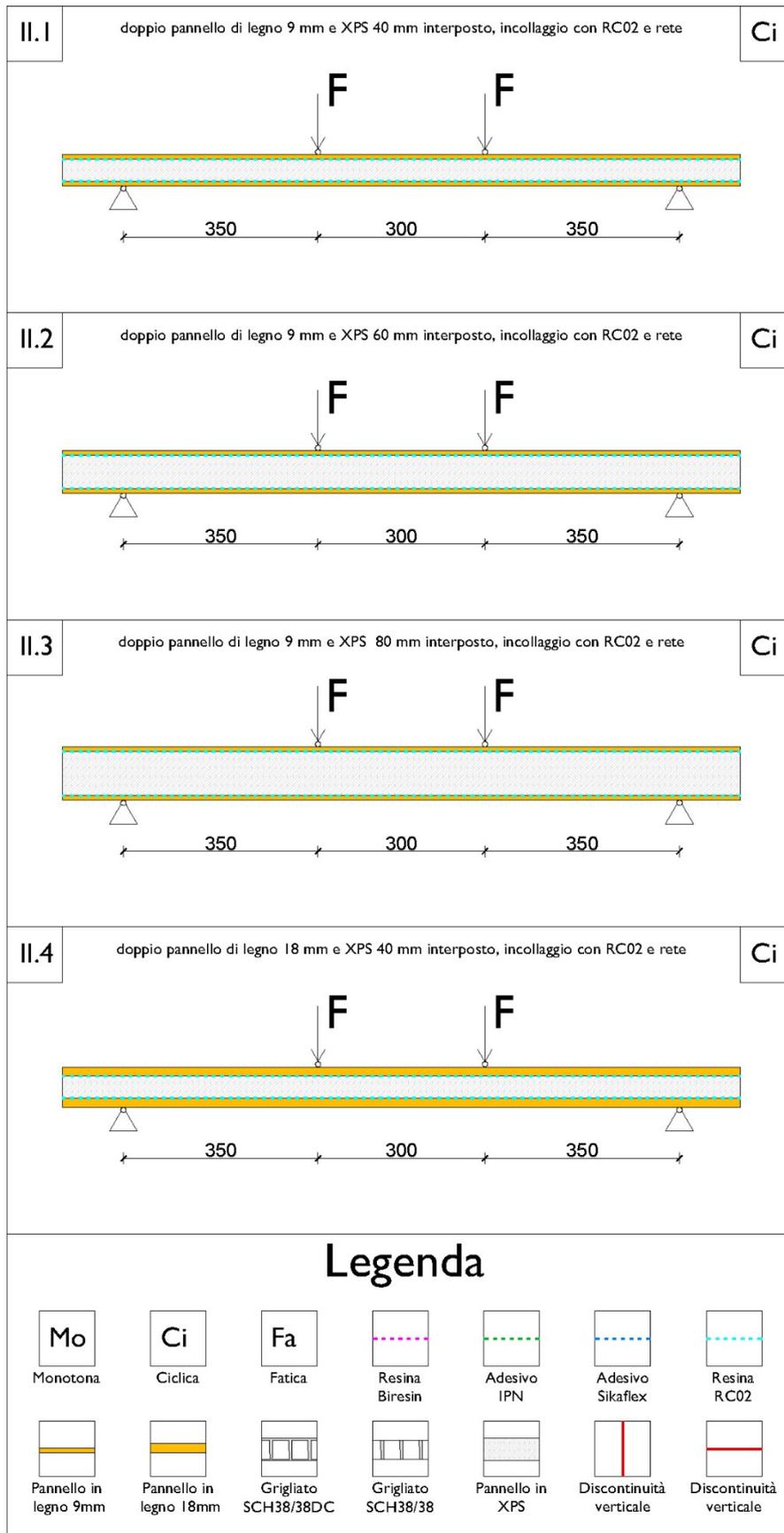


Figura 3-37 Configurazioni provini seconda fase da II.1 a II.4

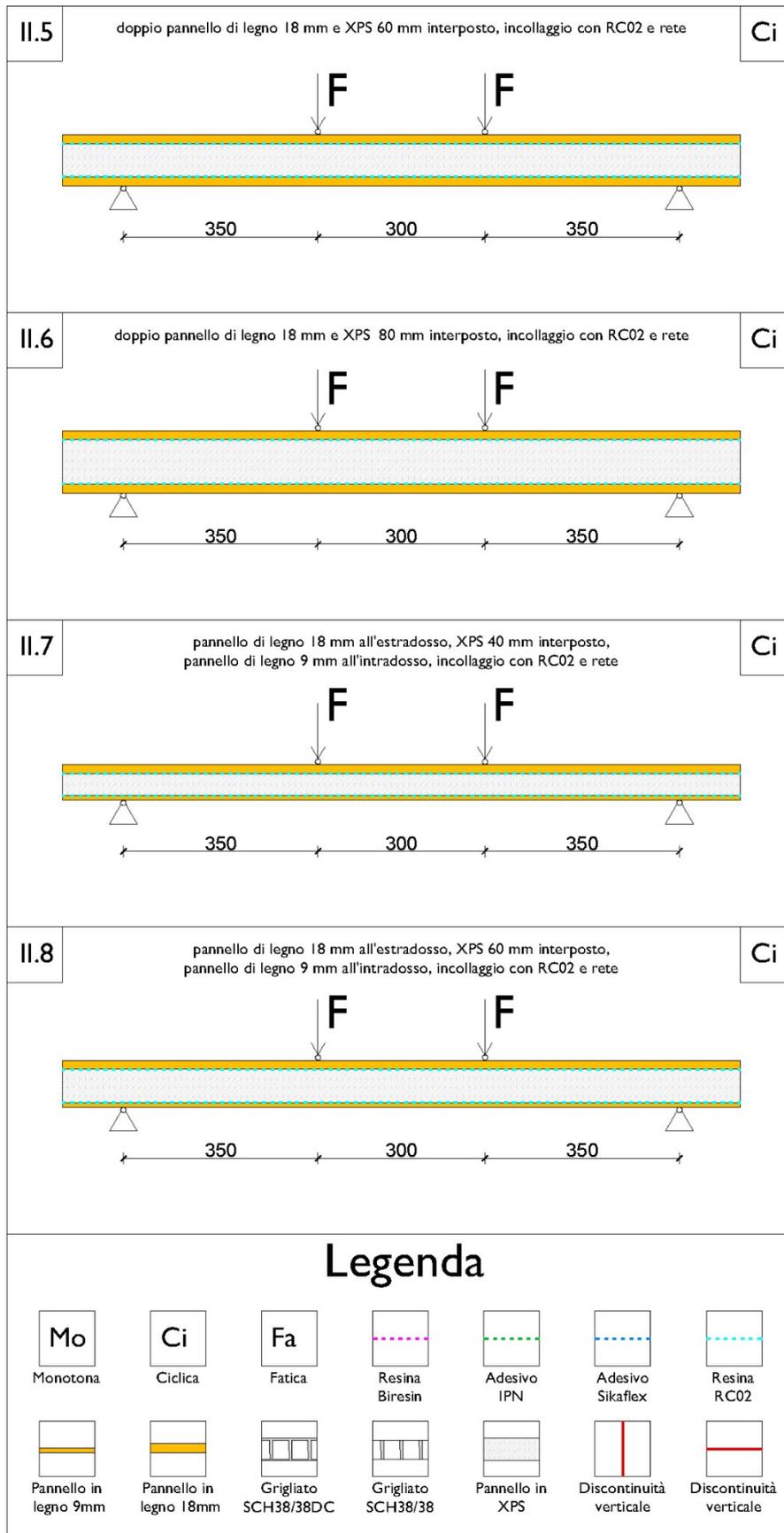


Figura 3-38 Configurazioni provini seconda fase da II.5 a II.8

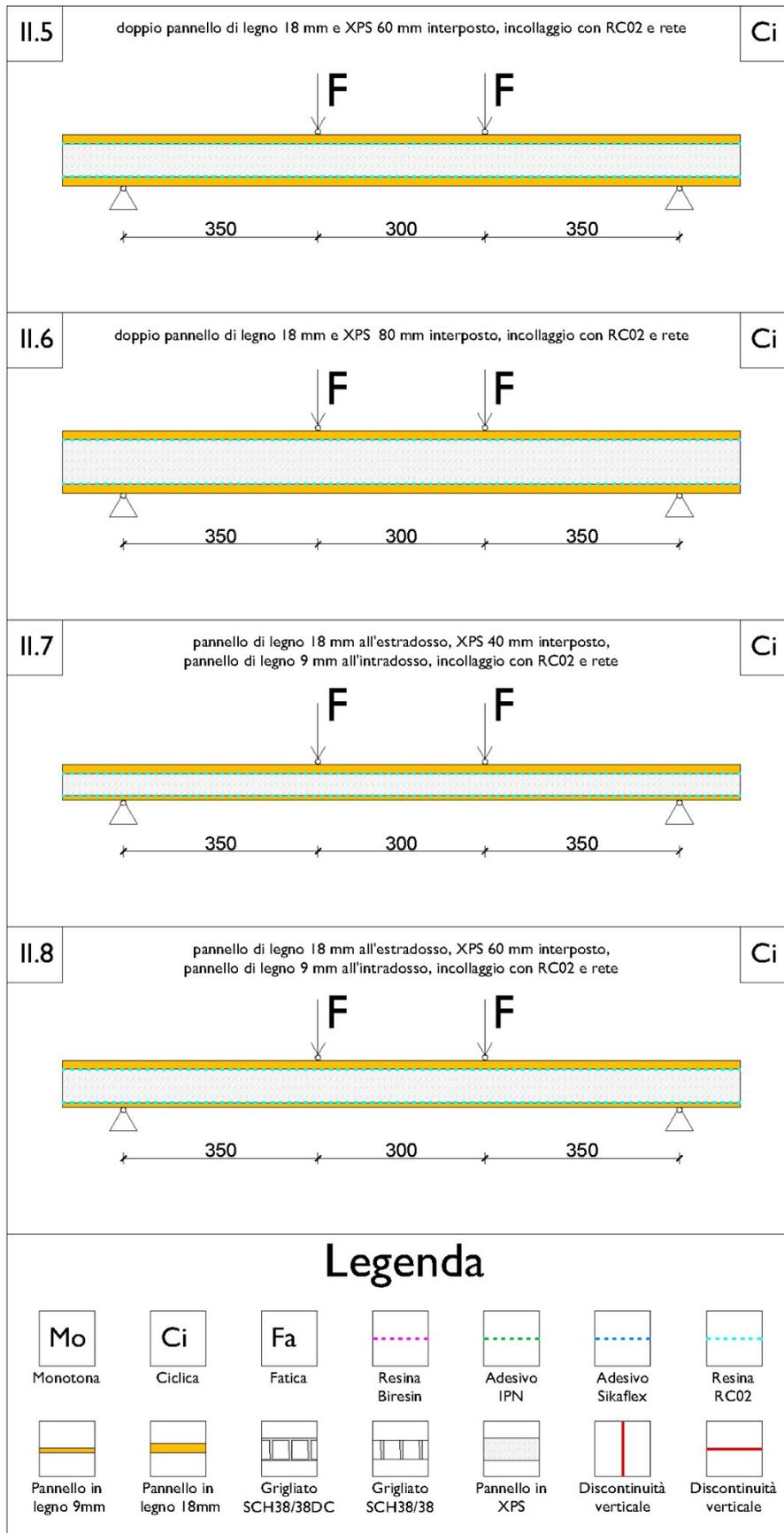


Figura 3-39 Configurazioni provini seconda fase da II.9 a II.12

L'adesivo scelto in questa fase sperimentale è la resina epossidica RC02, in quanto si è dimostrato, tra i due testati in un primo momento, quello maggiormente performante, garantendo un migliore incollaggio e tempi di maturazione nettamente inferiori rispetto all'IPN. Il sistema di incollaggio prevede l'interposizione tra le pelli in legno e il core in polistirene della rete in fibra di vetro. Questa è necessaria per garantire una migliore adesione e caratteristiche di resistenza più performanti.

L'iter di confezionamento ha previsto una serie di passaggi coincidenti per tutti i dodici provini. Dapprima si è provveduto alla preparazione del primer, che è stato successivamente steso su tutte le superfici lignee, in modo da garantire un migliore aggrappaggio della resina. Tale composto non deve essere utilizzato sulle superfici in polistirene poiché rischierebbero di corrodarsi.



Figura 3-40 Preparazione e stesura del primer

Passata un'ora, necessaria al primer per acquisire una consistenza simile alla colla, si è proceduto alla stesura della resina con un rullo sul primo pannello in legno. La resina è formata da due componenti A e B con rapporto quantitativo 2:1.



Figura 3-41 Preparazione e stesura della resina epossidica sui pannelli multistrato

È stata posizionata la rete e ripassata un'altra mano di resina epossidica. Questa è stata poi stesa anche sulla superficie del pannello di XPS, che è stato subito dopo posizionato sopra al pannello ligneo. Si sono ripetute le stesse fasi di incollaggio anche per le altre due superfici.



Figura 3-42 Stesura della resina sul pannello XPS e completamento con rete in fibra di vetro

Terminato l'incollaggio si è provveduto al posizionamento di pesi che garantissero un'adesione uniforme delle superfici.

In breve si riporta una sintesi delle lavorazioni effettuate per realizzare i provini con la resina RC02 della Betontex per i provini realizzati con pannelli di XPS e rete in fibra di vetro:

- Stesura del Primer sulla superficie del pannello multistrato in legno.
- Dopo un'ora, stesura della resina epossidica sulla superficie lignea.
- Applicazione della rete in fibra di vetro.
- Seconda stesura della resina epossidica sulla rete.
- Stesura della resina epossidica sulla superficie del pannello di XPS.
- Posizionamento del pannello di XPS sul compensato.
- Stesura della resina epossidica sulla superficie del pannello di XPS.
- Applicazione della rete in fibra di vetro.
- Seconda stesura della resina epossidica sulla rete.
- Stesura della resina epossidica sulla superficie del pannello multistrato.
- Incollaggio del pannello sul XPS.
- Posizionamento dei pesi.

I provini hanno richiesto, come nella precedente fase di sperimentazione, circa 4 giorni di maturazione prima dell’inizio delle prove.

## 3.3.2 RACCOLTA DATI

Le attività di laboratorio inerenti alla seconda fase di sperimentazione si sono svolte nel periodo compreso tra ottobre e novembre 2015 presso il laboratorio LISG alla presenza dei tecnici Roberto Carli e Mario Marcolongo e con la collaborazione dell'ingegnere Matilde Signorello.

La macchina di prova è stata allestita sul telaio prova travi Losenhausenwerk a controllo di carico. (paragrafo 3.1.1). Le schede dettagliate delle prove sono raccolte in appendice<sup>4</sup> e qui se ne riportano i dati significativi. (Tabella 3-3)

N°	Descrizione provino	tipologia prova	f max	P max	f rif	P rif	EJ medio
			(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
II.1	doppio pannello di legno 9 mm e XPS 40 mm interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	57,14	11,05	9,35	5,00	9,792
II.2	doppio pannello di legno 9 mm e XPS 60 mm interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	54,02	15,42	6,33	5,00	14,453
II.3	doppio pannello di legno 9 mm e XPS 80 mm interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	53,08	16,74	5,29	5,00	17,297
II.4	doppio pannello di legno 18 mm e XPS 40 mm interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	44,24	16,73	5,38	5,00	16,999
II.5	doppio pannello di legno 18 mm e XPS 60 mm interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	53,24	23,21	4,29	5,00	21,354
II.6	doppio pannello di legno 18 mm e XPS 80 mm interposto, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	47,37	23,55	3,62	5,00	25,270
II.7	pannello di legno 18 mm all'estradosso, XPS 40 mm interposto, pannello di legno 9 mm all'intradosso, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	65,48	19,33	5,21	5,00	17,573
II.8	pannello di legno 18 mm all'estradosso, XPS 60 mm interposto, pannello di legno 9 mm all'intradosso, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	63,21	21,22	4,33	5,00	21,150
II.9	pannello di legno 18 mm all'estradosso, XPS 80 mm interposto, pannello di legno 9 mm all'intradosso, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	74,29	24,91	4,34	5,00	21,082
II.10	pannello di legno 9 mm all'estradosso, XPS 40 mm interposto, pannello di legno 18 mm all'intradosso, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	43,81	18,01	4,97	5,00	18,394
II.11	pannello di legno 9 mm all'estradosso, XPS 60 mm interposto, pannello di legno 18 mm all'intradosso, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	41,09	19,28	4,61	5,00	19,852
II.12	pannello di legno 9 mm all'estradosso, XPS 80 mm interposto, pannello di legno 18 mm all'intradosso, incollaggio con RC02 e rete	Ciclica	36,16	18,06	4,43	5,00	20,658

Tabella 3-3 Risultati II fase di sperimentazione

Nella tabella sono stati inseriti, la freccia massima a rottura  $f_{max}$  di tutti i provini in corrispondenza del carico di rottura  $P_{max}$ . Ai fini del calcolo della rigidezza media viene anche

riportato il valore della freccia di riferimento  $f_{rif}$  in corrispondenza del carico convenzionale preso a riferimento  $P_{rif} = 5 \text{ kN}$

### 3.3.3 CONFRONTO PROVE

Effettuate tutte le prove, estrapolati ed elaborati i risultati, è possibile metterli in relazione tra loro per definire le caratteristiche dell'impalcato nelle diverse configurazioni.

Si è proceduto a dei confronti sia in orizzontale tra provini contenenti pannelli di polistirene del medesimo spessore e conformazione diversa, sia in verticale tra prove che prevedevano la stessa configurazione e con XPS di diversa grandezza.

Il primo confronto viene effettuato tra i provini II.1, II.4, II.7, II.10 che presentano tutti il pannello di XPS di spessore 40mm in sostituzione del grigliato stampato. I pannelli multistrato configurano due soluzioni con sezione trasversale simmetrica e due soluzioni con sezione trasversale asimmetrica.

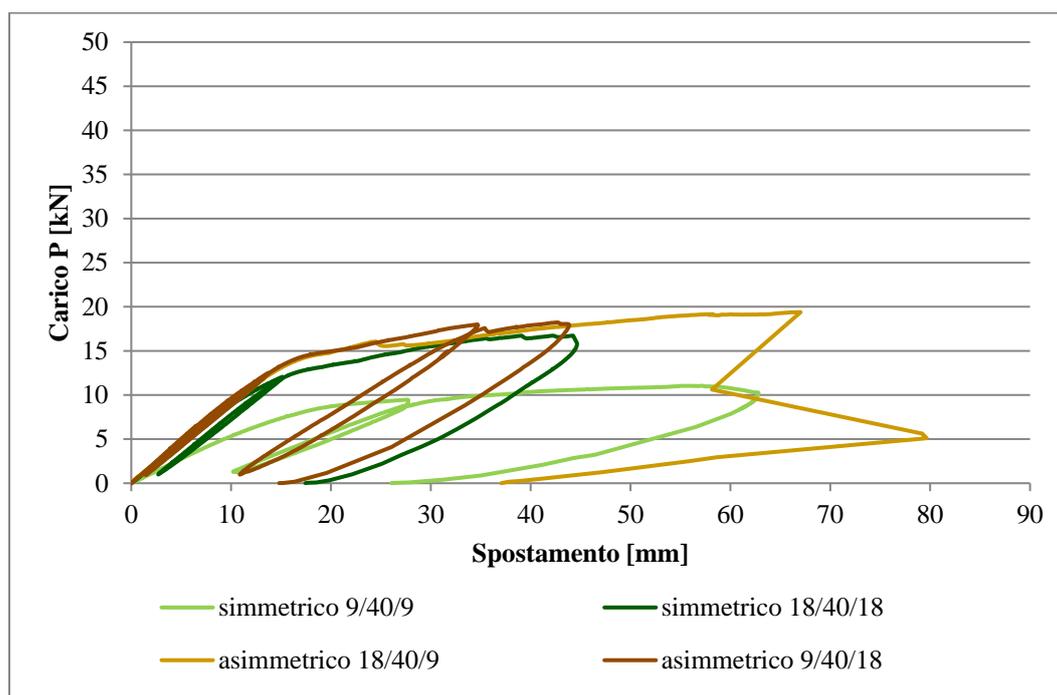


Figura 3-43 Prova ciclica su diverse configurazioni di impalcato con XPS di spessore 40 mm

Dal grafico riportato si può notare che all'aumentare dell'altezza della sezione la rigidezza aumenta. Il provino che presenta la configurazione simmetrica con i due pannelli multistrato di spessore 9 mm ha rigidezza e resistenza minori rispetto alle altre tipologie di impalcato. Queste ultime sono caratterizzate da andamenti del grafico carico-spostamento simili sia in termini di

deformazioni sia in termini di rigidità. Particolare è inoltre il comportamento delle due configurazioni asimmetriche, che vedono lo scambio reciproco tra il pannello all'estradosso e all'intradosso. Dal confronto tra i due grafici si può evidenziare come le curve siano pressoché coincidenti fino a rottura della configurazione meno resistente. Presentano stessa rigidità, essendo composte dai medesimi elementi. Si ricorda, dalla descrizione delle singole prove, che la rottura dell'impalcato, che prevede il pannello di legno da 9 mm all'intradosso, è stata totale sia per il legno sia per l'XPS. Da ciò si comprende la maggiore deformazione verticale del provino per carichi che variano sensibilmente e che non si discostano in modo significativo dalla forza corrispondente alla crisi dell'altra configurazione asimmetrica, in cui il pannello da 9 mm si trovava all'estradosso.

Il secondo confronto viene effettuato tra i provini II.2, II.5, II.8, II.11 che presentano tutti il pannello di XPS di spessore 60mm in sostituzione del grigliato stampato. I pannelli multistrato configurano due soluzioni con sezione trasversale simmetrica e due soluzioni con sezione trasversale asimmetrica.

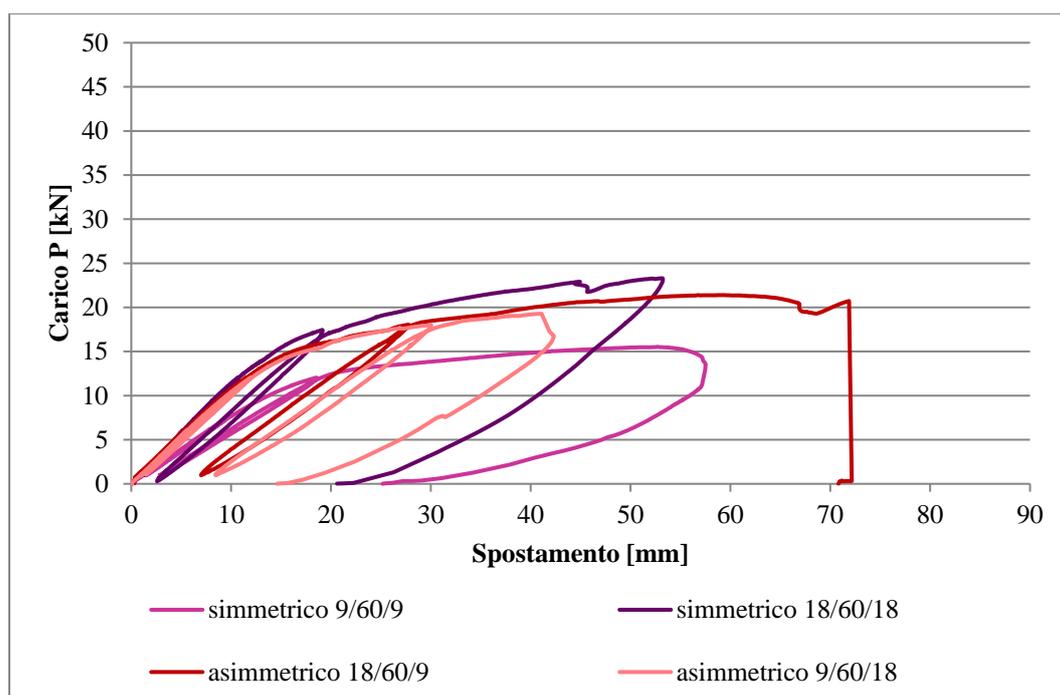


Figura 3-44 Prova ciclica su diverse configurazioni di impalcato con XPS di spessore 60 mm

Dal grafico riportato si può notare che all'aumentare dell'altezza della sezione la rigidità aumenta. Il provino che presenta la configurazione simmetrica con i due pannelli multistrato di spessore 9 mm ha rigidità e resistenza minori rispetto alle altre tipologie di impalcato. Queste ultime sono caratterizzate da andamenti del grafico carico-spostamento simili sia in termini di deformazioni sia in termini di rigidità. Particolare è inoltre il comportamento delle due

configurazioni asimmetriche, che vedono lo scambio reciproco tra il pannello all'estradosso e all'intradosso. Dal confronto tra i due grafici si può evidenziare come le curve siano pressoché coincidenti fino a rottura della configurazione meno resistente. Presentano stessa rigidezza, essendo composte dai medesimi elementi. Si ricorda, dalla descrizione delle singole prove, che la rottura dell'impalcato, che prevede il pannello di legno da 9 mm all'intradosso, è stata totale sia per il legno sia per l'XPS. Da ciò si comprende la maggiore deformazione verticale del provino per carichi che variano sensibilmente e che non si discostano in modo significativo dalla forza corrispondente alla crisi dell'altra configurazione asimmetrica, in cui il pannello da 9 mm si trovava all'estradosso.

Il terzo confronto viene effettuato tra i provini II.3, II.6, II.9, II.12 che presentano tutti il pannello di XPS di spessore 80mm in sostituzione del grigliato stampato. I pannelli multistrato configurano due soluzioni con sezione trasversale simmetrica e due soluzioni con sezione trasversale asimmetrica.

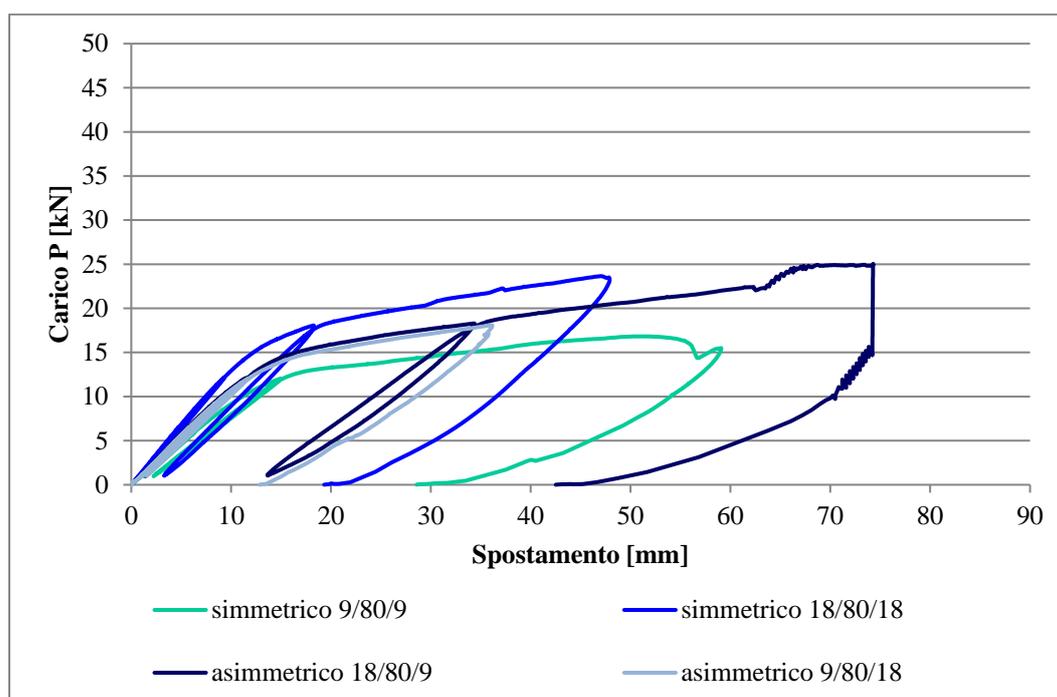


Figura 3-45 Prova ciclica su diverse configurazioni di impalcato con XPS di spessore 80 mm

Dal grafico riportato si può notare che all'aumentare dell'altezza della sezione la rigidezza aumenta. Il provino che presenta la configurazione simmetrica con i due pannelli multistrato di spessore 9 mm ha rigidezza e resistenza minori rispetto alle altre tipologie di impalcato. Queste ultime sono caratterizzate da andamenti del grafico carico-spostamento simili sia in termini di deformazioni sia in termini di rigidezza. Particolare è inoltre il comportamento delle due configurazioni asimmetriche, che vedono lo scambio reciproco tra il pannello all'estradosso e

all'intradosso. Dal confronto tra i due grafici si può evidenziare come le curve siano pressoché coincidenti fino a rottura della configurazione meno resistente. Presentano stessa rigidezza, essendo composte dai medesimi elementi. Si ricorda, dalla descrizione delle singole prove, che la rottura dell'impalcato, che prevede il pannello di legno da 9 mm all'intradosso, è stata totale sia per il legno sia per l'XPS. Da ciò si comprende la maggiore deformazione verticale del provino per carichi che variano sensibilmente e che non si discostano in modo significativo dalla forza corrispondente alla crisi dell'altra configurazione asimmetrica, in cui il pannello da 9 mm si trovava all'estradosso.

Il quarto confronto viene effettuato tra i provini II.1, II.2, II.3, che presentano tutti la configurazione simmetrica dei pannelli multistrato lignei da 9mm di spessore. Le configurazioni variano in funzione del pannello interposto in XPS che sostituisce il grigliato che il cui spessore varia da 40mm a 60mm fino a 80mm nella configurazione con la sezione resistente più spessa.

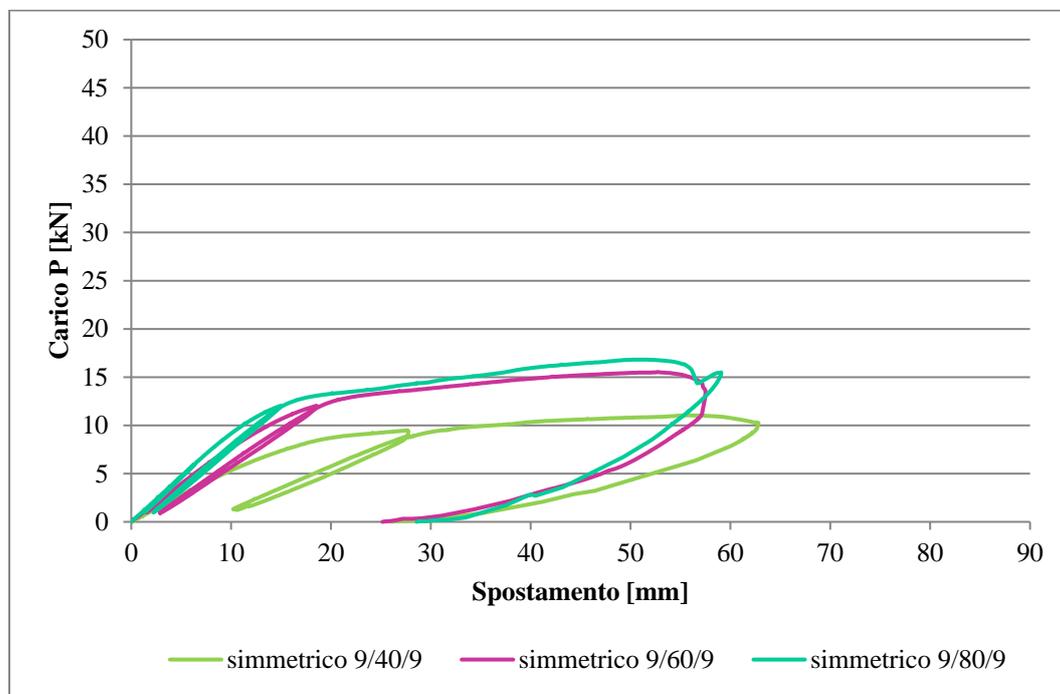


Figura 3-46 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 9 mm all'intradosso e all'estradosso con XPS di diverso spessore

L'aumento dello spessore del pannello di polistirene estruso genera, come ci si aspettava, un aumento di rigidezza dell'impalcato. La differenza dei comportamenti tra i tre provini analizzati risulta evidente soprattutto tra quello con XPS da 40 mm e gli altri due. Le configurazioni che vedono l'introduzione di XPS da 60 mm e da 80 mm non generano differenze sostanziali nelle relative curve carico-spostamento. A questo proposito si può ipotizzare che l'utilizzo di polistirene più spesso non

sia prettamente necessario in quanto a un eccessivo aumento della sezione non corrispondono caratteristiche meccaniche più performanti.

Il quinto confronto viene effettuato tra i provini II.4, II.5, II.6, che presentano tutti la configurazione simmetrica dei pannelli multistrato lignei da 18mm di spessore. Le configurazioni variano in funzione del pannello interposto in XPS che sostituisce il grigliato che il cui spessore varia da 40mm a 60mm fino a 80mm nella configurazione con la sezione resistente più spessa.

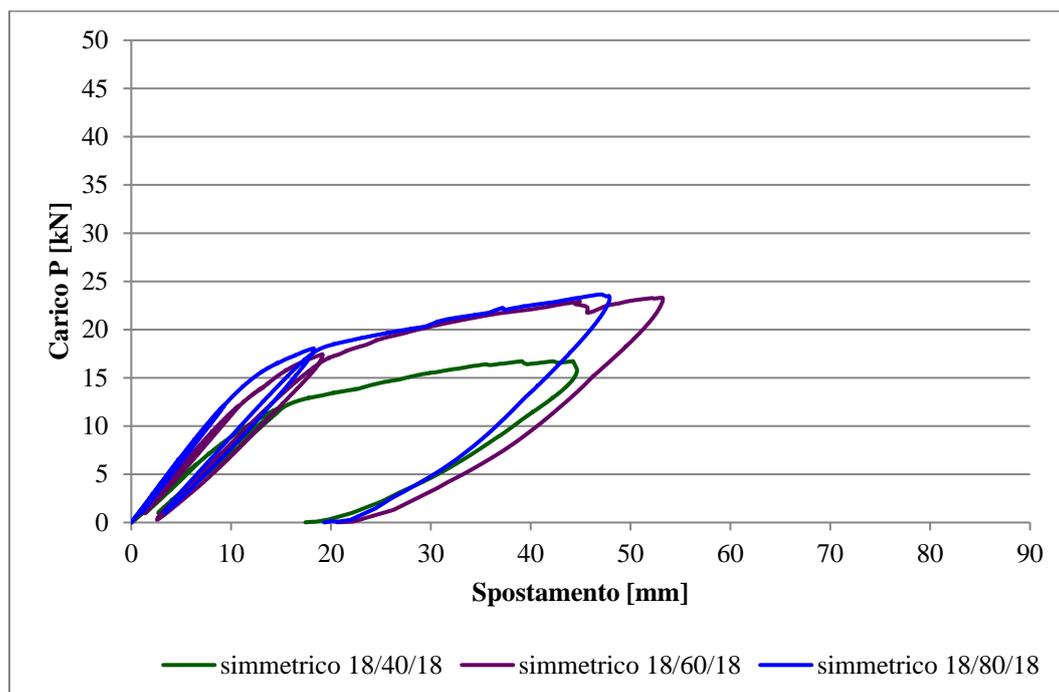


Figura 3-47 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 18 mm all'intradosso e all'estradosso con XPS di diverso spessore

L'aumento dello spessore del pannello di polistirene estruso genera, come ci si aspettava, un aumento di rigidità dell'impalcato. La differenza dei comportamenti tra i tre provini analizzati risulta evidente soprattutto tra quello con XPS da 40 mm e gli altri due. Le configurazioni che vedono l'introduzione di XPS da 60 mm e da 80 mm non generano differenze sostanziali nelle relative curve carico-spostamento. A questo proposito si può ipotizzare che l'utilizzo di polistirene più spesso non sia prettamente necessario in quanto a un eccessivo aumento della sezione non corrispondono caratteristiche meccaniche più performanti.

Il sesto confronto viene effettuato tra i provini II.7, II.8, II.9, che presentano tutti la configurazione asimmetrica con il pannello multistrato ligneo all'estradosso di 18mm di spessore mentre all'intradosso viene posto il pannello multistrato ligneo da 9mm di spessore. Le configurazioni

variano in funzione del pannello interposto in XPS che sostituisce il grigliato che il cui spessore varia da 40mm a 60mm fino a 80mm nella configurazione con la sezione resistente più spessa.

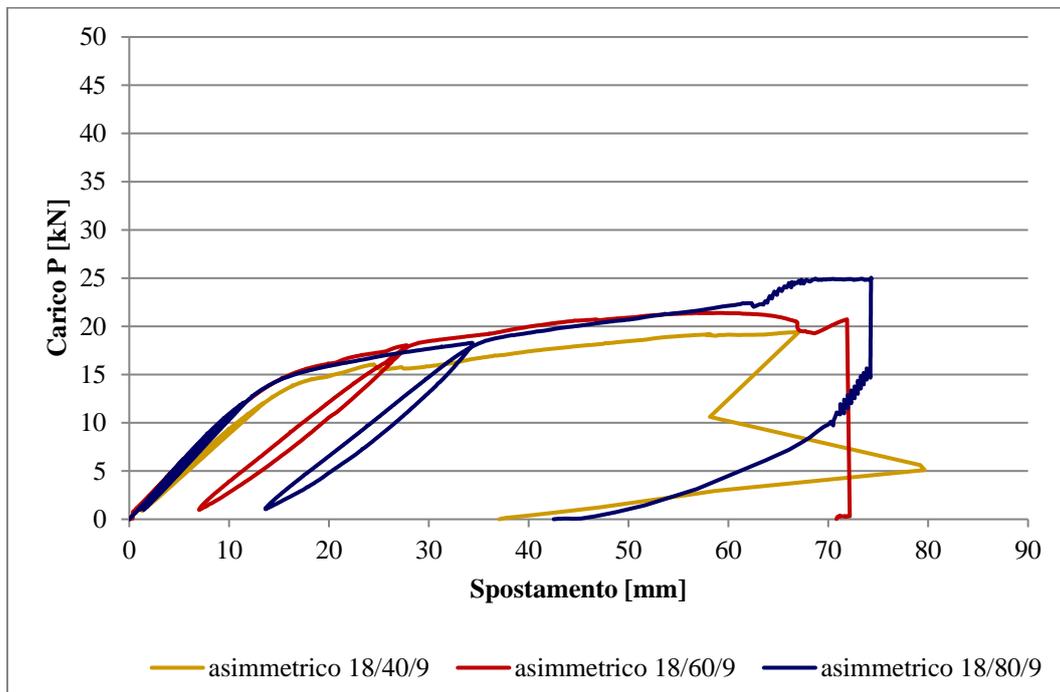


Figura 3-48 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 18 mm all'estradosso e di 9 mm all'intradosso con XPS di diverso spessore

Anche nel caso della configurazione asimmetrica con multistrato da 18 mm all'estradosso e da 9 mm all'intradosso l'aumento dello spessore del pannello di polistirene estruso genera un aumento di rigidità dell'impalcato. In questo caso però l'andamento delle tre curve non presenta enormi differenze, anzi i due grafici relativi allo spessore di XPS 60 mm e 80 mm si sovrappongono perfettamente. A questo proposito si può ipotizzare che l'utilizzo di polistirene più spesso non sia prettamente necessario in quanto a un eccessivo aumento della sezione non corrispondono caratteristiche meccaniche più performanti.

Il settimo confronto viene effettuato tra i provini II.10, II.11, II.12, che presentano tutti la configurazione asimmetrica con il pannello multistrato ligneo all'estradosso di 9mm di spessore mentre all'intradosso viene posto il pannello multistrato ligneo da 18mm di spessore. Le configurazioni variano in funzione del pannello interposto in XPS che sostituisce il grigliato che il cui spessore varia da 40mm a 60mm fino a 80mm nella configurazione con la sezione resistente più spessa.

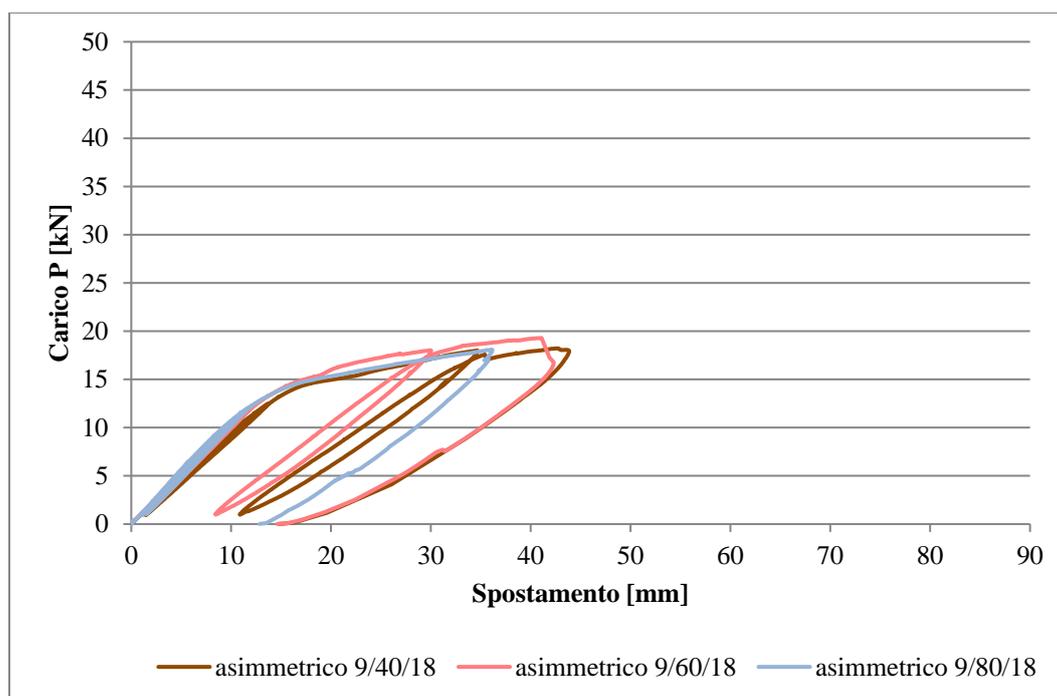


Figura 3-49 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 9 mm all'estradosso e di 18 mm all'intradosso con XPS di diverso spessore

Anche nel caso della configurazione asimmetrica con multistrato da 9 mm all'estradosso e da 18 mm all'intradosso l'aumento dello spessore del pannello di polistirene estruso genera un aumento di rigidità dell'impalcato. In questo caso però l'andamento delle tre curve non presenta enormi differenze, anzi i due grafici relativi allo spessore di XPS 60 mm e 80 mm si sovrappongono perfettamente. A questo proposito si può ipotizzare che l'utilizzo di polistirene più spesso non sia prettamente necessario in quanto a un eccessivo aumento della sezione non corrispondono caratteristiche meccaniche più performanti.

### 3.3.4 CONFRONTO PROVE CON I FASE DI SPERIMENTAZIONE

Questa successiva fase sperimentale è stata utile a definire l'effettiva necessità di un materiale costoso e performante, quale il grigliato in PRFV, interposto ai due pannelli multistrato di legno se confrontato con l'utilizzo di un materiale meno "nobile" quale XPS. Ragionando soltanto in termini di rigidità e resistenza si riporta un confronto tra le soluzioni simmetriche che vedono l'introduzione di pannelli in XPS di diverso spessore e il sandwich composto dagli stessi pannelli di legno accoppiati al grigliato, privo di discontinuità, con incollaggio in resina epossidica testato nella prima fase di sperimentazione.

Il primo confronto viene effettuato tra i provini I.2, II.1, II.2, II.3. Il provino I.2 è stato testato con prova monotona e presenta una sezione resistente simmetrica costituita da due pannelli multistrato di 9mm a cui è interposto un grigliato in PRFV, incollati con resina epossidica RC02. I provini II.1, II.2, II.3 presentano tutti la configurazione simmetrica dei pannelli multistrato lignei da 9mm di spessore. Le configurazioni variano in funzione del pannello interposto in XPS che sostituisce il grigliato che il cui spessore varia da 40mm a 60mm fino a 80mm nella configurazione con la sezione resistente più spessa.

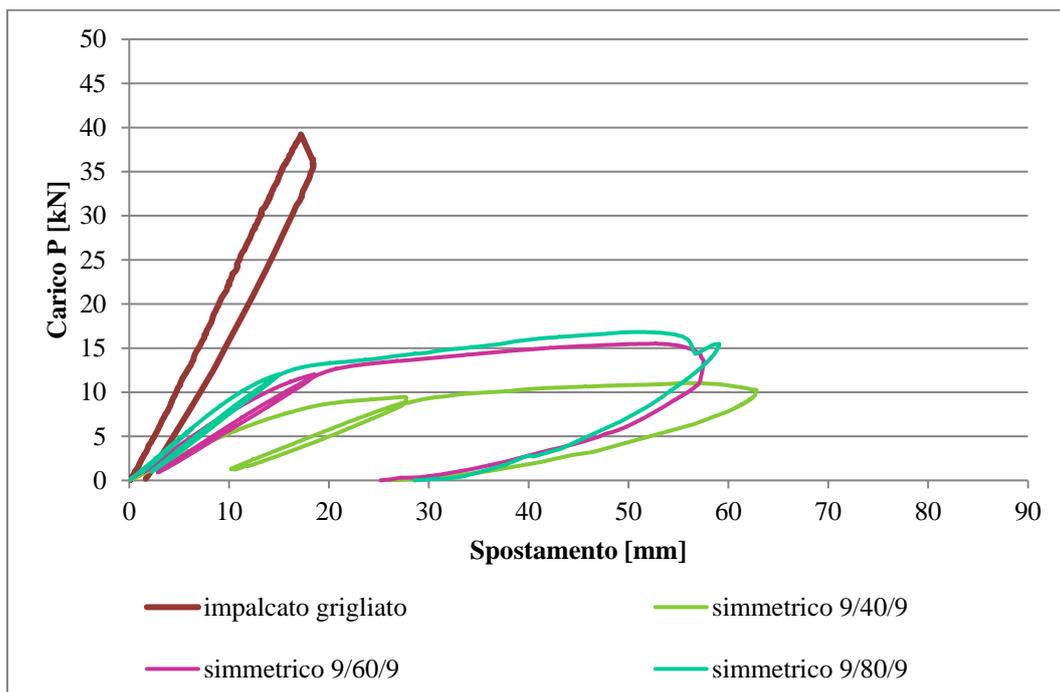


Figura 3-50 Confronto tra impalcato simmetrico con pannelli di legno di 9 mm e XPS di diverso spessore e impalcato con pannelli di legno di 9 mm e grigliato

Il grafico evidenzia che la rigidezza e la resistenza dell'impalcato contenente pannelli di polistirene siano nettamente inferiori a quelle dell'ipotesi progettuale originaria. Le rigidezze non raggiungono i valori calcolati teoricamente in conseguenza di fenomeni di punzonamento localizzati ascrivibili alla minore densità dell'XPS rispetto al grigliato in PRFV.

Il secondo confronto viene effettuato tra i provini I.2, II.4, II.5, II.6. Il provino I.2 è stato testato con prova monotona e presenta una sezione resistente simmetrica costituita da due pannelli multistrato di 9mm a cui è interposto un grigliato in PRFV, incollati con resina epossidica RC02. I provini II.4, II.5, II.6 presentano tutti la configurazione simmetrica dei pannelli multistrato lignei da 18mm di spessore. Le configurazioni variano in funzione del pannello interposto in XPS che

sostituisce il grigliato che il cui spessore varia da 40mm a 60mm fino a 80mm nella configurazione con la sezione resistente più spessa.

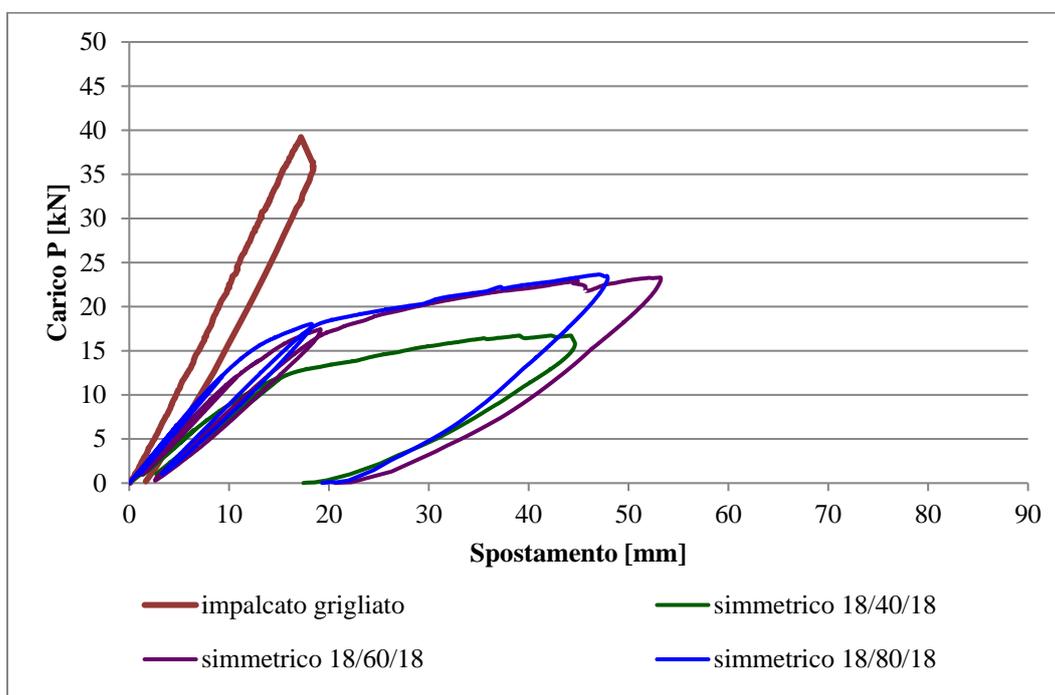


Figura 3-51 Confronto tra impalcato simmetrico con pannelli di legno di 18 mm e XPS di diverso spessore e impalcato con pannelli di legno di 9 mm e grigliato

Il grafico evidenzia che la rigidezza e la resistenza dell'impalcato contenente pannelli di polistirene siano nettamente inferiori a quelle dell'ipotesi progettuale originaria. Le rigidezze non raggiungono i valori calcolati teoricamente in conseguenza di fenomeni di punzonamento localizzati ascrivibili alla minore densità dell'XPS rispetto al grigliato in PRFV.

Questa seconda fase sperimentale, al contrario di quanto previsto per via analitica, ha dimostrato la necessità di mantenere il grigliato in PRFV quale elemento di interposizione tra i pannelli di legno multistrato.

Attraverso queste prove si è però potuto comprovare che all'aumentare dello spessore della sezione, modificando sia quello del legno sia dell'XPS, i valori di rigidezza e resistenza flessionale aumentano. Un aumento dello spessore del pannello di polistirene da 60 mm a 80 mm è risultato superfluo in quanto le due curve risultano in molti casi coincidenti.

Per quanto riguarda le configurazioni asimmetriche, si era ipotizzato nel corso dei test, che quella con il pannello da 9 mm all'intradosso potesse rispondere meglio alla sollecitazione in quanto le prove precedenti avevano dimostrato crisi per punzonamento nel pannello all'estradosso. Al contrario la configurazione descritta ha prodotto una rottura totale sia del pannello di legno che del

polistirene. L'altra tipologia di provini asimmetrici ha soddisfatto maggiormente le esigenze richieste. Questa infatti non ha generato il fenomeno del punzonamento in quanto la presenza di un pannello in legno di spessore elevato ha garantito una migliore distribuzione del carico. Allo stesso tempo non si è giunti alla rottura totale del pannello inferiore poiché lo spessore maggiore ha garantito deformazioni minori.

In generale, comunque, i riscontri ottenuti nel corso di questa sperimentazione avvalorano l'ipotesi di utilizzare il grigliato stampato in PRFV come core strutturale del pannello sandwich. Se non in termini di massimo sfruttamento delle caratteristiche di resistenza dei materiali, l'utilizzo del grigliato diventa determinante in termini di stabilità del pannello sandwich garantendo un mantenimento delle sezioni piane fino a rottura. Il grigliato, inoltre, contribuisce a garantire al pannello sandwich una riserva di risorse oltre il limite di rottura dei pannelli multistrato lignei. Il manifestarsi di rotture improvvise, con relativo collasso dell'impalcato, nei provini con core in XPS ne preclude l'utilizzo in situazioni reali.

### 3.4 III FASE DI SPERIMENTAZIONE

La presente ricerca si pone come principale obiettivo la valutazione della rigidità dell'impalcato e la limitazione flessionale grazie all'accoppiamento tra il grigliato e i pannelli multistrato in legno. Una volta portate a termine le prime due fasi di sperimentazione e analizzati i dati relativi si è voluta pianificare una ulteriore campagna di test di laboratorio per indagare con maggiore consapevolezza alcuni aspetti.

Determinata l'inefficacia di utilizzare un materiale meno performante del grigliato in PRFV per la composizione del pannello sandwich si sono volute indagare nuove configurazioni della sezione resistente operando un trasferimento dei pannelli lignei all'estradosso o all'intradosso del sistema.

Parallelamente, si è voluto valutare il tipo di incollaggio, all'interfaccia tra i suddetti materiali, che meglio incrementa le caratteristiche ricercate per l'impalcato. Dati i buoni riscontri ottenuti dalla resina epossidica si è voluto mettere a confronto questa tipologia di adesivo, piuttosto rigido una volta avvenuta la presa, con un adesivo più elastico quale un collante a base poliuretanic monocomponente. Purtroppo non è stato possibile continuare la sperimentazione con la resina RC02 della Betontex. Per ovviare a questo problema ci si è rivolti a Sika Italia che ha messo a disposizione i propri prodotti Biresin® cr82+Biresin® ch80 e Sikaflex 298-FC.

Tre sono le tipologie di prove effettuate:

- prove monotone, per testare la resistenza ultima e la rigidezza dell'impalcato,
- prove cicliche, per studiare l'eventuale presenza di residuo plastico,
- prove di resistenza a fatica, per valutare la risposta dell'impalcato dopo una condizione di stress accelerato.

Per questa fase sperimentale, avendo potuto riscontrare nelle sperimentazioni precedenti che i dati raccolti dal sistema DIC risultavano sempre congruenti con gli LVDT, si è deciso di equipaggiare i provini solo con questi ultimi. La disposizione degli LVDT è stata scelta per rilevare i dati più significativi e potersi confrontare con i provini testati nelle fasi precedenti (Figura 9-165).

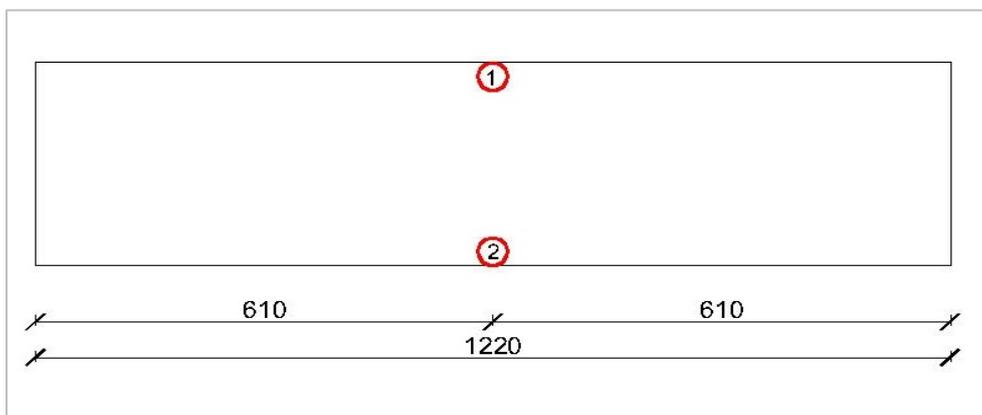


Figura 3-52 Disposizione dei trasduttori di spostamento WSF 2/50

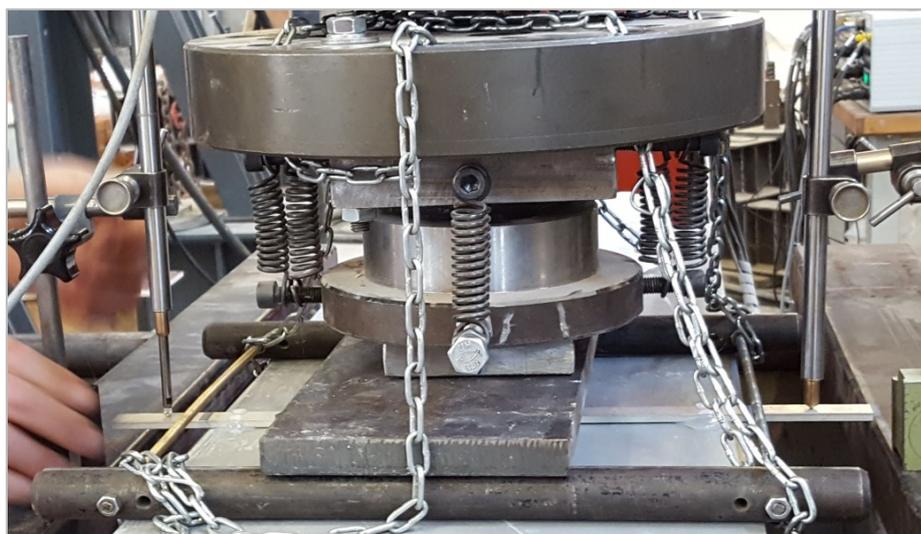


Figura 3-53 Installazione delle LVDT per il controllo degli spostamenti

Il corretto funzionamento dello strumento per la misurazione degli spostamenti del provino caricato, prevede l'installazione dei trasduttori su basi magnetiche a bracci regolabili. Le basi stesse sono state fissate alle guide laterali della pressa e i bracci regolati fino a trovare la corretta dislocazione dello strumento. La superficie di rilevazione dello spostamento consta di una barretta in alluminio fissata con della colla a caldo all'estradosso del provino.

### 3.4.1 CONFEZIONAMENTO PROVINI

Sono stati confezionati provini per 21 differenti configurazioni, a cui corrispondono le relative prove. Tali configurazioni differiscono in base alla tipologia d'incollaggio, alla discontinuità presente e alla simmetria della sezione dell'impalcato. Tutti i provini sono costituiti da due pannelli lignei da 9 mm, da un grigliato in vetroresina da 44 mm solidarizzati da un adesivo. Si differenziano per la tipologia di incollaggio scelto, per la composizione della sezione dell'impalcato e per le discontinuità presenti nel grigliato. Discorso a parte meritano i pannelli doppi che si distinguono per la dimensione totale del lato corto pari a due volte quella degli altri campioni. Differenza questa dovuta all'accostamento in senso longitudinale di due grigliati.



*Figura 3-54 Preparazione della macchina di prova da parte dei tecnici*

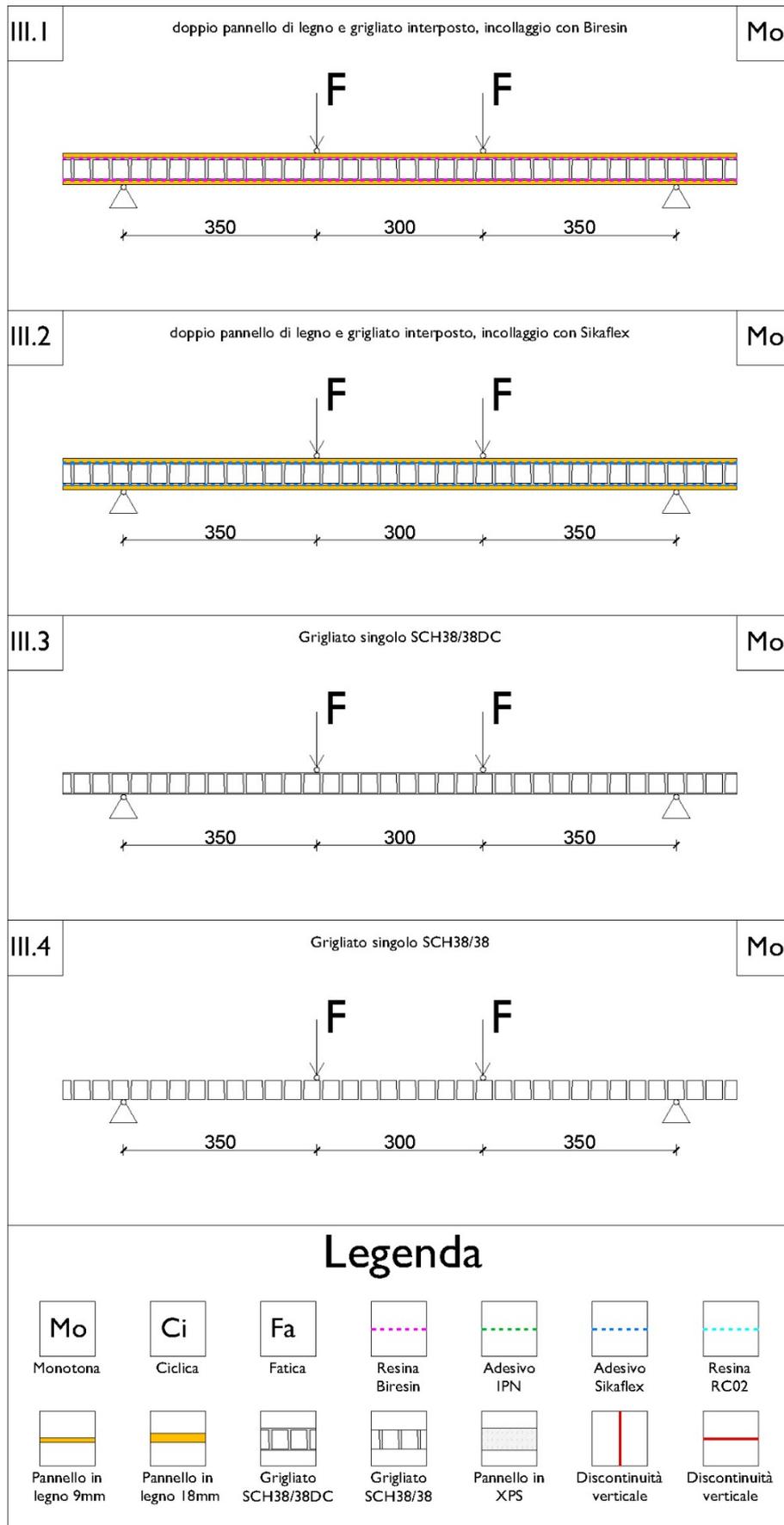


Figura 3-55 Prove monotone per sezione simmetrica

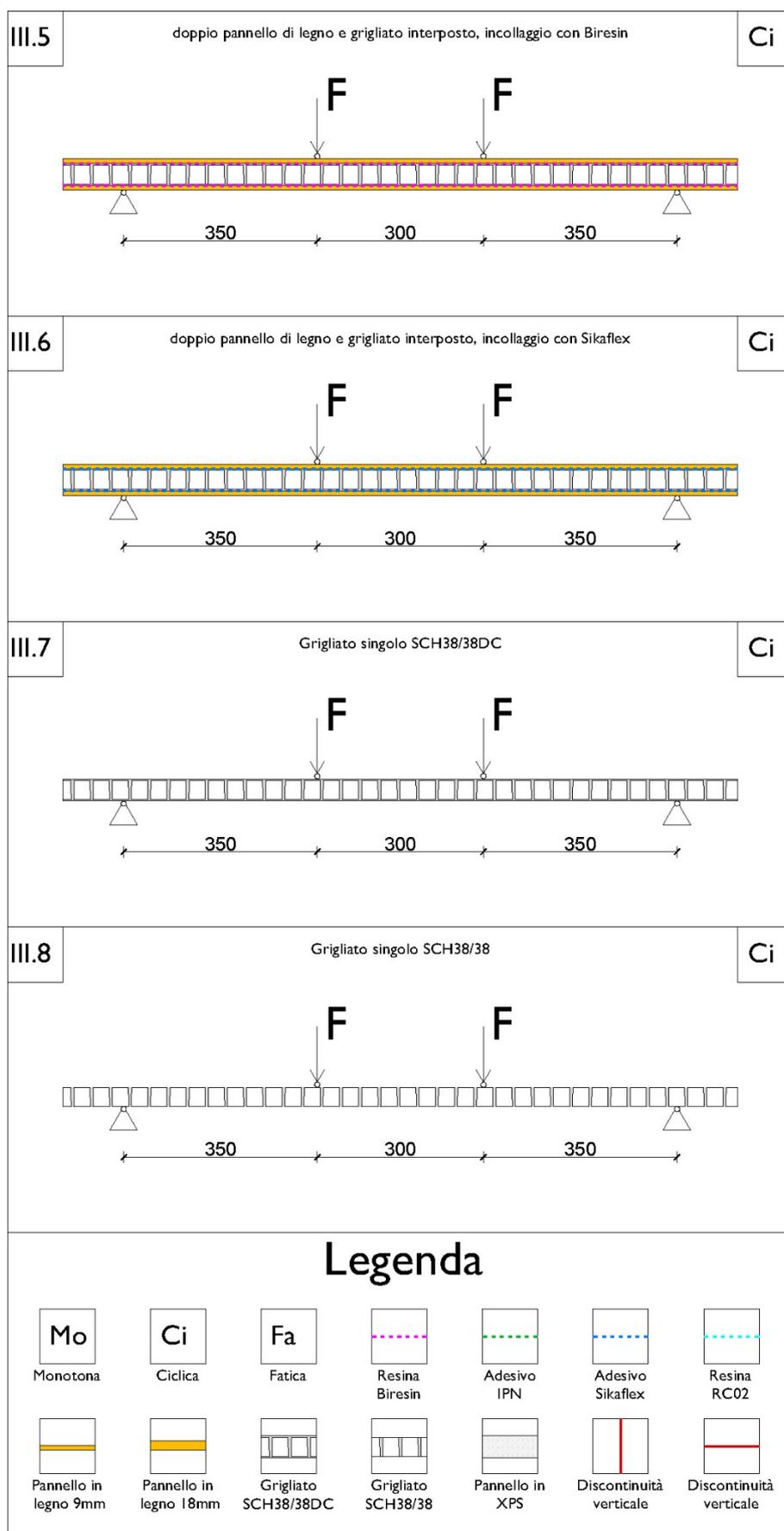


Figura 3-56 Prove cicliche per sezione simmetrica

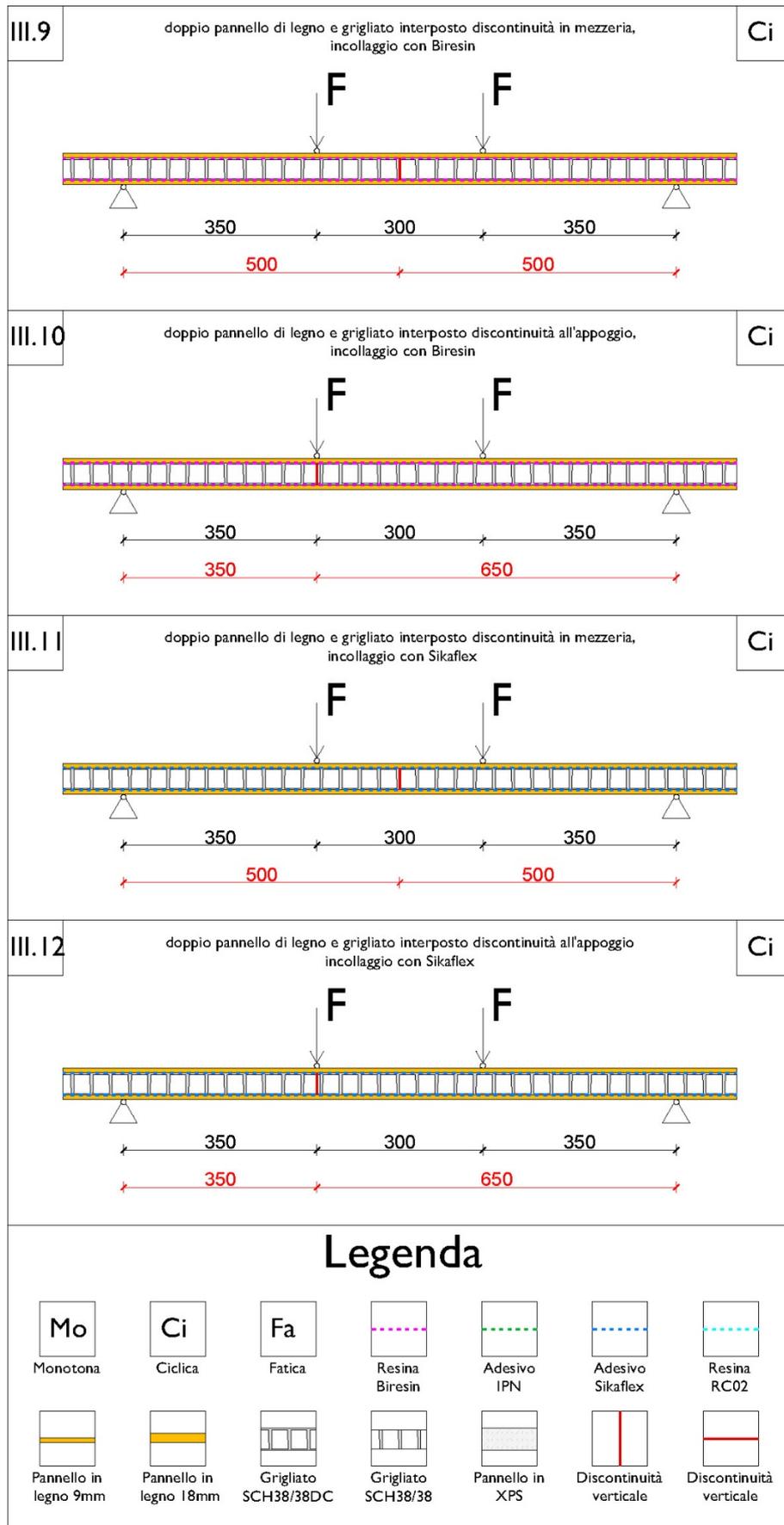


Figura 3-57 Prove cicliche per sezione simmetrica discontinua

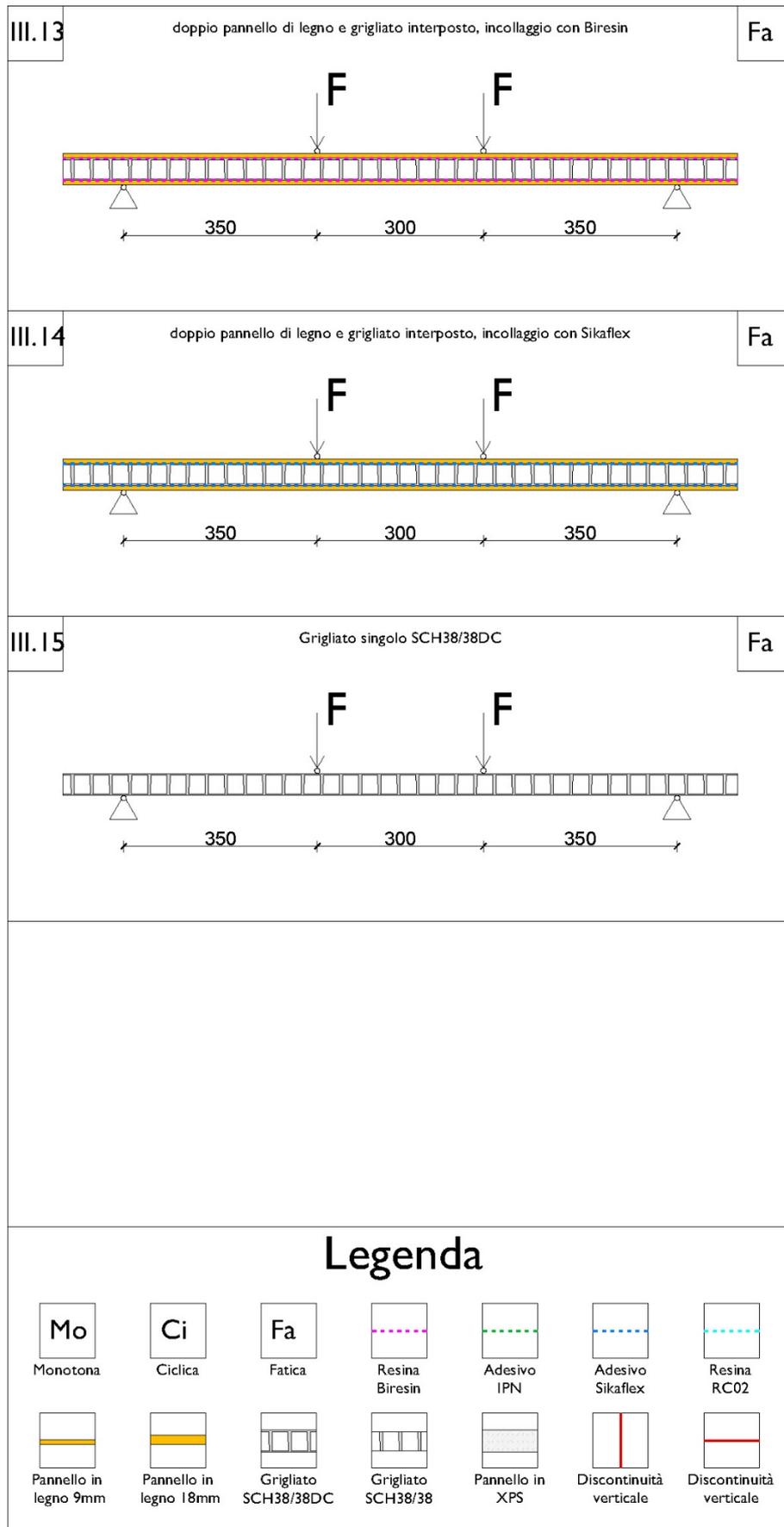


Figura 3-58 Prove di fatica per sezione simmetrica

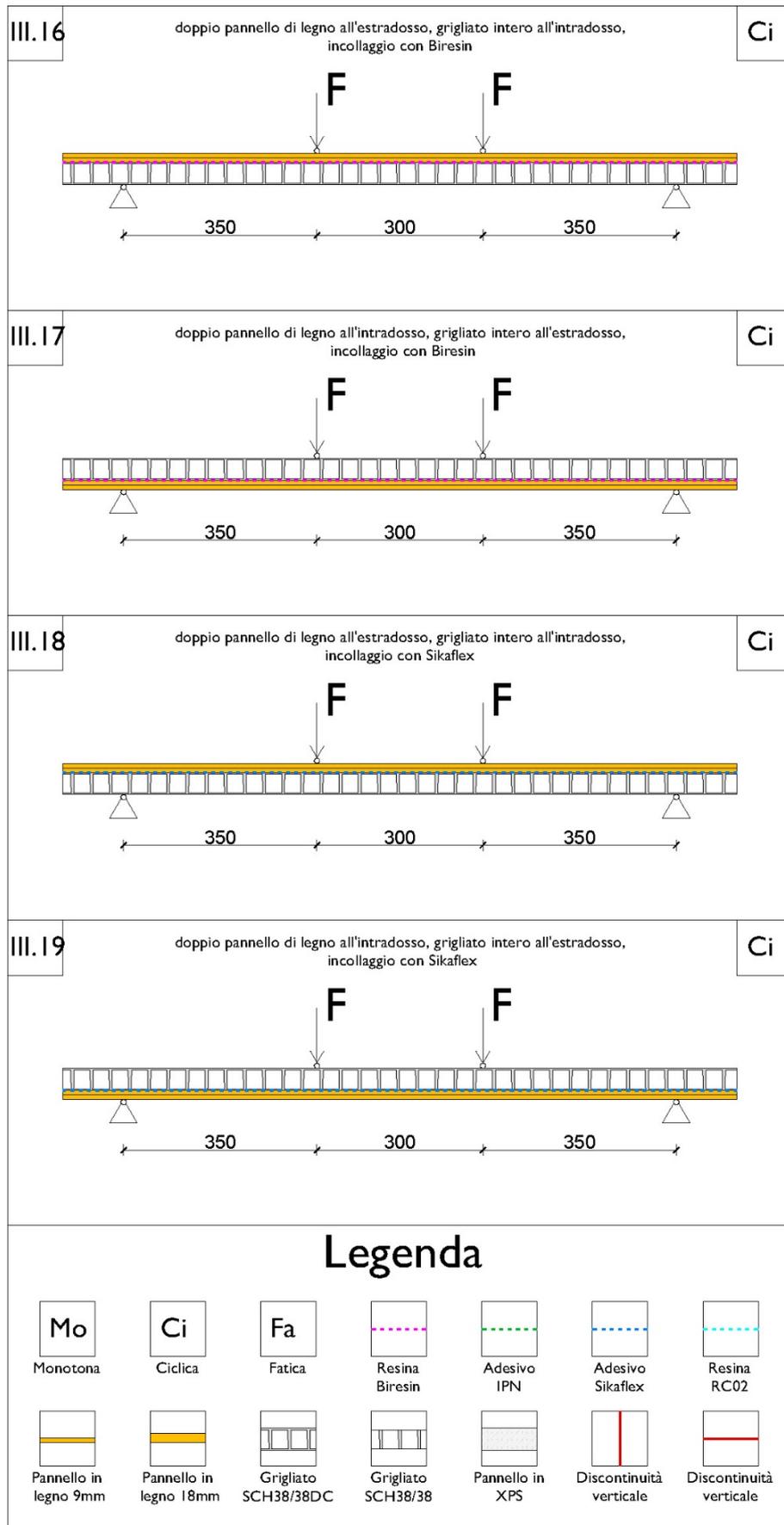


Figura 3-59 Prove cicliche per sezione asimmetrica

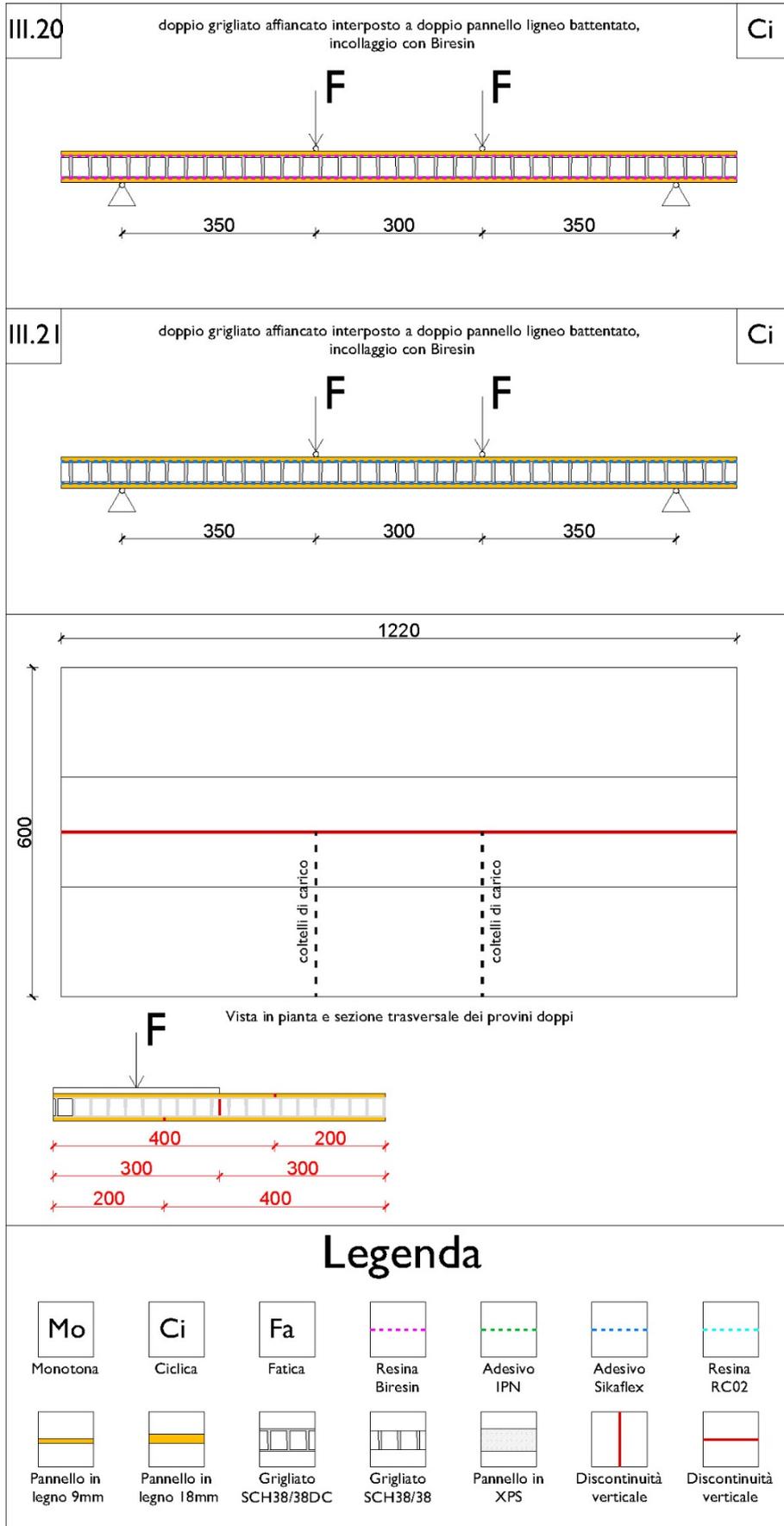


Figura 3-60 Prove cicliche per sezione simmetrica con pannello doppio

Le dimensioni sono sempre 1220x300 mm per adattarsi alla stessa macchina di prova e restituire risultati confrontabili. Il banco di prova, anche se configurato come nelle sperimentazioni precedenti, differisce per l'utilizzo di una cella di carico a controllo di spostamento che consente una migliore e più controllata applicazione delle sollecitazioni. I vari layers componenti sono assemblati in modo da rappresentare il più ampio spettro possibile di combinazioni. Si riportano nelle immagini che seguono le diverse configurazioni testate evidenziando anche le tipologie di prova a cui sono stati sottoposti (Figura 9-168, Figura 9-169, Figura 9-170, Figura 9-171, Figura 9-172, Figura 9-173).



Figura 3-61 Taglio del grigliato

Per prima cosa sono stati effettuati i tagli necessari nel pannello di grigliato, rispettivamente in mezzeria e lateralmente ad una distanza pari a 46 cm dal bordo esterno, per posizionare la discontinuità nel provino direttamente sotto il coltello di carico. Il taglio è stato effettuato con l'ausilio di una sega idraulica per garantire una maggiore precisione.

Per quel che concerne la lavorazione delle superfici, al fine di una migliore adesione all'interfaccia legno-grigliato, è stato previsto un trattamento di levigatura alla sola superficie liscia di ciascun grigliato mediante la macchina levigatrice orbitale. L'altra superficie, presentando un elevato livello di scabrosità, non ha richiesto alcun tipo di trattamento di finitura in quanto già predisposta appositamente dall'azienda.



Figura 3-62 Levigatura superfici

I tempi di maturazione, riportati in ciascuna scheda tecnica, sono di circa un giorno per la resina e di quattro per l'adesivo poliuretano. In via cautelativa i provini sono stati lasciati maturare per un intervallo di tempo superiore a quello consigliato.

Per quanto riguarda il confezionamento dei provini in resina possono essere individuate tre macro categorie in funzione della simmetria o asimmetria della sezione, della presenza o meno di discontinuità verticali nella sezione ed infine per il raddoppio del pannello con presenza di battentatura:



Figura 3-63 Stesura della resina

Il dosaggio dell'adesivo è stato calcolato in base alla densità prevista da scheda tecnica e ad un volume stimato per uno spessore dell'adesivo di circa 1 mm. In tal modo si è stabilito un metodo di misurazione riproducibile avendo così uno stesso identico quantitativo per tutti gli incollaggi.

Al fine di controllare l'equo dosaggio dell'adesivo, ciascun campione è stato pesato in laboratorio in seguito al confezionamento. Inoltre la resina è stata accuratamente distribuita attraverso rulli usa e getta su entrambi i lati da accostare insieme.

Per le configurazioni simmetriche si sono utilizzati due pannelli lignei di ugual spessore pari a 9 mm posizionati all'intradosso e all'estradosso del grigliato sia nella configurazione intera che in presenza di discontinuità. Tale discontinuità ha comportato un'ulteriore stesura della resina in corrispondenza del taglio per una migliore adesione tra le due porzioni di grigliato.

Per quanto riguarda le configurazioni asimmetriche si sono utilizzati due pannelli lignei da 9 mm incollati tra loro e successivamente al grigliato in corrispondenza dell'estradosso o dell'intradosso. Si parla di sezione asimmetrica in quanto in grigliato non è più interposto all'interno del tavolato.

Infine, nel caso di provini raddoppiati (dimensione 1220x600 mm) si prevede l'accostamento tra due grigliati all'interno di uno strato superiore e inferiore in legno. I pannelli lignei utilizzati hanno le stesse caratteristiche dei precedenti e spessore pari a 9 mm ma larghezza variabile tra 20 e 40 cm. In tal modo si vogliono sfalsare i punti di discontinuità tra legno e grigliato mediante la realizzazione di una “battentatura”.



Figura 3-64 Confezionamento provino con resina epossidica: e configurazione asimmetrica

Anche per quanto riguarda il confezionamento dei provini con adesivo poliuretano possono essere individuate tre macro categorie in funzione della simmetria o asimmetria della sezione, della presenza o meno di discontinuità verticali nella sezione ed infine per il raddoppio del pannello con presenza di battentatura:

Il dosaggio dell'adesivo è stato calcolato in base alla densità prevista da scheda tecnica e ad un volume stimato per uno spessore dell'adesivo di circa 3 mm. In tal modo si è stabilito un metodo di misurazione riproducibile avendo così uno stesso quantitativo per tutti gli incollaggi.

Al fine di controllare l'equo dosaggio dell'adesivo, ciascuno campione è stato pesato in laboratorio in seguito al confezionamento. Inoltre l'adesivo è stato accuratamente distribuito, mediante spatole lisce e dentellate, su entrambi i lati da accostare insieme.



*Figura 3-65 Stesura dell'adesivo poliuretano*

Per le configurazioni simmetriche si sono utilizzati due pannelli lignei interi di ugual spessore pari a 9 mm posizionati all'intradosso e all'estradosso del grigliato sia nella configurazione intera che in presenza di discontinuità. Tale discontinuità ha comportato un'ulteriore stesura del collante in corrispondenza del taglio per far meglio aderire le due porzioni di grigliato.

Per quanto riguarda le configurazioni asimmetriche si sono utilizzati due pannelli lignei da 9 mm incollati tra loro e successivamente al grigliato in corrispondenza dell'estradosso o

dell'intradosso. Si parla di sezione asimmetrica in quanto il grigliato non è più interposto all'interno del tavolato.

Infine, nel caso di provini raddoppiati (dimensione 1220x600 mm) si prevede l'accostamento tra due grigliati all'interno di uno strato superiore e inferiore in legno. I pannelli lignei utilizzati hanno le stesse caratteristiche dei precedenti e spessore pari a 9 mm ma larghezza variabile tra 20 e 40 cm. In tal modo si vogliono sfalsare i punti di discontinuità tra legno e grigliato mediante la realizzazione di una “battentatura”.



Figura 3-66 Stesura dell'adesivo poliuretano e confezionamento di un provino con discontinuità

### 3.4.2 RACCOLTA DATI

Le attività di laboratorio inerenti alla terza fase di sperimentazione si sono svolte nel periodo compreso tra gennaio e febbraio 2016 presso il laboratorio LISG alla presenza dei tecnici Roberto Carli e Mario Marcolongo e con la collaborazione dell'ingegnere Marika Marianelli.

La macchina di prova è stata allestita sul telaio prova travi MTS a controllo di spostamento. (paragrafo 3.1.1). Le schede dettagliate delle prove sono raccolte in appendice<sup>5</sup> e qui se ne riportano i dati significativi. (Tabella 3-4)

N°	Descrizione provino	tipologia prova	f max	P max	f rif	P rif	EJ medio
			(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
III.1	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	Monotona	22,90	32,88	3,64	5,00	25,153
III.2	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	Monotona	60,54	41,88	6,58	5,00	13,909
III.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	Monotona	59,60	36,85	7,20	5,00	12,712
III.4	Grigliato singolo SCH38/38	Monotona	99,50	8,91	42,68	5,00	2,144
III.5	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	Ciclica	21,76	34,11	3,06	5,00	29,919
III.6	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	Ciclica	52,72	38,82	5,37	5,00	17,042
III.7	Grigliato singolo SCH38/38DC	Ciclica	62,50	40,21	6,20	5,00	14,764
III.8	Grigliato singolo SCH38/38	Ciclica	97,90	10,55	37,95	5,00	2,411
III.9	doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con Biresin	Ciclica	9,60	11,73	3,77	5,00	24,255
III.10	doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità all'appoggio, incollaggio con Biresin	Ciclica	9,95	12,98	3,45	5,00	26,555
III.11	doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con Sikaflex	Ciclica	46,97	7,19	30,77	5,00	2,974
III.12	doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità all'appoggio, incollaggio con Sikaflex	Ciclica	28,78	5,29	26,50	5,00	3,453
III.13	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	Fatica	64,33	33,35	7,08	5,00	12,928
III.14	doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	Fatica	13,59	14,21	4,95	5,00	18,481
III.15	Grigliato singolo SCH38/38DC	Fatica	14,44	7,30	9,48	5,00	9,655
III.16	doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin	Ciclica	53,58	48,79	3,78	5,00	24,239
III.17	doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin	Ciclica	20,27	30,41	3,89	5,00	23,525
III.18	doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex	Ciclica	56,58	44,19	6,20	5,00	14,765
III.19	doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex	Ciclica	54,19	42,15	6,23	5,00	14,690

Tabella 3-4 Risultati II fase di sperimentazione

Nella tabella sono stati inseriti, la freccia massima a rottura  $f_{max}$  di tutti i provini in corrispondenza del carico di rottura  $P_{max}$ . Ai fini del calcolo della rigidità media viene anche riportato il valore della freccia di riferimento  $f_{rif}$  in corrispondenza del carico convenzionale preso a riferimento  $P_{rif} = 5$  kN

In questa fase di sperimentazione sono stati anche eseguiti due test su provini doppi per verificare il comportamento collaborante dell'impalcato. Data la particolarità di questi test si riportano solamente i dati relativi alla freccia massima a rottura  $f_{max}$  per ciascuno dei 3 LVDT in corrispondenza del carico di rottura  $P_{max}$ . (Tabella 3-5)

N°	Tipologia provino		f max1	f max2	f max3	P max
	<b>III fase di sperimentazione</b>	<b>tipologia prova</b>	(mm)	(mm)	(mm)	(kN)
<b>III.20</b>	doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Sikaflex	Ciclica	12,40	18,68	33,91	47,38
<b>III.21</b>	doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Biresin	Ciclica	12,00	25,15	56,97	49,10

Tabella 3-5 Risultati II fase di sperimentazione. Provini doppi.

<sup>1</sup> Con il termine speckle imaging (letteralmente "creare immagini a partire da macchie") si indica in astronomia una grande varietà di tecniche osservative ad alta qualità basate su varie tecnologie, tra cui lo shift-and-add (chiamata anche image stacking) o l'interferometria a macchie.

<sup>2</sup> Michael A. Sutton, Jean Jose Orteu, e Hubert Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, 2009 edition (New York, N.Y.: Springer, 2009).

<sup>3</sup> I dati completi relativi alle prove di carico svolte nella prima fase di sperimentazione sono raccolti in appendice nel paragrafo B. TEST DI LABORATORIO a pagina 560

<sup>4</sup> I dati completi relativi alle prove di carico svolte nella seconda fase di sperimentazione sono raccolti in appendice nel paragrafo B. TEST DI LABORATORIO a pagina 608

<sup>5</sup> I dati completi relativi alle prove di carico svolte nella terza fase di sperimentazione sono raccolti in appendice nel paragrafo B. TEST DI LABORATORIO a pagina 641

## 4 ANALISI DEI DATI

Le fasi sperimentali in laboratorio hanno costituito un momento importante per migliorare la comprensione del funzionamento e delle capacità dell'impalcato sandwich INTEGRO FS PRFV. Il percorso seguito ha già portato ad effettuare l'analisi ed il confronto di alcuni dati sperimentali. L'analisi dei dati della seconda fase, in cui è stata testata una composizione di impalcato con il polistirene estruso al posto del grigliato stampato in PRFV, ha chiaramente mostrato come questa soluzione non sia praticabile, sancendo l'importanza fondamentale del grigliato stampato come core strutturale del sistema.

A questo punto occorre analizzare complessivamente i dati forniti da tutte le fasi sperimentali in modo da poter effettuare le determinanti scelte progettuali in merito ai componenti del sistema, alla loro configurazione e al metodo di incollaggio.

Verranno valutate la rigidità e la deformazione delle tipologie di impalcato proposto in contemporanea con alcune considerazioni normative per la verifica flessione. Una volta effettuate le scelte, supportate da evidenze sperimentali, verrà proposta una stratigrafia di completamento per l'impalcato che ne consenta l'utilizzo come orizzontamento intermedio sia all'interno del modulo INTEGRO BS 400 sia in interventi di recupero su solai esistenti. In ultimo verranno proposte alcune modalità di messa in opera per valutarne la fattibilità tecnica.

### 4.1 OSSERVAZIONI PRELIMINARI

Prima di procedere con l'analisi dei dati acquisiti per effettuare confronti e valutazioni sulle caratteristiche di resistenza e rigidità delle configurazioni testate è opportuno fare alcune considerazioni in merito al confezionamento dei provini stessi. Tutti i 21 provini sono stati confezionati in laboratorio con le stesse identiche modalità nell'arco di 10 giorni consecutivi.

Per una corretta e precisa valutazione dei test effettuati si riporta una tabella (*Tabella 10-1*) in cui vengono riportati i tempi di maturazione dei provini. L'analisi del confezionamento è propedeutico affinché eventuali scollamenti o comportamenti anomali dei materiali possano essere ben interpretati. Nella tabella si registrano anche i pesi di ogni singolo campione dopo la prova per verificare che non si manifestino sostanziali differenze che sarebbero da attribuire ad uno scarso apporto di adesivo.

N° PROVINO	GIORNI DI MATURAZIONE	PESO TEORICO	PESO REALE	DIFFERENZA PESO
III.1	6	15,382	15,331	-0,3
III.2	4	17,212	17,311	0,6
III.3	/	/	11,393	
III.4	/	/	6,198	
III.5	5	15,382	15,545	1,1
III.6	4	17,212	17,128	-0,5
III.7	/	/	11,393	
III.8	/	/	6,198	
III.9	11	15,382	15,258	-0,8
III.10	11	15,382	15,289	-0,6
III.11	10	17,212	18,253	6,0
III.12	11	17,212	17,100	-0,7
III.13	/	/	11,393	
III.14	5	15,382	15,515	0,9
III.15	11	17,212	17,032	-1,0
III.16	5	16,297	16,538	1,5
III.17	5	16,297	16,469	1,1
III.18	2	15,382	15,161	-1,4
III.19	2	15,382	15,040	-2,2
III.20	5	30,765	29,832	-3,0
III.21	5	34,425	33,702	-2,1

Tabella 4-1 Tabella dei pesi e del confezionamento

La differenza percentuale tra peso reale e teorico varia con un errore compreso tra lo 0,3% e 3% eccetto un caso in cui si registra un valore al 6%. Il dato anomalo riguarda il provino III.11 che presenta il grigliato discontinuo in mezzeria confezionato con adesivo poliuretano. La differenza è quindi da attribuire ad un maggiore quantitativo di colla applicata per ripristinare la continuità.

Durante le varie prove, si è verificato un fenomeno di scollamento tra pannello multistrato ligneo e grigliato in corrispondenza dell'estradosso nel campione III.9. Dai dati, si nota che il peso reale del provino è di poco superiore a quello teorico. Questo ci dimostra che il problema non è legato alla quantità di resina utilizzata ma più facilmente ad una carenza di peso sufficiente a garantirne l'adesione durante la fase di stoccaggio. Si tratta dell'unico fenomeno di scollamento riscontrato e si può di conseguenza affermare come la fase di confezionamento dei provini non abbia inciso sull'esito dei test sperimentali.

---

## 4.2 ELABORAZIONE E CONFRONTO DEI DATI SPERIMENTALI

---

Effettuate tutte le prove, estrapolati ed elaborati i risultati, è possibile metterli in relazione tra loro per definire le caratteristiche dell'impalcato nelle diverse configurazioni. Avendo confrontato già le soluzioni contenenti l'XPS al posto del grigliato in PRFV e avendo evidenziato come questa soluzione non sia particolarmente performante, si è proceduto a dei confronti sia in orizzontale tra provini realizzati con il grigliato.

Sono state confrontate fra loro le nuove configurazioni realizzate con gli adesivi utilizzati nella III fase sperimentale che sono successivamente state messe a confronto con quelle della I fase sperimentale. Sono poi state fatte alcune considerazioni in merito alle configurazioni asimmetriche per verificare le variazioni prestazionali ottenute mediante una ottimizzazione della sezione resistente. In ultimo sono stati analizzati i dati dei provini doppi per confermare l'utilità della battentatura dei pannelli per il ripristino della continuità strutturale nei punti di giunzione tra pannelli adiacenti.

---

### 4.2.1 CONFRONTO PROVE CON SEZIONE SIMMETRICA

---

Il primo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.1, III.2, III.3, III.4. Si tratta delle prove monotone realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. L'andamento delle curve carico-spostamento delle quattro configurazioni a confronto, mostra quattro pendenze differenti.

Si evidenzia una graduale crescita di rigidità che passa attraverso le configurazioni messe a confronto. Partendo dal grigliato aperto si nota un primo significativo aumento di rigidità rispetto al grigliato chiuso. Nella configurazione del pannello sandwich completo, l'adesivo poliuretano, presentando un elevato grado di elasticità, contribuisce ad un comportamento intermedio tra il solo grigliato chiuso e il pannello confezionato con resina. L'incremento di rigidità potenzialmente apportato dal legno, è sfavorito dall'adesivo che, grazie al carattere fortemente elastico, permette uno scorrimento reciproco tra del legno e grigliato.

Nella configurazione con resina si assiste ad un notevole aumento della rigidità totale, sebbene la crisi si registra ad un carico inferiore. Questo perché si considera la crisi del provino quando uno degli elementi componenti giunge alla rottura, in questo caso il pannello multistrato ligneo.

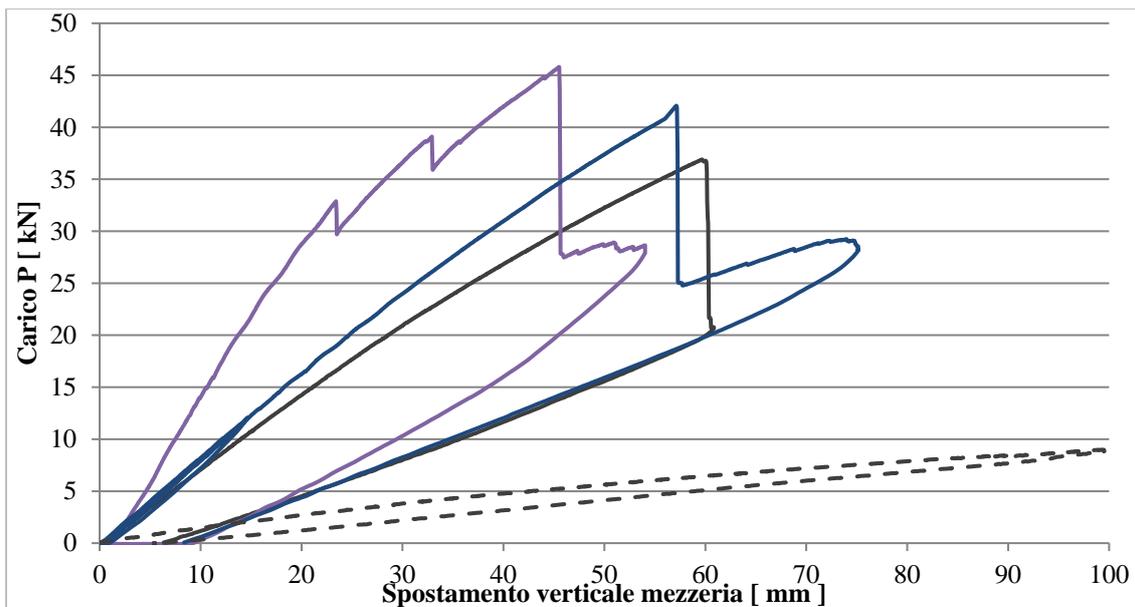


Figura 4-1 Prove monotone su impalcato completo a sezione simmetrica senza discontinuità e grigliato singolo chiuso e aperto

Legenda:

- Provino III.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova monotona
- Provino III.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova monotona
- Provino III.3 Grigliato chiuso SCH38/38\_DC, prova monotona
- - - Provino III.4 Grigliato aperto SCH38/38, prova monotona

Le quattro prove monotone dimostrano che la tipologia di incollaggio migliore ai fini della rigidità, è quella con la resina epossidica. Ciò è vero se consideriamo la rottura del legno come crisi dell'intero impalcato. Infatti, continuando a caricare il campione oltre tale rottura si può valutare un abbassamento di rigidità pari al 60%. Al contrario, in termini di carico massimo, i provini con adesivo poliuretano raggiungono valori maggiori sebbene a spese di una maggiore deformazione.

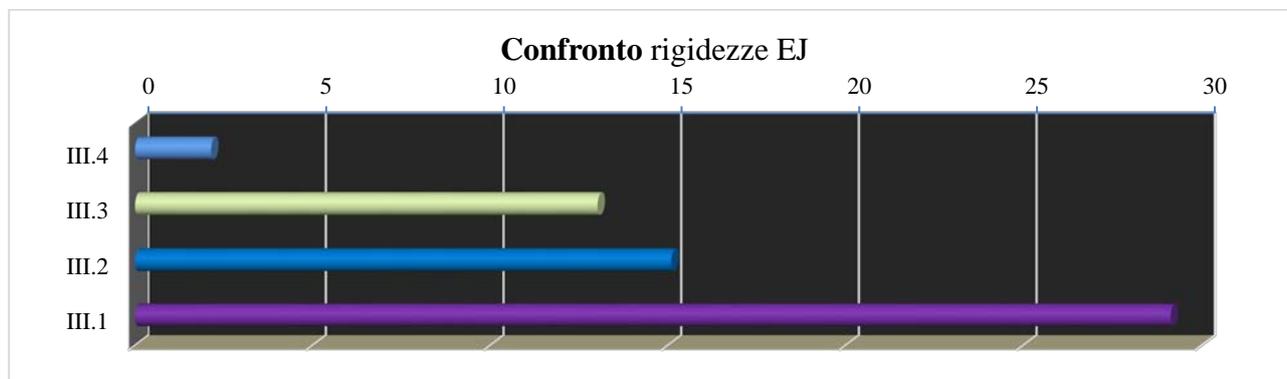


Figura 4-2 Valori della rigidità al variare della configurazione e dell'adesivo.

Complessivamente si può affermare che un incremento sostanziale di rigidità dell'impalcato si verifica nel passaggio tra grigliato singolo aperto e chiuso. La presenza delle chiusure inferiori e superiori infatti comportano un aumento pari a 7 volte. Inserendo il legno mediante collante a base poliuretanica si un'ulteriore crescita di rigidità pari al 16% che può diventare un 90% sostituendo al poliuretano la resina. Il grafico delle rigidità rappresenta il valore della rigidità nelle quattro configurazioni mostrandone l'incremento percentuale (Figura 4-2).

Il secondo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.1 e III.5. Si tratta della prova monotona e ciclica realizzata sulle due configurazioni simmetriche testate con l'incollaggio realizzato mediante resina.

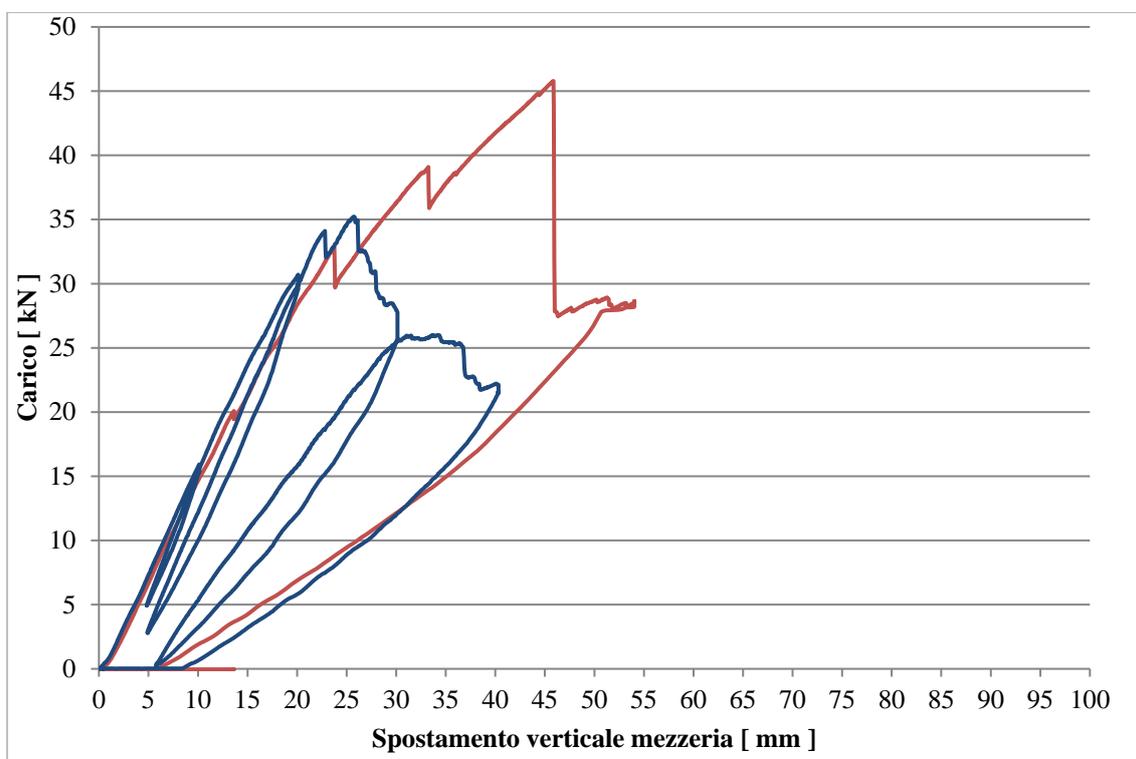


Figura 4-3 Prova ciclica e monotona su impalcato completo a sezione simmetrica con resina epossidica

Legenda:

- Provino III.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova monotona
- Provino III.5 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova ciclica

L'andamento delle curve carico-spostamento delle prove monotona e ciclica è perfettamente sovrapposto nella fase iniziale ma si inizia ad evidenziare un discostamento intorno ai 15 kN. Il residuo plastico ottenuto dalla prova ciclica è pari a 5 mm che diventano 9 mm nell'ulteriore tentativo di ricarica post crisi. Per valori di carico inferiori ai 5 kN, si calcola un residuo minimo pari a 2 mm.

Nel confronto tra le due prove si nota una rottura differente. Se in quella monotona si assiste a differenti momenti di rottura per legno e grigliato, nella ciclica avvengono a distanze di tempo molto ravvicinate. Segno questo, di una maggior collaborazione tra i materiali componenti l'impalcato.

Per carichi elevati oltre quelli di utilizzo, il materiale si comporta in maniera plastica senza raggiungere una fase di snervamento ben definita. In riferimento ai valori di utilizzo di un solaio, non solo per carichi di civile abitazione ma anche per ambienti suscettibili di affollamento, la soglia di interesse fissata a 5 kN, al di sotto del quale il residuo plastico è pari a 2 mm. L'impalcato cioè si plasticizza sin dalla fase di carico iniziale ma ancora nel rispetto dei limiti imposti da normativa.

Il terzo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.2 e III.6. Si tratta della prova monotona e ciclica realizzata sulle due configurazioni simmetriche testate con l'incollaggio realizzato mediante adesivo poliuretano.

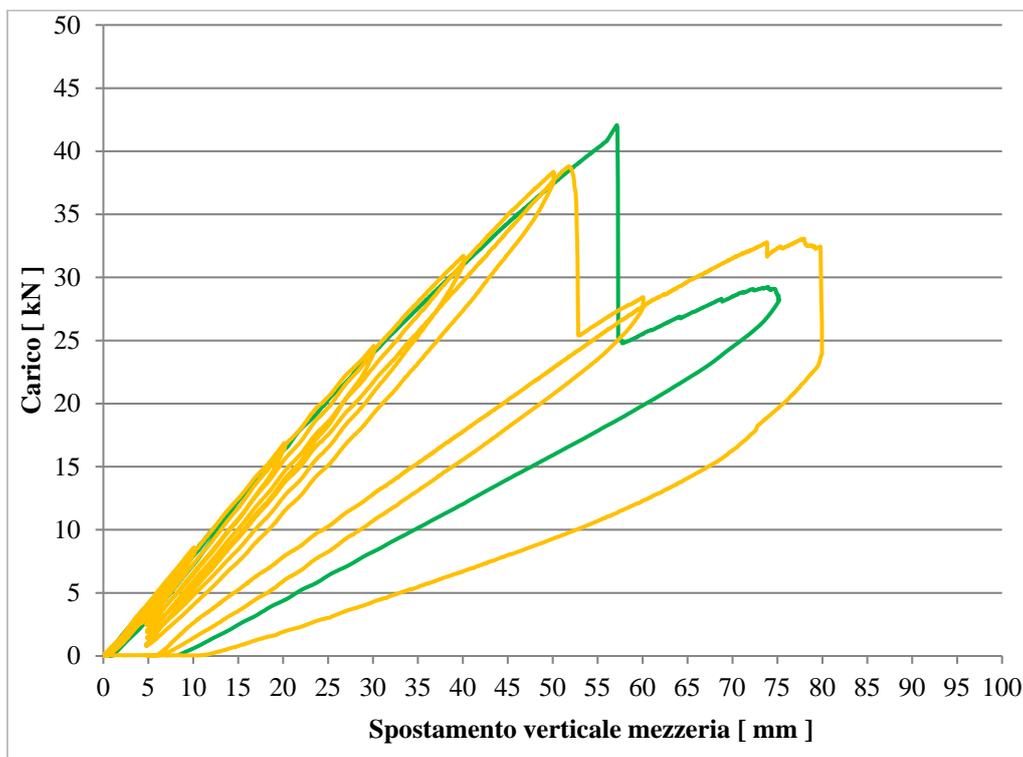


Figura 4-4 Prova ciclica e monotona su impalcato completo a sezione simmetrica con adesivo poliuretano

Legenda:

- Provino III.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova monotona
- Provino III.6 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Come nel caso precedente, l'andamento delle curve nella prova monotona e nella ciclica, sono perfettamente sovrapposte quasi fino alla rottura. Il numero dei cicli raggiunti, pari al doppio del caso

precedente, comporta un residuo maggiore pari a circa 8 mm. In entrambi i casi si riscontra la rottura inferiore dei travetti del grigliato.

Nella prova monotona, la rottura, avvenuta per valori di carico superiori, mostra una limitata fase di snervamento del materiale subito prima della crisi dell'impalcato. Non si può affermare lo stesso per la prova ciclica.

In riferimento ai valori di utilizzo di un solaio, non solo per carichi di civile abitazione ma anche per ambienti suscettibili di affollamento, la soglia di interesse è fissata a 5 kN, limite al di sotto del quale il residuo plastico è pari a 1 mm. L'impalcato cioè si comporta come un materiale elastico che riprende la conformazione originaria quando si elimina il carico nel pieno rispetto dei limiti imposti da normativa.

Il quarto confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.3 e III.7. Si tratta della prova monotona e ciclica realizzata sulle due configurazioni simmetriche testate con il grigliato SCH38/38\_DC nella sua configurazione di fabbrica.

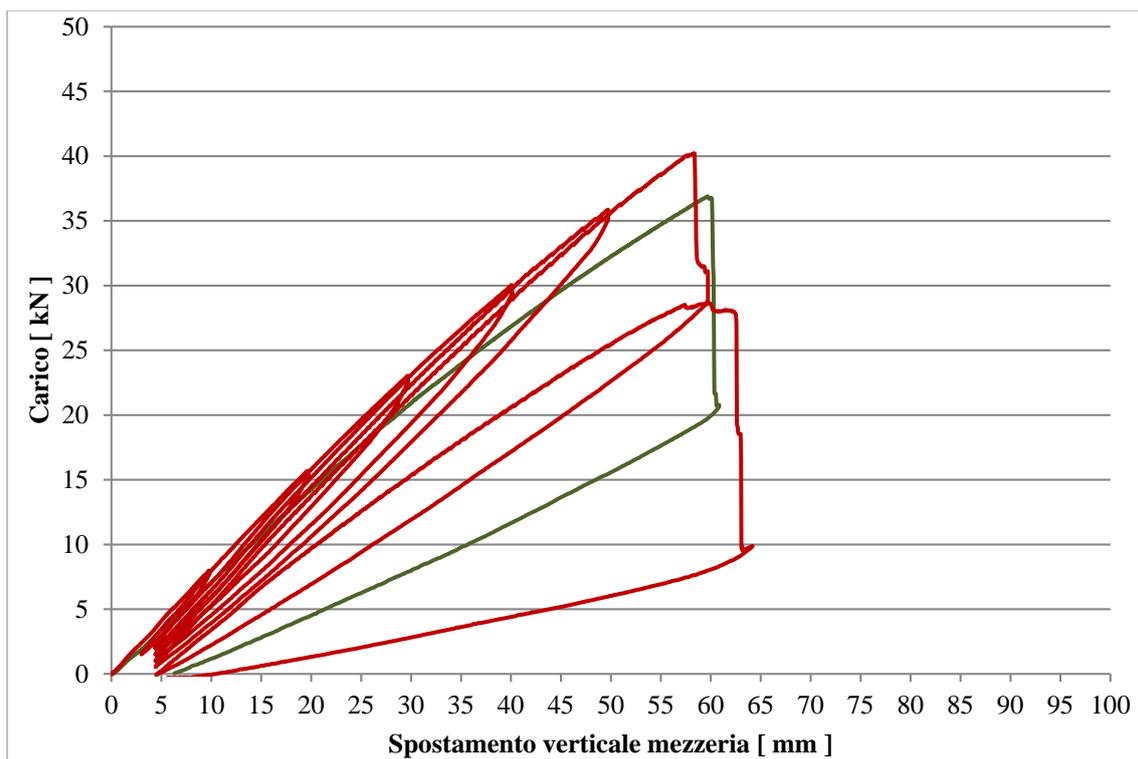


Figura 4-5 Prova ciclica e monotona su grigliato singolo chiuso senza discontinuità

Legenda:

- Provino III.3 Grigliato chiuso SCH38/38\_DC, prova monotona
- Provino III.7 Grigliato chiuso SCH38/38\_DC, prova ciclica

Nel caso del grigliato singolo, l'andamento delle curve non è perfettamente sovrapposto. È evidente la variazione di pendenza sebbene il carico di rottura e la deformazione ultima presentino valori confrontabili. Ciò può essere dovuto alla morfologia del grigliato stesso e al punto in cui è stato effettuato il taglio del pannello.

Il residuo plastico ottenuto dalla prova ciclica è confrontabile con il provino incollato con adesivo poliuretano, circa 9 mm. Per questo motivo, ai fini della riduzione di tale residuo nell'impalcato, la scelta di un collante elastico non valorizza il contributo irrigidente del pannello ligneo.

Il quinto confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.9 e III.11. Si tratta delle prove cicliche realizzata sulle due configurazioni simmetriche che presentano entrambe la discontinuità verticale in mezzzeria. Il primo è realizzato incollando i pannelli di legno con la resina epossidica, il secondo è realizzato con l'incollaggio mediante adesivo poliuretano.

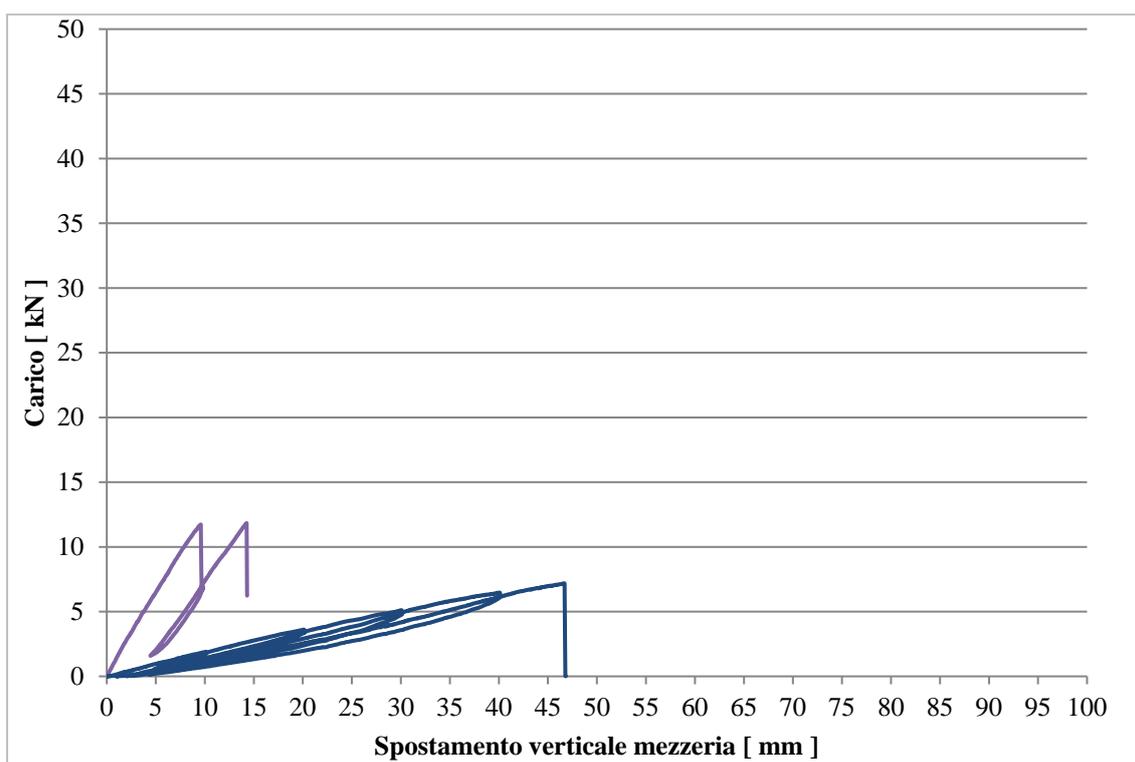


Figura 4-6 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità in mezzzeria

Legenda:

- Provino III.9 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzzeria, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.11 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzzeria, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

I due provini, confezionati rispettivamente con la resina epossidica e con l'adesivo poliuretano, mostrano comportamenti totalmente differenti. Nel primo caso si raggiungono bassi valori di carico e deformazioni inferiori ai 10 mm, con rottura totale del provino senza raggiungere la conclusione del primo ciclo di carico. Nel secondo caso, il carico cresce molto lentamente a spese di importanti deformazioni. Ciò comporta valori di rigidezza minimi.

Sebbene le risposte dei campioni siano difformi, la presenza di discontinuità nella mezzeria del grigliato, comporta per entrambe le situazioni una condizione gravosa per l'impalcato in cui il contributo del grigliato alla resistenza del pannello sandwich è nullo. Tutti gli sforzi si concentrano nel pannello multistrato in legno.

I carichi raggiunti sono tuttavia superiori a quelli di esercizio e di rottura sebbene troppo vicini da una condizione di utilizzo in sicurezza.

Il sesto confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.10 e III.12. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle due configurazioni simmetriche che presentano entrambe la discontinuità verticale all'appoggio. Il primo è realizzato incollando i pannelli di legno con la resina epossidica, il secondo è realizzato con l'incollaggio mediante adesivo poliuretano.

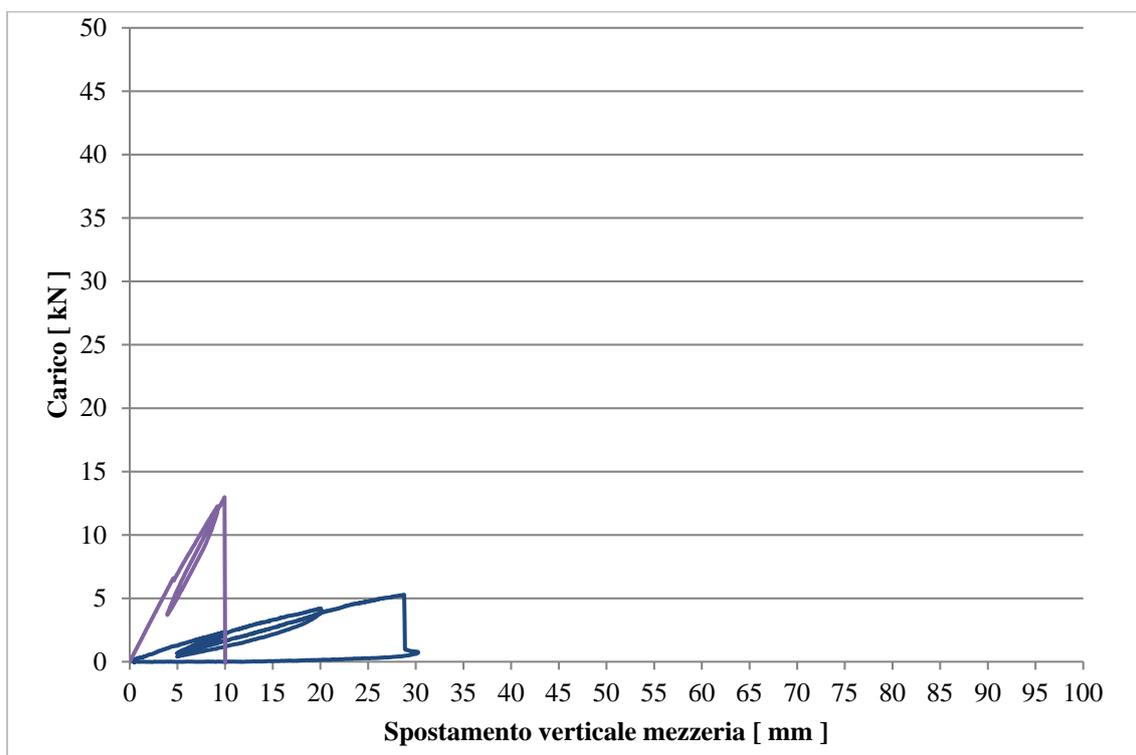


Figura 4-7 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità laterale

Legenda:

— Provino III.10 doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità all'appoggio, incollaggio con Biresin, prova monotona

— Provino III.12 doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità all'appoggio, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Anche nel seguente caso, i due provini, incollati rispettivamente con resina e adesivo poliuretanico, mostrano comportamenti totalmente differenti raggiungendo bassi valori di carico e basse deformazioni nel primo caso, e deformazioni importanti con carichi minimi nel secondo. Ciò comporta valori di rigidità molto bassi.

Sebbene le risposte dei campioni siano difformi, la presenza di discontinuità lateralmente nel grigliato, comporta per entrambe le situazioni una condizione gravosa per l'impalcato in cui il contributo del grigliato alla resistenza del pannello sandwich è nullo. Tutti gli sforzi si concentrano nel pannello multistrato in legno.

I carichi raggiunti sono tuttavia superiori a quelli di esercizio e di rottura sebbene lontani da una condizione di utilizzo in sicurezza.

Il settimo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.1, III.5, III.9, III.10. Si tratta delle prove monotone e cicliche realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. Questa analisi mette a confronto tutte le configurazioni simmetriche realizzate con l'incollaggio effettuato con la resina epossidica Biresin.

Dal confronto tra i grafici delle configurazioni simmetriche con grigliato intero, con discontinuità in mezzera e laterale, si evince che la presenza di discontinuità incide notevolmente sulle prestazioni dell'impalcato, in particolare il carico di rottura diminuisce sensibilmente di circa il 60%. Allo stesso tempo, la posizione della discontinuità non incide sul valore del carico di rottura.

Ai fini dell'utilizzo del solaio, la parte di maggior interesse del grafico risulta essere quella iniziale. Nelle quattro prove si nota un comportamento molto simile, indipendentemente dalla presenza delle discontinuità, per quanto riguarda la rigidità.

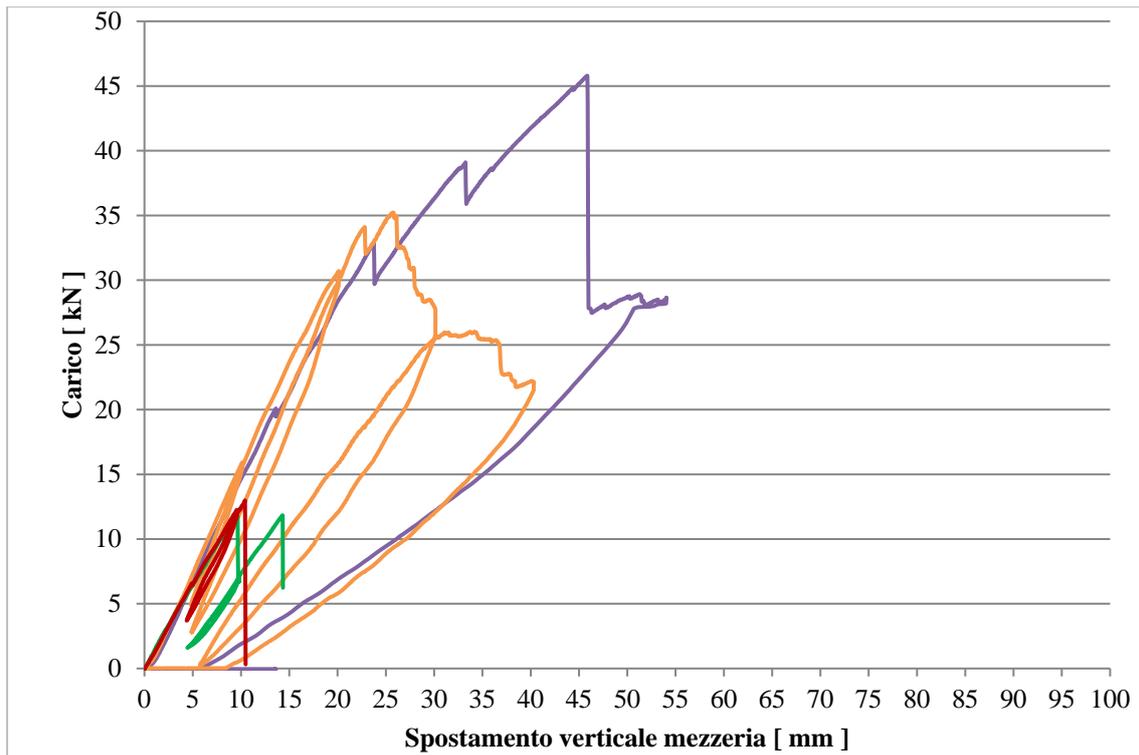


Figura 4-8 • Prova monotona e ciclica su impalcato con resina epossidica nelle diverse configurazioni

Legenda:

- Provino III.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova monotona
- Provino III.5 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.9 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.10 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità all'appoggio, incollaggio con Biresin, prova ciclica

L'ottavo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.2, III.6, III.11, III.12. Si tratta delle prove monotone e cicliche realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. Questa analisi mette a confronto tutte le configurazioni simmetriche realizzate con l'incollaggio effettuato con l'adesivo a base poliuretana Sikaflex.

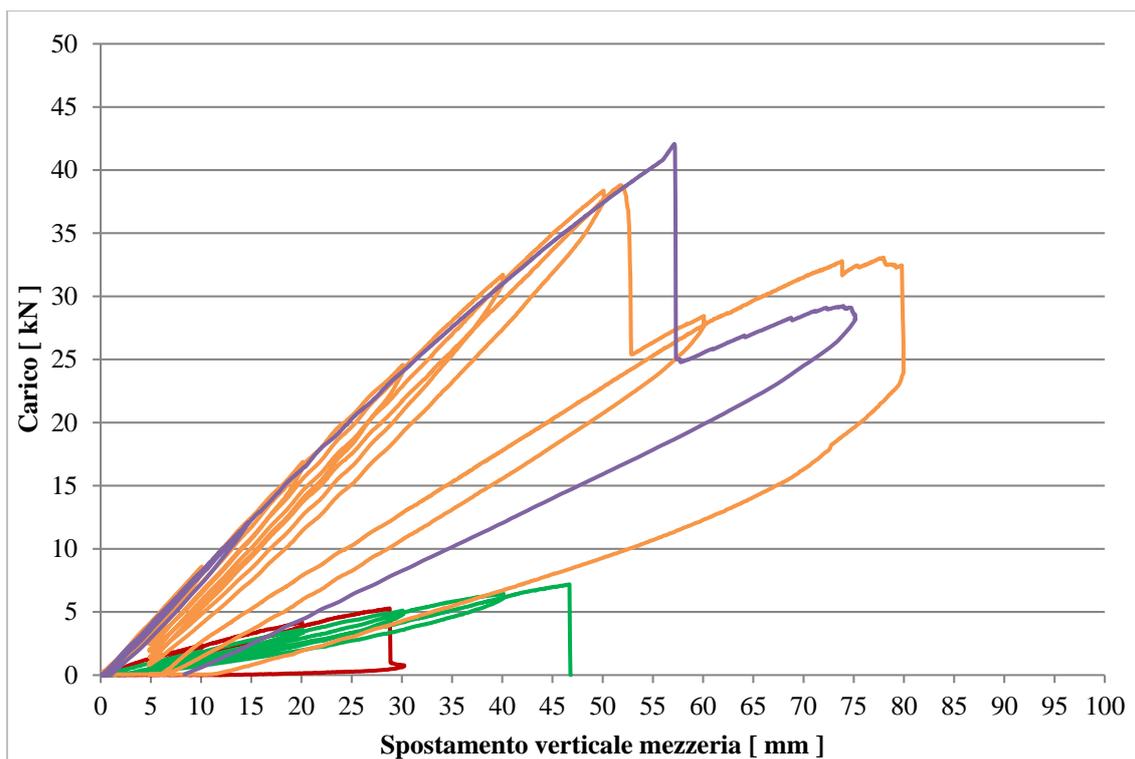


Figura 4-9 Prova monotona e ciclica su impalcato con adesivo poliuretano nelle diverse configurazioni

Legenda:

- Provino III.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova monotona
- Provino III.6 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica
- Provino III.11 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica
- Provino III.12 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità all'appoggio, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Come nel confronto precedente si evince che la presenza di discontinuità incide notevolmente sulle prestazioni dell'impalcato, questa volta, non solo nei confronti del carico di rottura, inferiore dell'80%, ma anche nei confronti della rigidezza, 70 % in meno. La posizione della discontinuità non incide sul carico di rottura.

Si può quindi affermare che le discontinuità trasversali rispetto alla luce libera dell'impalcato debbano essere escluse da qualsiasi considerazione in fase di progettazione del solaio.

#### 4.2.2 CONFRONTO PROVE CON SEZIONE SIMMETRICA PRECEDENTI

Per questa tipologia di impalcato, sezione simmetrica realizzata con il grigliato interposto a due pannelli lignei di multistrato marino, sono già state effettuate delle prove di carico nella I fase di sperimentazione. Il percorso di ricerca seguito è stato caratterizzato dall'utilizzo di diverse tipologie di incollaggio. Se nella prima fase di sperimentazione erano stati utilizzati una diversa resina epossidica, la RC02, e un adesivo a base d'acqua, l'IPN, nella terza fase, come ampiamente evidenziato, è stata utilizzata la resina Biresin e l'adesivo poliuretano Sikaflex. Risulta pertanto interessante confrontare le soluzioni che presentano la stessa sezione resistente ma realizzate con incollaggi di tipo differente attraverso le diverse fasi di sperimentazione. Questo anche alla luce del fatto che gli incollaggi della I fase di sperimentazione sono stati realizzati, su indicazione del fornitore delle colle, mediante l'interposizione di una rete in fibra di vetro per garantire un migliore aggrappaggio.

Il primo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.1, III.2, I.1, I.2. Si tratta delle prove monotone realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. Questa analisi mette a confronto tutte le configurazioni simmetriche realizzate con le quattro diverse tipologie di incollaggio

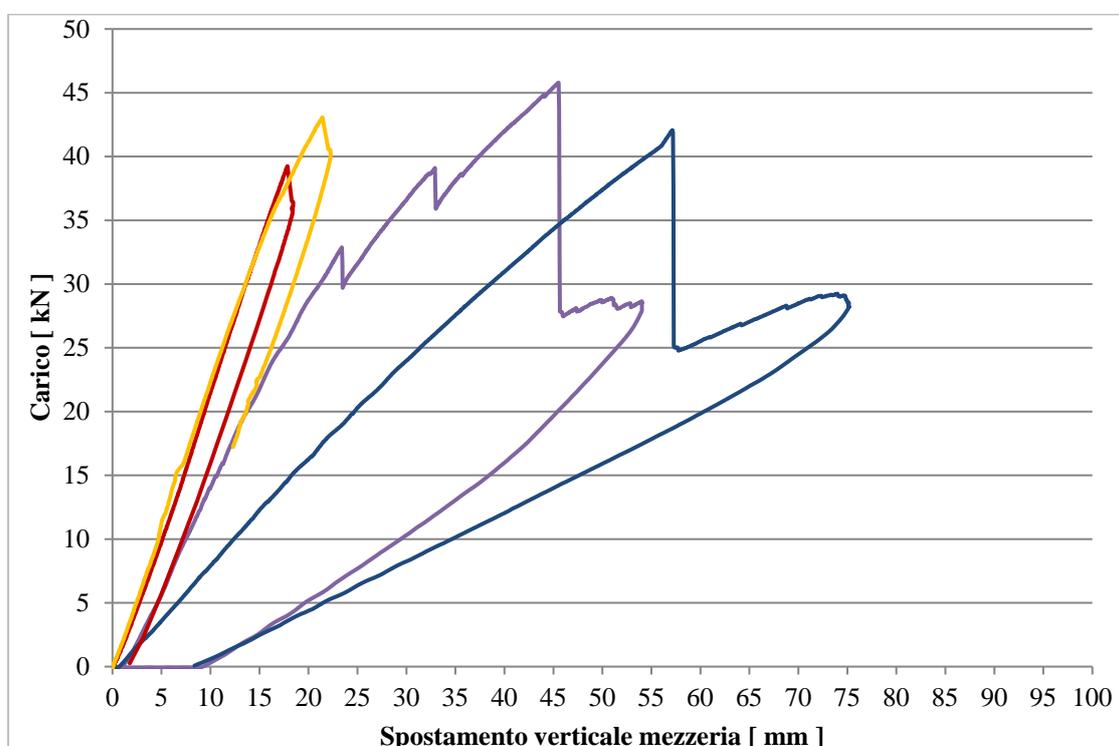


Figura 4-10 Prove monotone su sperimentazione attuale e precedente

Legenda:

-  Provino III.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova monotona
-  Provino III.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova monotona
-  Provino I.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con RC02, prova monotona
-  Provino I.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con IPN, prova monotona

La sperimentazione precedente mostra un grado di rigidità maggiore di entrambe le configurazioni rispetto alle attuali. Ciò è dovuto all'utilizzo di un diverso adesivo con caratteristiche simili alla resina e alla presenza della rete in fibra di vetro. La pendenza della retta tangente alla curva è spostata verso la verticale sin dai primi valori di carico comportando così frecce decisamente minori.

La configurazione con adesivo poliuretano mostra una rigidità decisamente inferiore rispetto alle altre anche se carichi di rottura confrontabili, raggiunti però con deformazioni decisamente superiori.

Il secondo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.1, III.5, I.1, I.2. Si tratta delle prove monotone realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. Questa analisi mette a confronto tutte le configurazioni simmetriche realizzate con le quattro diverse tipologie di incollaggio

Limitando il confronto specifico tra la configurazione con resina RC02 e quella con Biresin, rispettivamente con e senza rinforzo, si verifica un residuo plastico maggiore nella seconda. Anche questo comportamento risulta ascrivibile alla presenza della fibra di vetro nel provino I.1.

Il secondo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.9, III.11, I.7, I.8. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. Questa analisi mette a confronto tutte le configurazioni simmetriche che presentano una discontinuità nella sezione in mezzzeria realizzate con le quattro diverse tipologie di incollaggio.

Eliminando la rete in fibra di vetro si manifesta una lieve diminuzione di rigidità del provino attuale con resina e una notevole diminuzione nel caso di adesivo poliuretano. Inoltre il carico di rottura diminuisce di oltre un terzo per le due configurazioni testate nella terza fase di sperimentazione senza l'utilizzo della rete.

Si può affermare che la discontinuità in mezzzeria può fornire una valida risposta in termini di resistenza solo se viene in parte ripristinata la continuità con l'utilizzo di un elemento ulteriore utile a migliorare l'adesione all'interfaccia tra legno e grigliato come la rete in fibra di vetro.

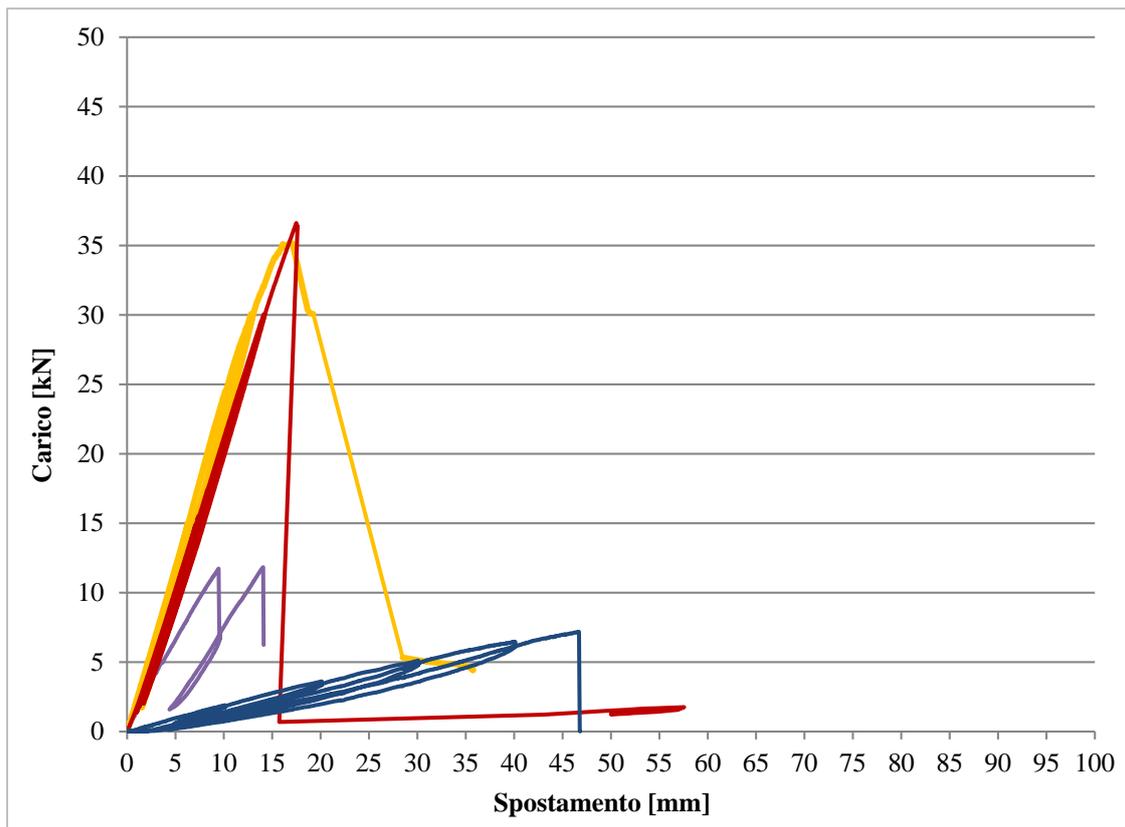


Figura 4-11 Prove cicliche su sperimentazione attuale e precedente con grigliato interrotto in mezzeria

Legenda:

- Provino III.9 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.11 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica
- Provino I.7 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con RC02, prova ciclica
- Provino I.8 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità in mezzeria, incollaggio con IPN, prova ciclica

Il terzo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.10, III.12, I.9, I.10. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle quattro configurazioni simmetriche testate. Questa analisi mette a confronto tutte le configurazioni simmetriche che presentano una discontinuità nella sezione all'appoggio realizzate con le quattro diverse tipologie di incollaggio.

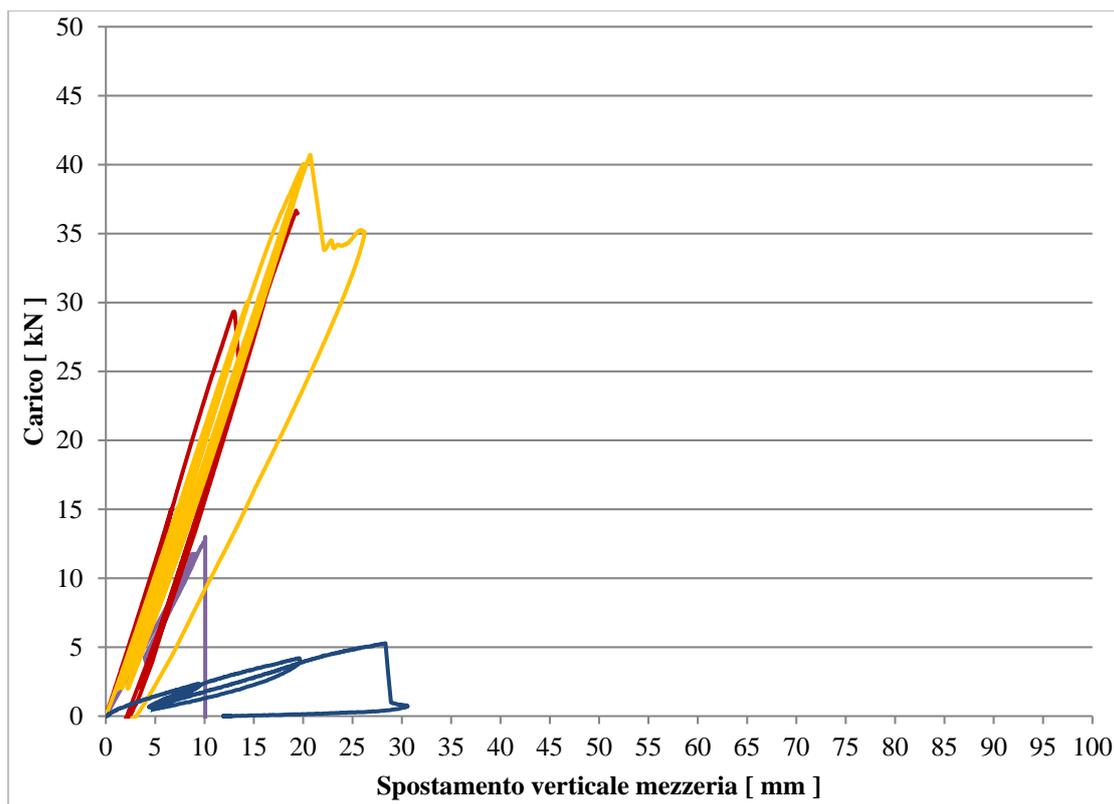


Figura 4-12 Prove cicliche su sperimentazione attuale e precedente con grigliato interrotto lateralmente

Legenda:

- Provino III.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità laterale, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.5 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità laterale, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica
- Provino I.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità laterale, incollaggio con RC02, prova ciclica
- Provino I.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto discontinuità laterale, incollaggio con IPN, prova ciclica

Le stesse considerazioni espresse precedentemente trovano validità anche nel presente confronto. Eliminando la rete in fibra di vetro si manifesta una lieve diminuzione di rigidità del provino attuale con resina e una notevole diminuzione nel caso di adesivo poliuretano. Inoltre il carico di rottura diminuisce di oltre un terzo per le due configurazioni testate nella terza fase di sperimentazione senza l'utilizzo della rete.

Si può affermare che la discontinuità in mezzeria può fornire una valida risposta in termini di resistenza solo se viene in parte ripristinata la continuità con l'utilizzo di un elemento ulteriore utile a migliorare l'adesione all'interfaccia tra legno e grigliato come la rete in fibra di vetro.

Complessivamente le valutazioni che discendono da questa fase di analisi e confronto dei risultati, mettono in evidenza l'importanza della scelta dell'adesivo all'interfaccia legno-grigliato. La scelta deve essere ponderata sia in termini di ottimizzazione delle risorse che del processo produttivo e deve, ovviamente, tenere conto delle prestazioni minime necessarie per l'utilizzo dell'impalcato stesso.

I valori numerici indicano che dal punto di vista della rigidità e dei carichi raggiunti, l'incollaggio a base di resina epossidica è il più appropriato. In aggiunta a ciò si deve ricordare la facilità di posa in opera della resina rispetto alla soluzione con adesivo poliuretano, oltre ad uno spessore e un peso ridotto. Anche dal punto di vista dei tempi è la soluzione più favorevole con una maturazione di due giorni a fronte dei 25 per l'IPN e dei 6 per l'adesivo poliuretano.

L'eventuale presenza di una rete in fibra di vetro, a parità di adesivo, in questo caso la resina, apporta un contributo irrigidente pari a circa il 30%. La spesa economica per tale rete comporta, però, una maggiorazione dei costi dell'impalcato pari al 50%.

Nelle configurazioni in cui è presente la discontinuità nel grigliato, l'assenza della rete comporta dei carichi di rottura troppo bassi e relativamente vicini ai valori di utilizzo in sicurezza del solaio. La discontinuità stessa aggrava sensibilmente le prestazioni dell'impalcato in termini di rigidità e carichi. Durante le prove, inoltre, si evidenzia una tipologia di rottura fragile, senza preavviso, che si vuole scongiurare in caso di raggiungimento della crisi del solaio.

#### 4.2.3 CONFRONTO PROVE CON SEZIONE ASIMMETRICA

Durante la III fase di sperimentazione si è voluto tentare di esaminare anche tipologie di sezione resistente che presentassero una configurazione asimmetrica tra intradosso ed estradosso. Questo al fine di verificare se, a parità di materiale utilizzato, queste configurazioni fossero maggiormente performanti in un'ottica di ottimizzazione della sezione resistente stessa.

Per questa tipologia di impalcato, sezione asimmetrica realizzata con il grigliato accoppiato due pannelli lignei di multistrato marino, sono state realizzate due configurazioni caratteristiche. La prima prevede il posizionamento dei pannelli multistrato solamente all'estradosso, la seconda prevede il posizionamento degli stessi pannelli solamente all'intradosso. Poiché erano disponibili sia la resina Biresin che l'adesivo poliuretano Sikaflex, sono stati realizzati provini con entrambe le tipologie di incollaggio per ciascuna configurazione della sezione resistente.

Il primo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.16 e III.17. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle due configurazioni asimmetriche realizzate con la resina epossidica.

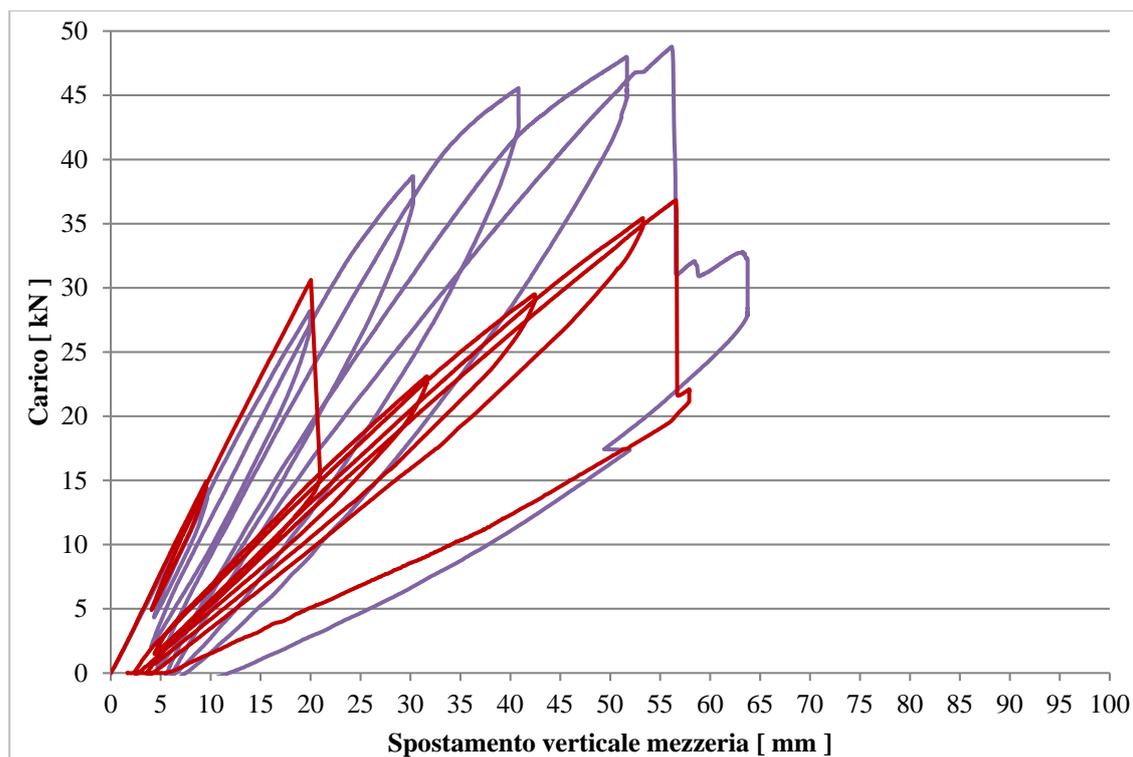


Figura 4-13 Prove cicliche su impalcato completo a sezione asimmetrica con resina epossidica

Legenda:

— Provino III.16 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin, prova ciclica

— Provino III.17 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin, prova ciclica

Le curve carico-spostamento sono perfettamente sovrapposte fino alla prima rottura del provino con legno all'intradosso. Dopo la rottura il provino è ancora in grado di ricevere carico ma con una rigidezza decisamente inferiore rispetto alla configurazione originale. Entrambi i provini manifestano la presenza di una fase di snervamento con l'aumentare dei carichi. Le rigidezze sono confrontabili se l'analisi si arresta una volta avvenuta la prima rottura.

In termini di residuo plastico il provino con il legno all'estradosso ne presenta un quantitativo maggiore. Questo è sicuramente dovuto al maggiore stress subito durante la prova ciclica e ai maggiori carichi massimi raggiunti

Il secondo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.18 e III.19. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle due configurazioni asimmetriche realizzate con l'adesivo poliuretano.

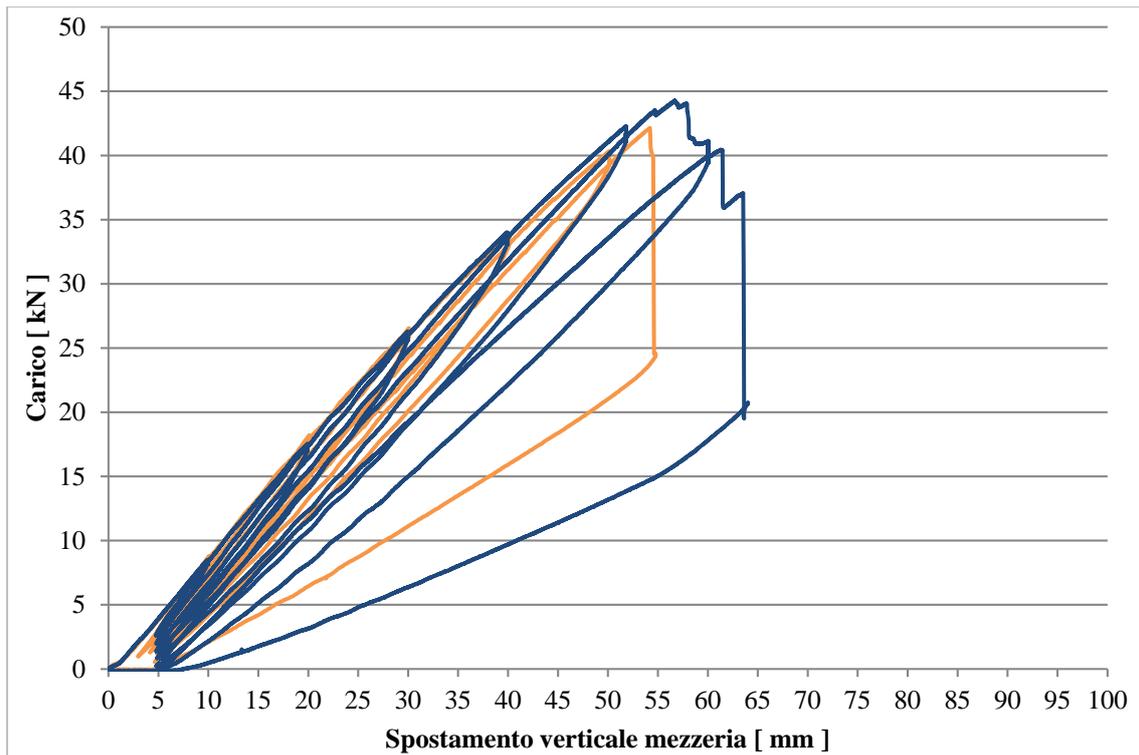


Figura 4-14 Prove cicliche su impalcato completo a sezione asimmetrica con adesivo poliuretano

Legenda:

— Provino III.18 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

— Provino III.19 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Come nel caso precedente, le curve sono perfettamente sovrapposte fino alla rottura che però avviene per valori del carico confrontabili. L'unica differenza riscontrata è la presenza di una fase di snervamento definita nel caso di pannello multistrato posto all'estradosso nell'ultimo ciclo di carico. Le rigidezze e i carichi massimi sono confrontabili.

In termini di residuo plastico il provino con il legno all'estradosso ne presenta un quantitativo maggiore in analogia con il confronto precedente.

Il terzo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.16 e III.18. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle due configurazioni asimmetriche realizzate con i pannelli di legno posti all'estradosso con le due diverse tipologie di incollaggio.

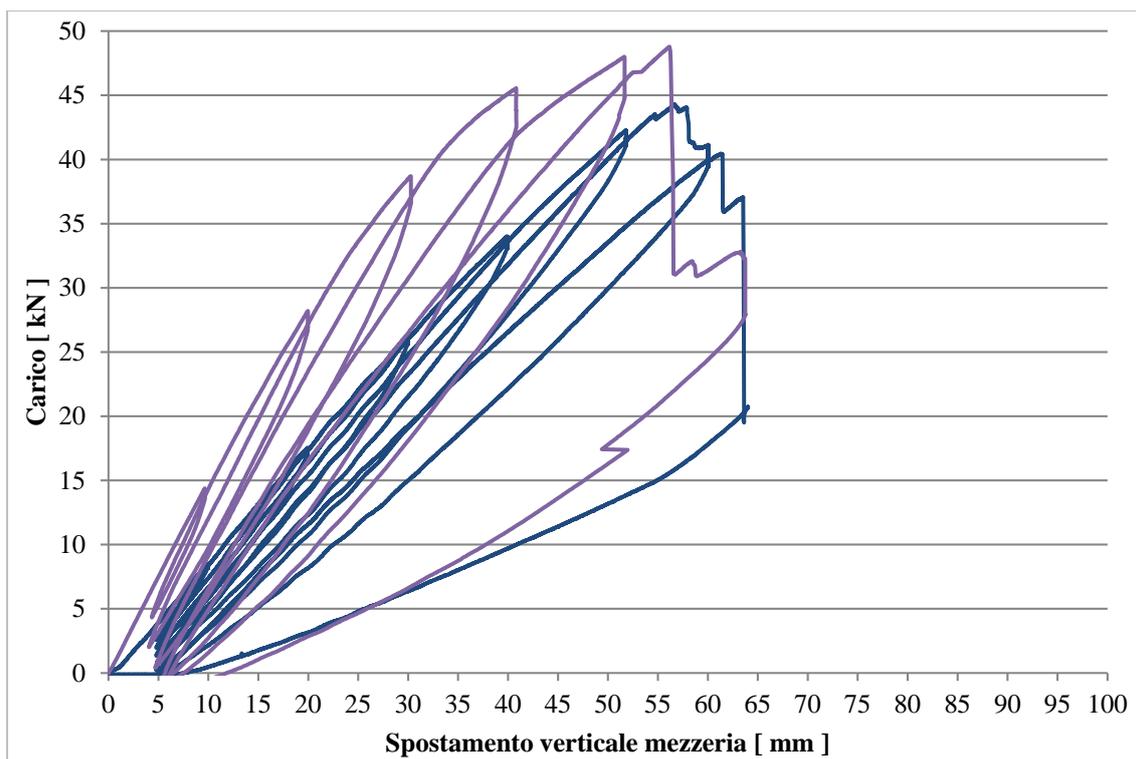


Figura 4-15 Confronto tra gli impalcati a sezione asimmetrica con adesivo poliuretano e resina e pannello multistrato all' estradosso

Legenda:

— Provino III.16 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin, prova ciclica

— Provino III.18 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Non si assiste ad alcuna sovrapposizione dei grafici, segno di una mancata corrispondenza di rigidità, già evidenziata nella sezione simmetrica e indice di un diverso comportamento degli adesivi. Nei due casi analizzati, si raggiungono carichi di rottura e deformazioni confrontabili. È interessante notare che la crisi avviene dopo lo stesso numero di cicli. Il provino con adesivo poliuretano mostra un'evidente fase di snervamento a ridosso della rottura e un residuo plastico inferiore.

Il quarto confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.17 e III.19. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulle due configurazioni asimmetriche realizzate con i pannelli di legno posti all'intradosso con le due diverse tipologie di incollaggio.

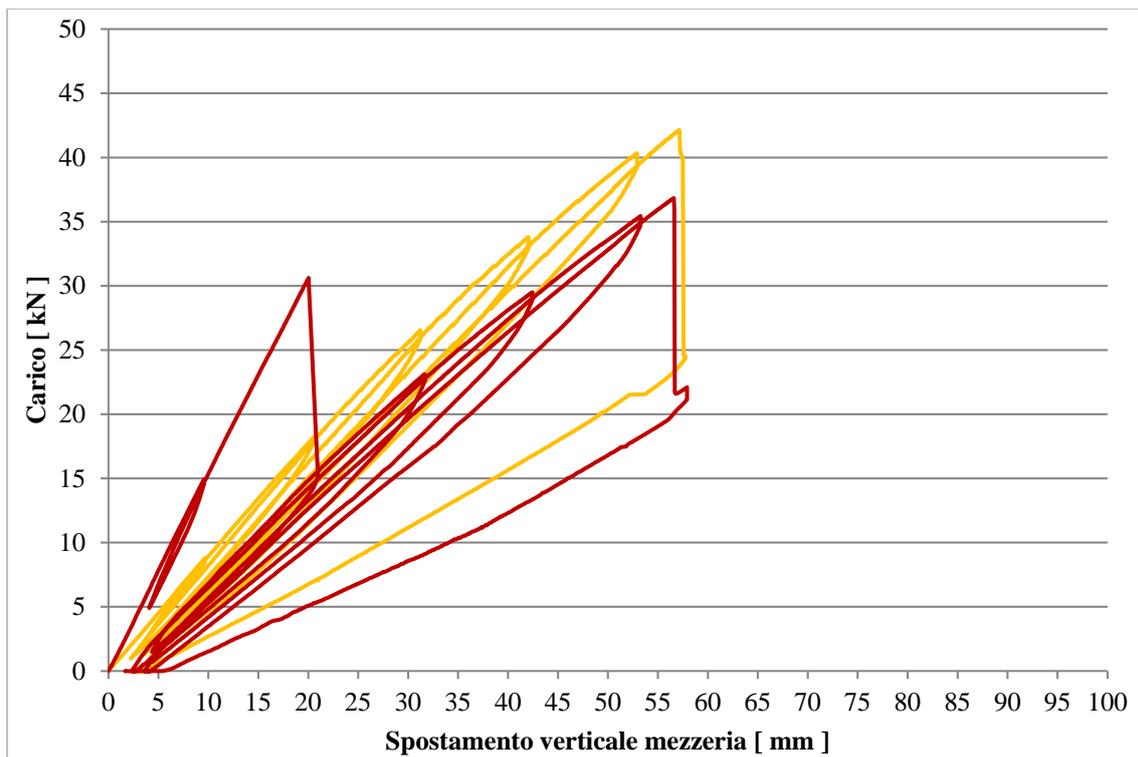


Figura 4-16 Confronto tra gli impalcati a sezione asimmetrica con adesivo poliuretano e resina e pannello multistrato all' intradosso

Legenda:

— Provino III.17 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin, prova ciclica

— Provino III.19 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Sin dai primi valori di carico, non si verifica alcuna sovrapposizione dei grafici. I motivi sono gli stessi del caso precedente. In seguito alla rottura del provino realizzato con la resina a livello del pannello ligneo inferiore si assiste ad un notevole decremento di carico e una conseguente ripresa, che comporta una rigidità inferiore ma confrontabile con l'altro campione in questione.

Nei due casi analizzati, si raggiungono carichi di rottura simile e uguali deformazioni. È interessante notare che la crisi avviene dopo lo stesso numero di cicli. Il residuo plastico è maggiore per il provino con resina, segno di una maggiore elasticità dell'adesivo poliuretano.

Il quinto confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.6, III.18 e III.19. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulla configurazione simmetrica e sulle due configurazioni asimmetriche realizzate con i pannelli di legno posti all'estradosso e all'intradosso. L'incollaggio è realizzato sempre con l'adesivo poliuretano.

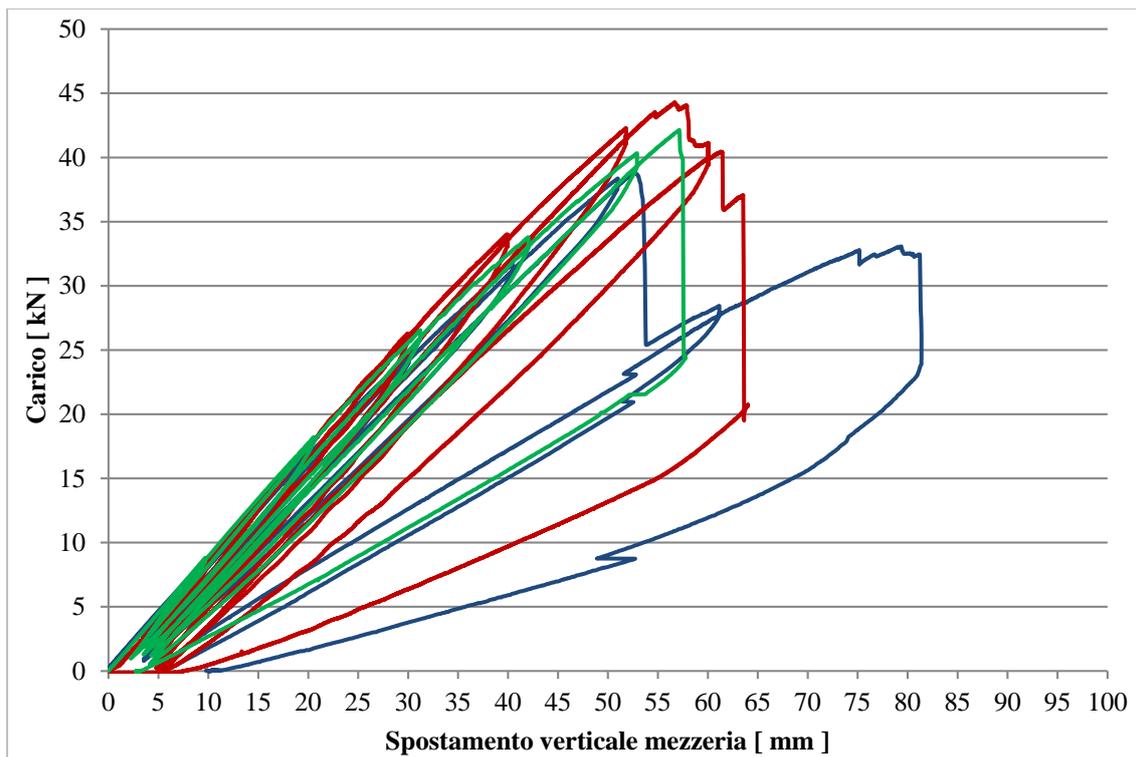


Figura 4-17 Confronto tra tutti gli impalcati senza discontinuità con adesivo poliuretano

Legenda:

- Provino III.6 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica
- Provino III.18 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica
- Provino III.19 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica

Le tre configurazioni riportate corrispondono ai tre casi di utilizzo dell'adesivo poliuretano come incollaggio. Quindi si mettono in relazione i provini di impalcato rispettivamente a sezione simmetrica e asimmetrica con pannello multistrato all'intradosso e all'estradosso.

I grafici evidenziano una corrispondenza piuttosto buona tra valori di carico massimo raggiunti, rigidità, deformazione ultima e residuo plastico. Questo implica che le tre tipologie di sezione sono pressoché indifferenti.

Il sesto confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.5, III.16 e III.17. Si tratta delle prove cicliche realizzate sulla configurazione simmetrica e sulle due configurazioni asimmetriche realizzate con i pannelli di legno posti all'estradosso e all'intradosso. L'incollaggio è realizzato sempre con la resina epossidica.

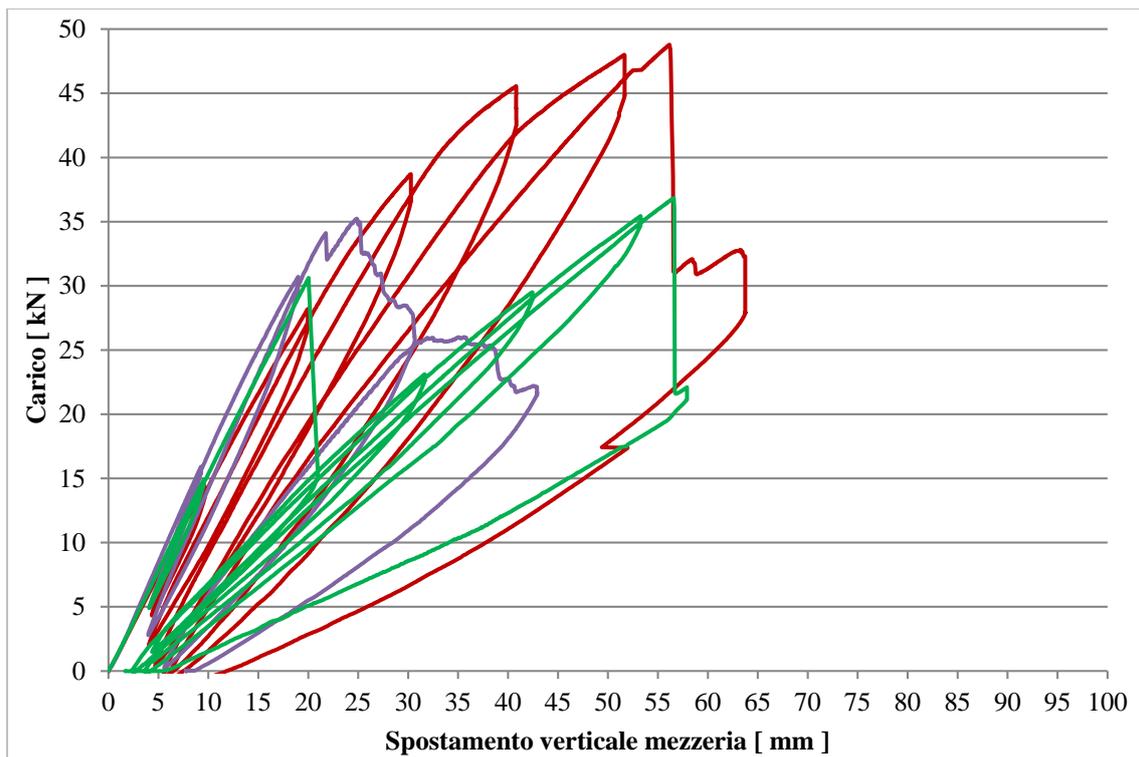


Figura 4-18 Confronto tra tutti gli impalcati senza discontinuità con resina epossidica

Legenda:

- Provino III.5 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.16 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin, prova ciclica
- Provino III.17 Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin, prova ciclica

Le tre configurazioni riportate corrispondono ai tre casi di utilizzo della resina epossidica come incollaggio. Quindi si mettono in relazione i provini di impalcato rispettivamente a sezione simmetrica e asimmetrica con pannello multistrato all'intradosso e all'estradosso.

I comportamenti dei tre provini sono identici in termini di rigidità. Il carico massimo raggiunto è confrontabile tra la configurazione simmetrica e quella asimmetrica con pannello multistrato inferiore. Quando il legno si trova all'estradosso si raggiungono valori di carico a rottura notevolmente maggiori. Il residuo plastico di questo provino si colloca in una posizione intermedia tra le altre due.

In conclusione, al variare della disposizione degli elementi costituenti, le diverse configurazioni realizzate con adesivo poliuretano presentano un comportamento simile e confrontabile, quindi la scelta della tipologia della sezione viene lasciata alle necessità contingenti all'opera da realizzare. I provini confezionati con la resina epossidica invece, mostrano risposte

differenti alle sollecitazioni indotte. Le cui prestazioni ottimali in termini di residuo plastico e rigidezza guidano alla scelta della configurazione asimmetrica con pannello ligneo inferiore.

#### 4.2.4 CONFRONTO PROVINI CON BATTENTATURA

Durante la III fase di sperimentazione di è voluto tentare di esaminare anche tipologie di provini che mettessero in luce il comportamento del pannello sandwich in corrispondenza delle discontinuità generate dall'accostamento di elementi adiacenti. Questo per simulare la realizzazione di un impalcato continuo in una condizione reale in cui la dimensione finita dei pannelli non deve inficiare il comportamento dell'intero impalcato.

Per evidenziare questo comportamento sono stati realizzati dei provini con un doppio grigliato stampato in PRFV la cui continuità viene ripristinata attraverso lo sfalsamento dei pannelli lignei inferiore e superiore. Poiché erano disponibili sia la resina Biresin che l'adesivo poliuretano Sikaflex, sono stati realizzati provini con entrambe le tipologie di incollaggio.

Il primo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.20 e III.1. Si tratta della prova ciclica realizzata sulla configurazione doppia simmetrica con battentatura e sulla configurazione singola simmetrica. L'incollaggio è realizzato sempre con la resina epossidica.

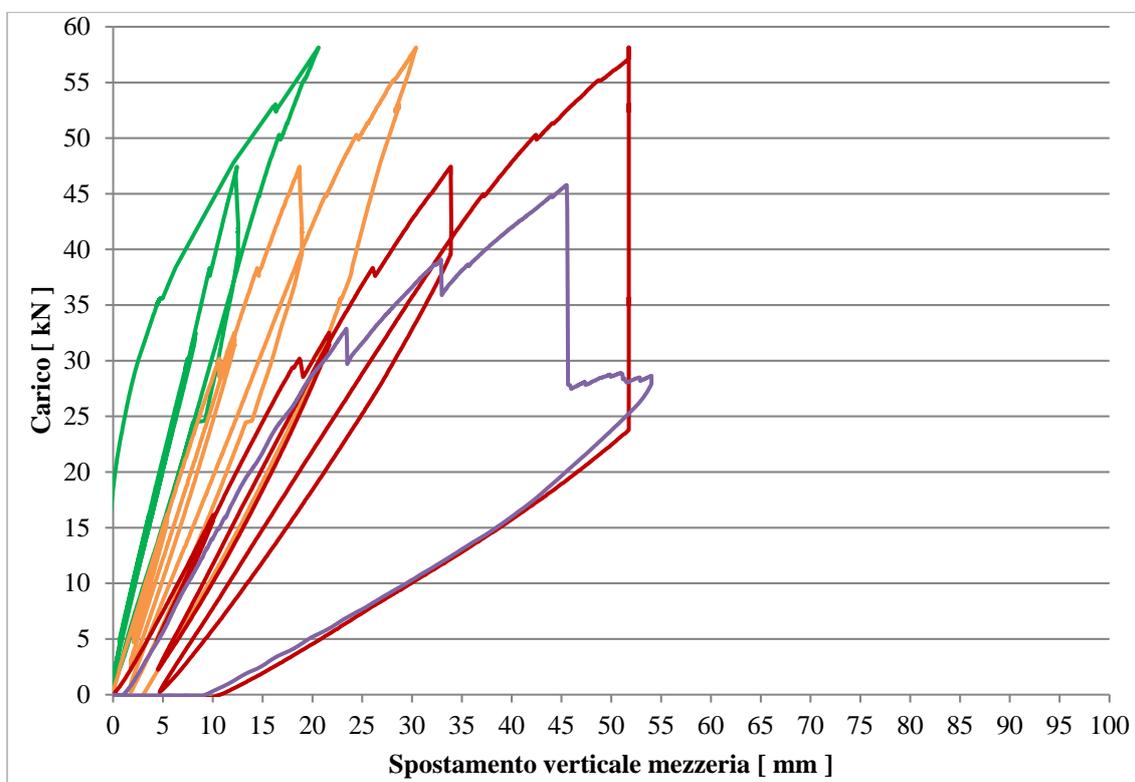


Figura 4-19 Prova ciclica su pannello singolo e pannello doppio con resina epossidica

Legenda:

 Provino III.20 doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Biresin, prova ciclica, LVDT 1

 Provino III.20 doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Biresin, prova ciclica, LVDT 2

 Provino III.20 doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Biresin, prova ciclica, LVDT 3

 Provino III.1 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova monotona

Nel grafico soprastante si vuole evidenziare lo scostamento di freccia massima tra il pannello singolo e quello doppio al fine di valutare l'eventuale comportamento a lastra. In magenta si riportano i valori medi degli spostamenti individuati dai trasduttori di spostamento del provino singolo. In verde, giallo e rosso, gli spostamenti del pannello doppio in corrispondenza rispettivamente dell'estremità libera (dove non c'è diretta applicazione del carico), della mezzeria del provino e dell'estremità su cui grava il coltello di carico.

Dalla lettura del grafico emerge come il provino doppio manifesti, in presenza di un carico asimmetrico imposto solo su uno dei due grigliati, un buon comportamento a lastra. Gli abbassamenti vengono ripartiti anche verso la porzione di provino non direttamente soggetta a carico mostrando una buona efficacia del sistema di battentatura ottenuto sfalsando i diversi layers.

Il secondo confronto mostra i grafici carico-spostamento dei provini III.21 e III.2. Si tratta della prova ciclica realizzata sulla configurazione doppia simmetrica con battentatura e sulla configurazione singola simmetrica. L'incollaggio è realizzato sempre con l'adesivo poliuretano.

Nel grafico si vuole evidenziare lo scostamento di freccia massima tra il pannello singolo e quello doppio al fine di valutare l'eventuale comportamento a lastra. In magenta si riportano i valori medi degli spostamenti individuati dai trasduttori di spostamento del provino singolo. In verde, giallo e rosso, gli spostamenti del pannello doppio in corrispondenza rispettivamente dell'estremità libera (dove non c'è diretta applicazione del carico), della mezzeria del provino e dell'estremità su cui grava il coltello di carico.

Dalla lettura del grafico emerge come il provino doppio manifesti, in presenza di un carico asimmetrico imposto solo su uno dei due grigliati, un buon comportamento a lastra. Gli abbassamenti vengono ripartiti anche verso la porzione di provino non direttamente soggetta a carico mostrando una buona efficacia del sistema di battentatura ottenuto sfalsando i diversi layers.

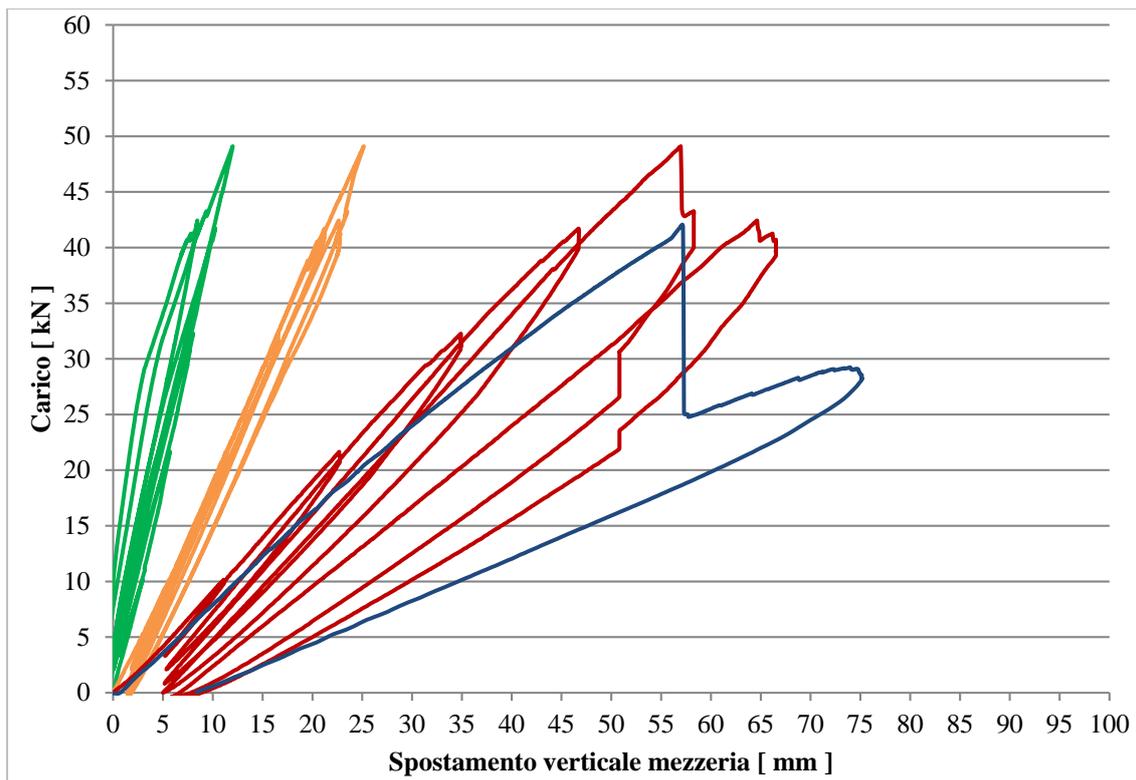


Figura 4-20 Prova ciclica su pannello singolo e pannello doppio con adesivo poliuretano

Legenda:

— Provino III.21 doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica, LVDT 1

— Provino III.21 doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica, LVDT 2

— Provino III.21 doppio grigliato affiancato interposto a doppio pannello ligneo battentato, incollaggio con Sikaflex, prova ciclica, LVDT 3

— Provino III.2 Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin, prova monotona

In conclusione si può ragionevolmente affermare, per quanto potuto testare, che l’ipotesi di intervenire mediante “battentatura”, ovvero con lo sfalsamento dei tre strati costituenti il pannello sandwich, sia efficace in termini di mantenimento delle prestazioni per ripristinare la continuità materiale ed il comportamento monolitico di un intero impalcato.

Questo aspetto necessita ancora di approfondimento essendo in parte legato anche alla dimensione dei provini stessi e non indipendente dal rapporto tra larghezza della sovrapposizione e dimensione dei pannelli.

## 4.3 VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA DELL'IMPALCATO

Si definisce rigidezza la capacità del materiale di opporsi a variazioni di configurazione che gli vengono imposte da forze esterne. Nel presente capitolo si valutano analiticamente, i dati ottenuti nelle sperimentazioni, in termini di rigidezza e limitazione flessionale. In particolare è stato possibile valutare il contributo del grigliato in base al suo posizionamento all'interno dei pannelli lignei piuttosto che all'estradosso o all'intradosso del campione d'impalcato in esame. L'obiettivo è quello di confrontare le prestazioni della sezione resistente del pannello sandwich in presenza di una configurazione simmetrica e asimmetrica, a partire dalle configurazioni già testate precedentemente.

### 4.3.1 CALCOLO DELLE RIGIDEZZE REALI

Le considerazioni e i relativi calcoli della rigidezza delle diverse tipologie di impalcato e della percentuale di momento flettente assorbito dal grigliato, fondano le proprie basi sul concetto di elasticità del materiale, numericamente espresso tramite il modulo di Young ( $E$ ) dello stesso.

Nella scheda tecnica dei grigliati in PRFV forniti dall'azienda MMGrigliati è riportato il valore del modulo di elasticità indicativo del grigliato pari a  $E_G = 12000 \text{ N/mm}^2$ . Non è invece noto il modulo di elasticità del materiale composito  $E_G$ . È noto inoltre il modulo di elasticità  $E_L = 7500 \text{ N/mm}^2$  del pannello ligneo multistrato

Grazie ai dati sperimentali raccolti è possibile passare alla determinazione delle rigidezze per le diverse configurazioni. Partendo dalla valutazione della freccia teorica valutata nel caso di trave appoggio-appoggio con applicato un doppio carico concentrato disposto simmetricamente rispetto alla mezzera e a una distanza  $a$  dagli appoggi, corrispondente quindi allo schema statico della macchina di prova, si può scrivere:

$$f_{max} = \frac{F a}{24 EJ} (3l^2 - 4a^2)$$

Da tale formula è stato possibile risalire alla rigidezza media totale dell'impalcato in esame in quanto le altre variabili sono tutte note:

$$EJ_{test} = \frac{F a}{24 f_{max}} (3l^2 - 4a^2)$$

Dove:

- F carico concentrato applicato
- a distanza del carico concentrato dall'appoggio
- l luce tra gli appoggi
- $EJ_{test}$  rigidezza totale dell'impalcato da prova

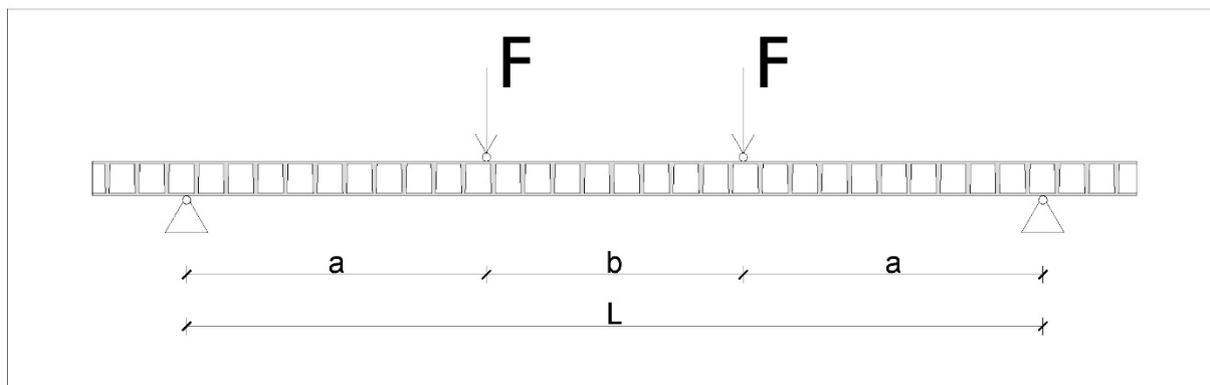


Figura 4-21 Schema statico

Per ottenere valori confrontabili tra tutti i provini e le diverse configurazioni testate si calcola la freccia corrispondenza di uno stesso carico. Il carico di riferimento per il calcolo di EJ per i diversi provini viene fissato ad un valore  $P = 2F = 5\text{kN}$  del carico al pistone. Questo permette di effettuare una valutazione omogenea delle diverse rigidezze anche per quei provini che hanno manifestato comportamenti anomali per carichi particolarmente elevati. Ci si limita pertanto ad operare in campo elastico.

Poiché il modulo elastico dei due materiali si mantiene costante, si ipotizza che durante la prova, cambi l'inerzia della sezione a causa dello spostamento del baricentro della sezione stessa.

Si riportano i valori medi delle rigidezze totali:

N°	Tipologia provino	f max	P = 2F	EJ medio
		(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
<b>III fase di sperimentazione</b>				
III.4	Grigliato singolo SCH38/38	42,80	5,01	2,14
III.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	7,06	5,02	13,01
III.1	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	3,16	5,03	29,13
III.2	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	6,11	5,04	15,09
III.16	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin	3,37	5,02	27,26

N°	Tipologia provino	f max	P = 2F	EJ medio
		(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
<b>III fase di sperimentazione</b>				
III.17	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin	3,27	5,02	28,09
III.18	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex	5,34	5,04	17,17
III.19	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex	5,58	5,05	16,56
N°	Tipologia provino	f max	P = 2F	EJ medio
		(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
<b>I fase di sperimentazione</b>				
I.1	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con IPN e rete	2,33	5,04	39,32
I.2	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con RC02 e rete	2,25	5,02	40,84
I.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	7,71	5,01	11,89

Tabella 4-2 Tabella di confronto delle rigidzze

I risultati riportati sopra, forniscono informazioni relative alla rigidzza totale dell'impalcato analizzato nelle sue differenti configurazioni e sono finalizzati alla determinazione del modulo elastico del grigliato singolo aperto e chiuso. La rigidzza totale dell'impalcato è necessaria per ricavare il contributo del grigliato nell'assorbimento del momento flettente massimo.

Il solaio in questione ha un comportamento assimilabile a quello di una trave a sezione mista con elementi componenti perfettamente incollati. Questo è vero se si considera la conservazione delle sezioni piane, il mantenimento della curvatura costante e un momento d'inerzia maggiore dato dalla possibilità di applicare il teorema del trasporto per calcolare lo stesso.

Sia nel caso di sezione simmetrica che nel caso di sezione asimmetrica dell'impalcato, è necessario procedere all'omogeneizzazione del legno rispetto al grigliato per poter valutare la posizione dell'asse neutro e quindi l'inerzia stessa campione attraverso il coefficiente  $n$ :

$$n = \frac{E_L}{E_G} = \frac{7500}{12000} = 0,625$$

Nel primo caso, la simmetria della sezione rispetto all'asse orizzontale, semplifica il procedimento in quanto l'asse baricentrico coincide con l'asse neutro. Nel secondo, è necessario risalire alla posizione esatta di tale asse neutro imponendo l'espressione del momento statico, cui unica incognita è tale distanza dall'asse, pari a zero.

$$S_n = 0$$

Si risale al valore di  $y_n$  tramite la formula:

$$y_n = \frac{\sum A_G y_G + nA_L y_L}{\sum A_G + nA_L}$$

dove:

$y_G$  = distanza dall' estradosso al baricentro del grigliato

$y_L$  = distanza dall' estradosso al baricentro del legno

$A_G$  = area del grigliato

$A_L$  = area del legno

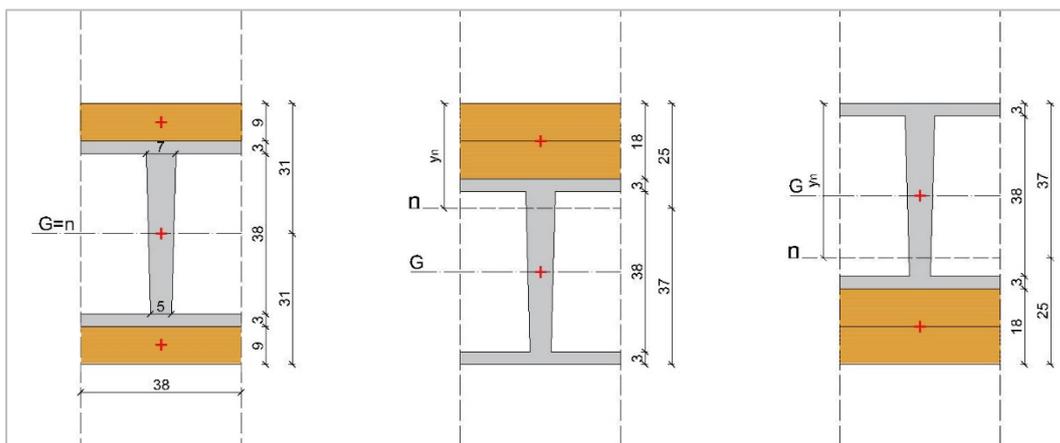


Figura 4-22 Sezione resistente dell'impalcato nelle diverse configurazioni del pannello sandwich

Il calcolo che ne consegue è il momento d'inerzia ideale ( $J_{id}$ ) della sezione omogenizzata a grigliato e calcolata rispetto all'asse neutro da cui si risale alla rigidezza equivalente ( $EJ_{eq}$ ) della sezione mista.

$$J_{id} = J_G + nJ_L$$

$$EJ_{eq} = E_G \times J_{id}$$

Si definiscono quindi diverse rigidezze per ciascuno dei grigliati (con doppia copertura o aperto) e per i pannelli composti legno-grigliato:

- Grigliato SCH 38/38\_DC singolo con doppia copertura:  $E_G J_G$
- Grigliato SCH 38/38 singolo aperto:  $E_A J_A$
- Pannello sandwich con grigliato SCH 38/38\_DC e pannelli lignei:  $E_g J_{id}$

#### 4.3.2 CALCOLO DEI MOMENTI DI INERZIA

La sezione sollecitata ha una larghezza pari a 300 mm, coincidente con la larghezza del provino di laboratorio, un'altezza pari a 44 mm nel caso di grigliato singolo e di 62 mm quando presenti i due pannelli multistrato in legno. Il pannello in PRFV, essendo composto di traversi ortogonali tra loro, genera due possibili sezioni di cui una a doppia T e l'altra rettangolare piena. A tali differenti forme coincidono differenti momenti d'inerzia. Nella sezione a doppio T il momento d'inerzia coincide con la somma dei momenti d'inerzia degli elementi componenti rispetto al baricentro dell'intera sezione. I traversi, in quanto trapezoidali, presentano una base minore di 5 mm e una maggiore di 7 mm. Per semplicità di calcolo si approssimano a sezione rettangolare con base di dimensione media 6 mm. Nel presente lavoro si è analizzato il singolo travetto componente su cui si è basato il calcolo dell'inerzia. La larghezza da considerare sarà pari a 38 mm, corrispondente all'interasse di una singola maglia di grigliato.

Il primo passaggio consiste nel calcolare l'inerzia media del grigliato lungo lo sviluppo longitudinale di una singola maglia. Come detto il grigliato SCH 38/38\_DC è costituito da un reticolo bidirezionale di travette trapezoidali disposte ad interasse di 38 mm. Per questo motivo bisogna considerare il contributo alla rigidezza sia della sezione standard, a doppio T, sia della sezione piena.

Nella valutazione complessiva del momento d'inerzia del grigliato si tiene conto del contributo delle due inerzie che hanno un peso differente in quanto corrispondono a differenti porzioni di grigliato. Nella pianta sottostante vengono riportate le dimensioni: le maglie si sviluppano su distanze maggiori rispetto alle sezioni piene. La maglia opera su un intervallo di 32 mm mentre la sezione piena su un intervallo di 6 mm.

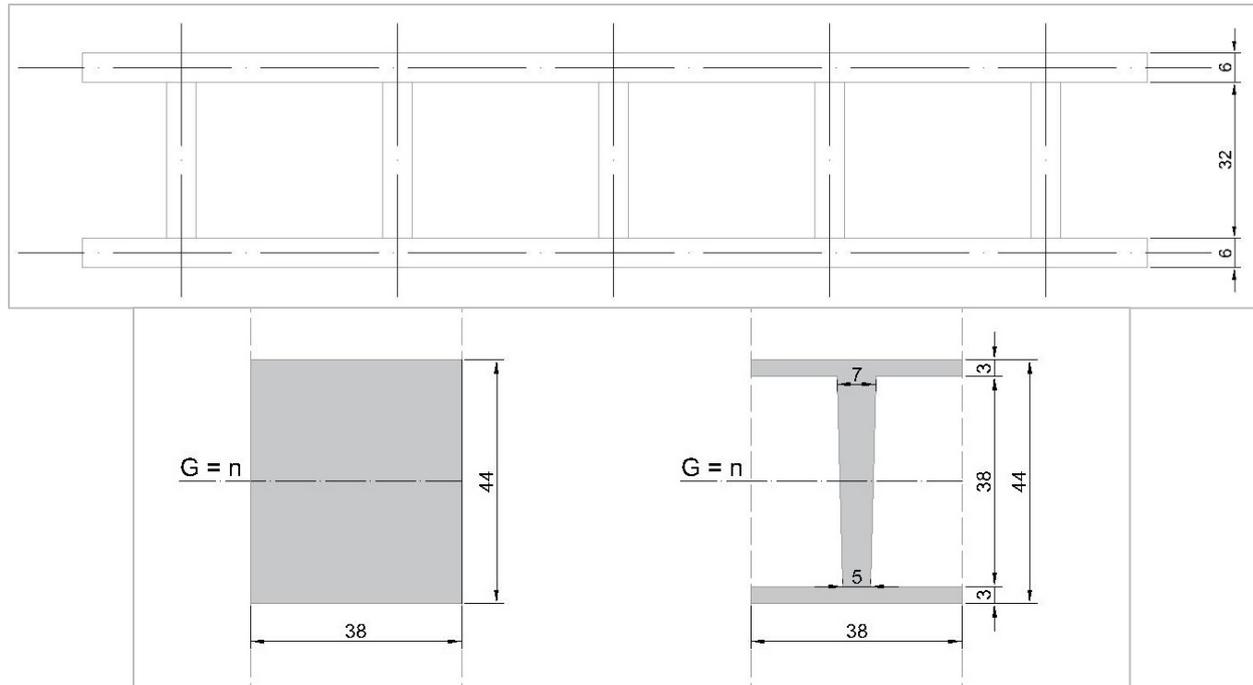


Figura 4-23 Alternanza delle maglie del grigliato in planimetria. Sezioni in corrispondenza delle maglie e dei travetti

Nel caso di sezione simmetrica l'asse neutro coincide con l'asse baricentrico. Il calcolo dell'inerzia del grigliato sezionato in corrispondenza di una maglia diventa:

$$J_{G \text{ maglia}} = \frac{(6 \cdot 38^3)}{12} + 2 \times \left[ \frac{(38 \cdot 3^3)}{12} + (38 \cdot 3) \cdot (22 - 1,5)^2 \right] = 0,123 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Il calcolo dell'inerzia del grigliato sezionato in corrispondenza di un traverso diventa:

$$J_{G \text{ piena}} = \frac{(38 \cdot 44^3)}{12} = 0,270 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Poiché le diverse sezioni contribuiscono in proporzione alla loro dimensione, si è in grado di valutare l'inerzia media del grigliato attraverso il calcolo del valore medio pesato:

$$J_{G \text{ media}} = \frac{32 \cdot (0,123 \cdot 10^6) + 6 \cdot (0,270 \cdot 10^6)}{32 + 6} = 0,147 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

I valori precedenti sono validi sia se si considera il solo grigliato o il pacchetto completo di pannello sandwich con sezione simmetrica. Nel caso di sezioni asimmetriche si devono inserire ulteriori considerazioni come segue.

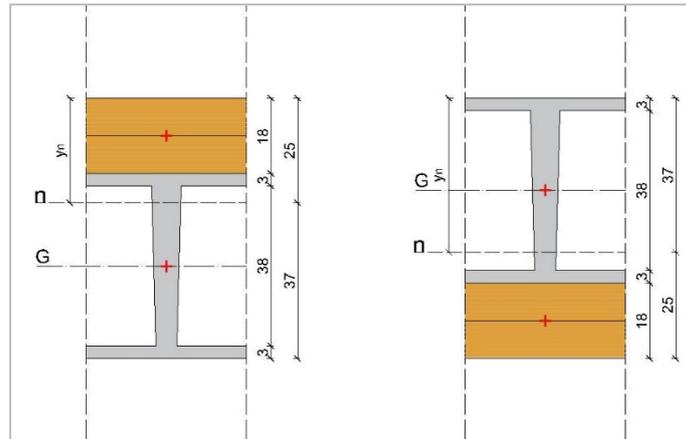


Figura 4-24 Sezioni dell'impalcato in corrispondenza del singolo travetto

Il calcolo dell'inerzia media del grigliato nella configurazione asimmetrica deve essere preceduto dalla determinazione della posizione dell'asse neutro:

$$y_n = \frac{(38 \cdot 3) \cdot (18 + 1,5) + (38 \cdot 3) \cdot (62 - 1,5) + (38 \cdot 6) \cdot 40 + n \cdot (38 \cdot 18) \cdot 9}{(2 \cdot 38 \cdot 3) + (38 \cdot 6) + n(38 \cdot 18)}$$

$$y_n = 25 \text{ mm}$$

Trattandosi di una sezione mista perfettamente incollata, nell'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, si procede all'omogeneizzazione del legno a grigliato e si ricava il momento d'inerzia ideale della sezione asimmetrica.

Il calcolo dell'inerzia del grigliato sezionato in corrispondenza di una maglia diventa:

$$J_{G \text{ AS maglia}} = \left[ \frac{(6 \cdot 38^3)}{12} + (6 \cdot 38) \cdot (25 - 40)^2 \right]$$

$$+ \left[ 2 \cdot \frac{(38 \cdot 3^3)}{12} + (38 \cdot 3) \cdot (37 - 1,5)^2 + (38 \cdot 3) \cdot (25 - 19,5)^2 \right]$$

$$= 0,226 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Il calcolo dell'inerzia del grigliato sezionato in corrispondenza di un traverso diventa:

$$J_{G \text{ AS piena}} = \frac{(38 \cdot 44^3)}{12} + (38 \cdot 44 \cdot 3^2) = 0,285 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Poiché le diverse sezioni contribuiscono in proporzione alla loro dimensione, si è in grado di valutare l'inerzia media del grigliato attraverso il calcolo del valore medio pesato:

$$J_{G AS media} = \frac{32 \cdot (0,226 \cdot 10^6) + 6 \cdot (0,285 \cdot 10^6)}{32 + 6} = 0,235 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Questo vale per i valori dell'inerzia delle porzioni di grigliato all'interno delle diverse configurazioni. L'inerzia varia anche per il legno a seconda della configurazione considerata in quanto si modifica la distanza del baricentro della sezione lignea rispetto all'asse neutro.

Nel caso di sezione simmetrica l'inerzia dei due pannelli multistrato disposti all'intradosso e all'estradosso vale:

$$J_L = 2 \cdot \left[ \frac{(38 \cdot 9^3)}{12} + (38 \cdot 9) \cdot (31 - 4,5)^2 \right] = 0,484 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Nel caso di sezione asimmetrica l'inerzia dei due pannelli multistrato disposti o all'intradosso o all'estradosso vale:

$$J_{L AS} = \left[ \frac{(38 \cdot 18^3)}{12} + (38 \cdot 18) \cdot (25 - 9)^2 \right] = 0,193 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

#### 4.3.3 CALCOLO DEL MODULO ELASTICO DEL GRIGLIATO $E_G$

Una volta calcolate le grandezze necessarie è stato possibile risalire a un modulo di elasticità teorico del grigliato. Per prima cosa si confrontano i dati sperimentali ricavati rispettivamente per i provini I.3 e III.3 in cui sono stati testati i grigliati SCH38/38\_DC nella loro configurazione di fabbrica senza il contributo dei pannelli lignei. Poiché i valori sperimentali sono riferiti ad un provino di dimensioni 1220x300 mm si considera che mediamente all'interno di ciascun provino siano comprese 7 travette. Il calcolo del modulo elastico del grigliato diventa:

$$EJ_{provino} = E_G \times 7J_{G media}$$

Per il provino I.3, esplicitando  $E_G$  si ricava:

$$E_{G I.3} = \frac{EJ_{I.3}}{7 \cdot J_{G \text{ media}}} = \frac{1,189 \cdot 10^{10}}{7 \cdot 0,147 \cdot 10^6} = 1,155 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$$

Per il provino III.3, esplicitando  $E_G$  si ricava:

$$E_{G III.3} = \frac{EJ_{III.3}}{7 \cdot J_{G \text{ media}}} = \frac{1,301 \cdot 10^{10}}{7 \cdot 0,147 \cdot 10^6} = 1,124 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$$

Al fine di ottenere un valore meno aleatorio si prende così la media dei due valori calcolati:

$$E_{G \text{ medio}} = \frac{E_{G III.3} + E_{G I.3}}{2} = \frac{(1,124 + 1,155) \cdot 10^4}{2} = 1,139 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$$

Si nota come il valore medio reale ( $E_{G \text{ medio}}$ ) confermi abbastanza il valore fornito dalla casa produttrice del grigliato  $E_{G \text{ medio}} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ . Questo valore verrà utilizzato in seguito per valutare la rigidezza EJ teorica delle diverse configurazioni di impalcato calcolate omogeneizzando il legno al grigliato. In questo modo sarà possibile confrontare i valori calcolati analiticamente con quelli reali ottenuti dalle prove sperimentali.

#### 4.3.4 CALCOLO DELLE RIGIDENZE E DELLE FRECCE TEORICHE

Per confermare il comportamento teorico ipotizzato per le diverse configurazioni dei provini e l'efficacia degli incollaggi, si valutano in prima istanza le rigidezze e le frecce teoriche per confrontarle in un secondo momento con i valori ottenuti in fase di sperimentazione.

Si assumono i seguenti valori di calcolo:

- modulo elastico del grigliato  $E_G = 1,200 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$
- modulo elastico del legno  $E_L = 0,750 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$
- coefficiente di omogeneizzazione  $n = \frac{E_L}{E_G} = \frac{7500}{12000} = 0,625$
- momento d'inerzia ideale  $J_{id} = J_G + nJ_L$
- carico di riferimento al pistone  $P = 2F = 5 \text{ kN} = 5000 \text{ N}$

Per il calcolo della rigidezza teorica si utilizza la formula:

$$EJ_{teorica} = E_G J_{id}$$

Configurazione grigliato singolo:

$$EJ_{teorica G} = E_G J_{G media} \cdot 7 = 1,200 \cdot 10^4 \times 0,147 \cdot 10^6 \times 7 = 1,23 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2$$

Configurazione simmetrica:

$$\begin{aligned} EJ_{teorica SI} &= E_G (J_{G media} + nJ_L) \cdot 7 = 1,200 \cdot 10^4 (0,147 \cdot 10^6 + 0,625 \cdot 0,484 \cdot 10^6) \cdot 7 \\ &= 3,78 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

Configurazione asimmetrica:

$$\begin{aligned} EJ_{teorica AS} &= E_G (J_{G AS media} + nJ_{LAS}) \cdot 7 = 1,200 \cdot 10^4 (0,235 \cdot 10^6 + 0,625 \cdot 0,193 \cdot 10^6) \cdot 7 \\ &= 2,99 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

Determinate le rigidezze teoriche, si calcolano le relative frecce teoriche facendo riferimento alla seguente formulazione:

$$f_{max teorica} = \frac{F a}{24 EJ_{teorica}} (3l^2 - 4a^2)$$

Configurazione grigliato singolo:

$$f_{max teorica G} = \frac{2500 \cdot 350}{24 \cdot 1,23 \cdot 10^{10}} (3 \cdot 1000^2 - 4 \cdot 350^2) = 7,44 \text{ mm}$$

Configurazione simmetrica:

$$f_{max teorica G} = \frac{2500 \cdot 350}{24 \cdot 3,78 \cdot 10^{10}} (3 \cdot 1000^2 - 4 \cdot 350^2) = 2,42 \text{ mm}$$

Configurazione asimmetrica:

$$f_{max\ teorica\ G} = \frac{2500 \cdot 350}{24 \cdot 2,99 \cdot 10^{10}} (3 \cdot 1000^2 - 4 \cdot 350^2) = 3,06\ \text{mm}$$

N°	Tipologia provino	f max	EJ medio	f max	EJ medio
		(mm)	(kN/m <sup>2</sup> )	(mm)	(kN/m <sup>2</sup> )
III fase di sperimentazione		reali		teorici	
III.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	7,06	13,01	7,44	12,30
III.1	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	3,16	29,13	2,42	37,80
III.2	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	6,11	15,09	2,42	37,80
III.16	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin	3,37	27,26	3,06	29,90
III.17	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin	3,27	28,09	3,06	29,90
III.18	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex	5,34	17,17	3,06	29,90
III.19	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex	5,58	16,56	3,06	29,90

Tabella 4-3 Tabella di confronto delle rigidità reali e teoriche

Per rendere esplicito il contributo percentuale del grigliato alla rigidità dell'impalcato nelle varie configurazioni simmetrica e asimmetrica si analizzano i rapporti tra la rigidità del grigliato singolo con doppia copertura e le rigidità delle configurazioni a sandwich.

Configurazione simmetrica teorica:

$$\% = \frac{EJ_{teorica\ G}}{EJ_{teorica\ SI}} \cdot 100 = \frac{12,30}{37,80} \cdot 100 = 33\ \%$$

Configurazione simmetrica reale con resina epossidica:

$$\% = \frac{EJ_{reale\ G}}{EJ_{reale\ AS}} \cdot 100 = \frac{13,01}{29,13} \cdot 100 = 45\ \%$$

Configurazione simmetrica reale con adesivo poliuretano:

$$\% = \frac{EJ_{reale\ G}}{EJ_{reale\ AS}} \cdot 100 = \frac{13,01}{15,09} \cdot 100 = 86\ \%$$

Configurazione asimmetrica teorica:

$$\% = \frac{EJ_{teorica G}}{EJ_{teorica SI}} \cdot 100 = \frac{12,30}{29,90} \cdot 100 = 41 \%$$

Configurazione asimmetrica reale con resina epossidica:

$$\text{legno all'estradosso \%} = \frac{EJ_{reale G}}{EJ_{reale AS}} \cdot 100 = \frac{13,01}{27,26} \cdot 100 = 48 \%$$

$$\text{legno all'intradosso \%} = \frac{EJ_{reale G}}{EJ_{reale AS}} \cdot 100 = \frac{13,01}{28,09} \cdot 100 = 46 \%$$

Configurazione asimmetrica reale con adesivo poliuretano:

$$\text{legno all'estradosso \%} = \frac{EJ_{reale G}}{EJ_{reale AS}} \cdot 100 = \frac{13,01}{17,17} \cdot 100 = 76 \%$$

$$\text{legno all'intradosso \%} = \frac{EJ_{reale G}}{EJ_{reale AS}} \cdot 100 = \frac{13,01}{16,56} \cdot 100 = 79 \%$$

Diversamente da quanto ci si poteva attendere dalle considerazioni teoriche, l'apporto percentuale della rigidezza del grigliato all'intero pannello sandwich non ha confermato del tutto le attese. La differenza tra i valori teorici tra le configurazioni simmetrica e asimmetrica dell'impalcato sandwich è valutabile in circa il 10% a meno del sistema di incollaggio valutato.

I dati sperimentali evidenziano invece come l'utilizzo della resina epossidica renda la differenza percentuale tra la sezione simmetrica e quella asimmetrica quasi nulla. Le due configurazioni, dal punto di vista dell'ottimizzazione della sezione resistente possono considerarsi equivalenti in virtù della estrema rigidezza della colla e delle sue buone caratteristiche di presa.

Si nota invece che la presenza di un adesivo elastico come quello a base poliuretano, permettendo un maggiore scorrimento dei materiali componenti l'impalcato, permetta di raddoppiare il contributo irrigidente del grigliato a fronte di maggiori deformazioni. Tale considerazione, oltre a risultare dai calcoli effettuati, trova conferma durante le prove di carico. Si è potuto notare, infatti, che la rottura di tutte le configurazioni con adesivo poliuretano avviene per crisi del grigliato, mentre il legno non subisce rotture.

### 4.3.5 CONSIDERAZIONI NORMATIVE

Nel rispetto dei limiti imposti dalla normativa vigente, D.M. del 14 gennaio 2008, si vogliono confrontare tutti i risultati ottenuti dalle prove con i valori corrispondenti ai carichi di esercizio per civile abitazione e ambienti suscettibili ad affollamento. Risulta quindi necessario definire se, in normali condizioni di utilizzo, un impalcato composto da pannelli multistrato lignei e grigliato in PRFV, al variare della configurazione della sezione, sia in grado di soddisfare i valori di deformazione concessi da normativa. Si procede al confronto tra lo schema statico utilizzato nella fase di test ed una configurazione di carico distribuito su due appoggi che si avvicini a quella generalmente utilizzata per il calcolo dei solai in condizioni di esercizio.

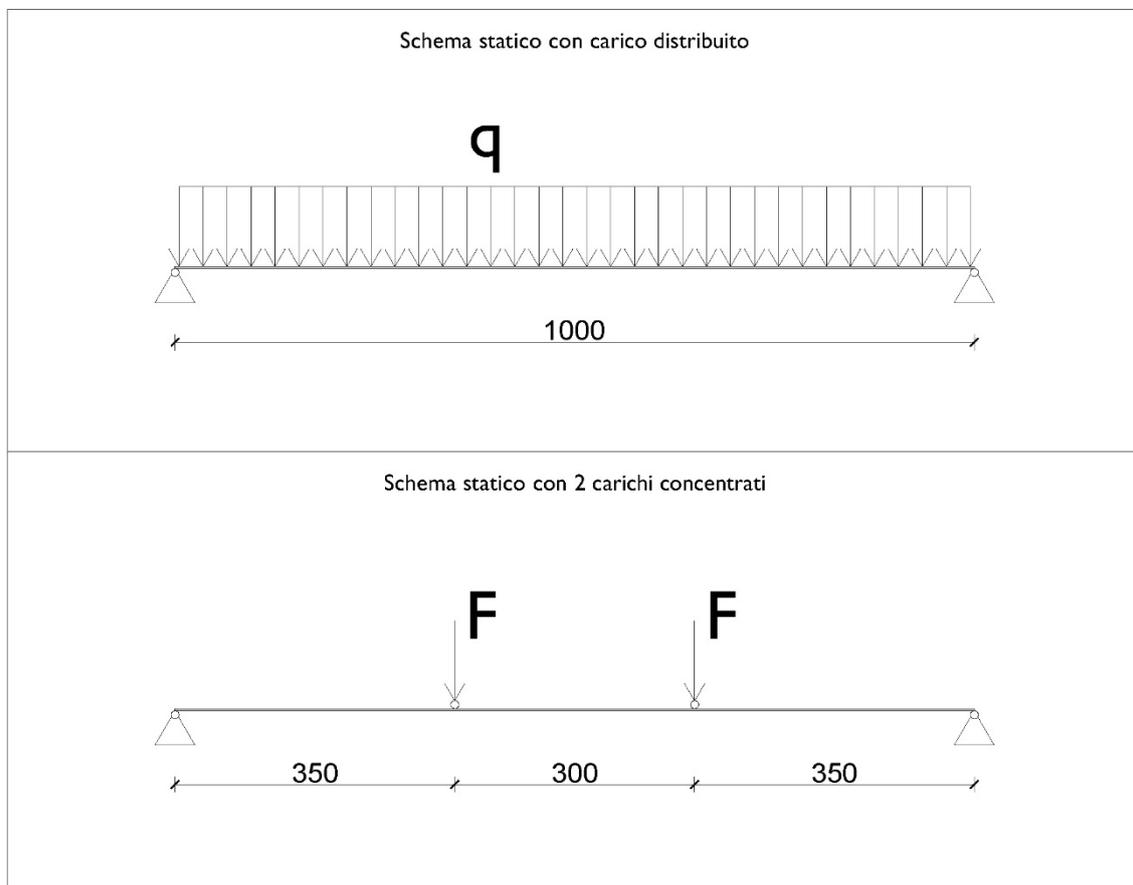


Figura 4-25 Schemi statici

La freccia generata da carico distribuito è pari a:

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{EJ}$$

In seguito alla sperimentazione effettuata si è potuti risalire al valore della freccia ottenuta dalle prove con la formula:

$$f = \frac{F a}{24EJ} \cdot (3l^2 - 4a^2)$$

Lo scopo è ottenere il carico concentrato F a cui coincide quello distribuito di esercizio per un solaio su due appoggi sia nel caso di civile abitazione e di ambienti suscettibili di affollamento. Si procede uguagliando le frecce:

$$\frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{EJ} = \frac{F a}{24EJ} \cdot (3l^2 - 4a^2)$$

$$F = \frac{5}{16} \cdot \frac{q \cdot l^4}{a \cdot (3l^2 - 4a^2)}$$

Per ottenere il carico  $P = 2F$  agente sul pistone rimane da definire il carico  $q$  agente nelle condizioni di esercizio e nelle condizioni ultime. L'analisi dei carichi è effettuata in base alla stratigrafia a secco coerente con il sistema adottato.

CARICHI AGENTI SUL SOLAIO							
peso proprio (pannello sandwich)		0,400	kN/m <sup>2</sup>	$\gamma_{G1} =$	1,30		0,520 kN/m <sup>2</sup>
Pavimentazione legno 8 mm	0,050		kN/m <sup>2</sup>				
Isoldrum N sottopavimento 2mm	0,000		kN/m <sup>2</sup>				
Film scaldante Accona 1mm	0,000		kN/m <sup>2</sup>				
Isoldrum Silver termoriflettente 3mm	0,000		kN/m <sup>2</sup>				
Lastre gessofibra FERMACELL 20 mm	0,230		kN/m <sup>2</sup>				
Anticalpestio MAPESILENT ROLL 10 mm	0,000		kN/m <sup>2</sup>				
Polistirene XPS FLOORMATE 300-A 30 mm	0,100		kN/m <sup>2</sup>				
Lastre nido d'ape FERMACELL 30 mm	0,450		kN/m <sup>2</sup>				
tramezzi	0,800		kN/m <sup>2</sup>				
permanente non strutturale		1,630	kN/m <sup>2</sup>	$\gamma_{G2} =$	1,30		2,119 kN/m <sup>2</sup>
sovraccarico variabile per civile abitazione		2,000	kN/m <sup>2</sup>	$\gamma_{Q1} =$	1,50		3,000 kN/m <sup>2</sup>
<b>TOTALE PER CIVILE ABITAZIONE</b>	<b>q = agli SLE :</b>	<b>4,030</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>			<b>agli SLU :</b>	<b>5,639 kN/m<sup>2</sup></b>
sovraccarico variabile per ambienti suscettibili di affollamento		3,000	kN/m <sup>2</sup>	$\gamma_{Q1} =$	1,50		4,500 kN/m <sup>2</sup>
<b>TOTALE PER AMBIENTI SUSCETTIBILI DI AFFOLLAMENTO</b>	<b>q = agli SLE :</b>	<b>5,030</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>			<b>agli SLU :</b>	<b>7,139 kN/m<sup>2</sup></b>

Tabella 4-4 Analisi dei carichi

Dalla tabella si ricavano i carichi totali al  $m^2$  per le due condizioni di carico sia allo stato limite di esercizio (SLE) sia allo stato limite ultimo (SLU). Questi valori vanno linearizzati considerando la larghezza dei provini durante le prove di carico ( $b = 300 \text{ mm}$ ) per poter confrontare sezioni resistenti corrispondenti. Si ricava il valore dei carichi per metro lineare:

- Civile abitazione

$$q_{30sle} = q_{sle} \cdot b = 4,030 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,30 \text{ m} = 1,209 \frac{kN}{m}$$

$$q_{30slu} = q_{slu} \cdot b = 5,639 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,30 \text{ m} = 1,692 \frac{kN}{m}$$

$$F_{sle} = \frac{5}{16} \cdot \frac{q_{sle} \cdot l^4}{a \cdot (3l^2 - 4a^2)} = 0,430 \text{ kN}$$

$$F_{slu} = \frac{5}{16} \cdot \frac{q_{slu} \cdot l^4}{a \cdot (3l^2 - 4a^2)} = 0,602 \text{ kN}$$

$$P_{sle} = 2 \cdot F_{sle} = 0,860 \text{ kN}$$

$$P_{slu} = 2 \cdot F_{slu} = 1,204 \text{ kN}$$

- Ambienti suscettibili di affollamento

$$q_{30sle} = q_{sle} \cdot b = 5,030 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,30 \text{ m} = 1,509 \frac{kN}{m}$$

$$q_{30slu} = q_{slu} \cdot b = 7,139 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,30 \text{ m} = 2,142 \frac{kN}{m}$$

$$F_{sle} = \frac{5}{16} \cdot \frac{q_{sle} \cdot l^4}{a \cdot (3l^2 - 4a^2)} = 0,537 \text{ kN}$$

$$F_{slu} = \frac{5}{16} \cdot \frac{q_{slu} \cdot l^4}{a \cdot (3l^2 - 4a^2)} = 0,762 \text{ kN}$$

$$P_{sle} = 2 \cdot F_{sle} = 1,074 \text{ kN}$$

$$P_{slu} = 2 \cdot F_{slu} = 1,524 \text{ kN}$$

Per quanto riguarda la freccia verticale massima si considera, in accordo con la normativa, un limite imposto in condizioni di esercizio pari a:

$$f_{max} = \frac{l}{300} = \frac{1000}{300} = 3,3 \text{ mm}$$

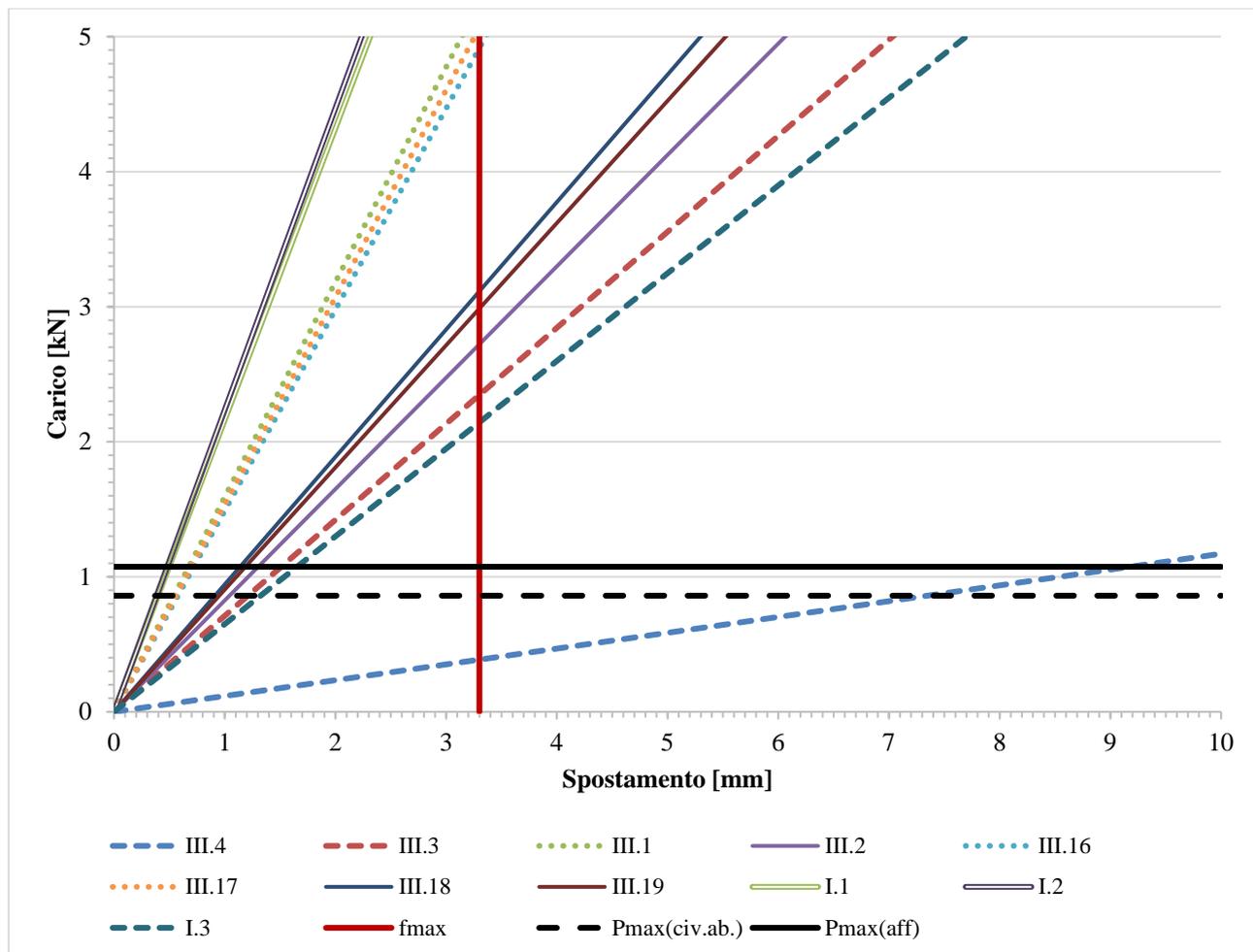


Figura 4-26 Confronto grafici carico-spostamento linearizzati

Poiché nell'intervallo considerato i materiali si comportano in modo elastico lineare, si è utilizzato l'andamento rettilineo delle curve carico-spostamento delle varie configurazioni limitato all'intervallo 0-5 kN di carico al pistone (Figura 10-26). Nel grafico sono riportate anche la freccia massima ammissibile da normativa e i carichi al pistone corrispondenti alle condizioni di carico considerate.

I provini I.1 e I.2 testati nella prima fase che presentano l'utilizzo della rete in fibra di vetro all'interno dell'incollaggio sono ovviamente i più performanti.

Le configurazioni simmetriche e asimmetriche III.1, III.16 e III.17 realizzate con la resina Biresin si comportano piuttosto bene raggiungendo i carichi di servizio ben prima di raggiungere la deformazione massima ammissibile.

Le configurazioni simmetriche e asimmetriche III.2, III.18 e III.19 realizzate con l'adesivo epossidico Sikaflex si comportano leggermente peggio delle precedenti raggiungendo comunque i carichi di servizio prima di raggiungere la deformazione massima ammissibile.

Le configurazioni senza irrigidimento ligneo presentano situazioni più penalizzanti in termini di deformazioni massime. Il grigliato aperto raggiunge la deformazione massima ben prima di raggiungere i carichi di servizio ammissibili.

Utilizzando la freccia massima ammissibile è poi possibile determinare i carichi massimi che producono tale deformazione e verificare se i provini raggiungono la rottura prima di raggiungere la deformazione massima.

$$f_{max} = \frac{F a}{24EJ} \cdot (3l^2 - 4a^2)$$

$$F_{max} = \frac{24EJ \cdot f_{max}}{a \cdot (3l^2 - 4a^2)}$$

Imponendo  $f_{max} = 3,3 \text{ mm}$  nell'equazione e considerando le rigidezze di ciascun provino registrate durante le prove si possono ottenere i carichi  $P_{max}$  al pistone che provocano il superamento della deformazione massima.

N°	Tipologia provino	f max	Pmax = 2F	EJ medio
		(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
		<b>ammissibile</b>		<b>reale</b>
<b>III.4</b>	Grigliato singolo SCH38/38	3,30	0,39	2,14
<b>III.3</b>	Grigliato singolo SCH38/38DC	3,30	2,34	13,01
<b>III.1</b>	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	3,30	5,25	29,13
<b>III.2</b>	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	3,30	2,72	15,09
<b>III.16</b>	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin	3,30	4,91	27,26
<b>III.17</b>	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin	3,30	5,06	28,09
<b>III.18</b>	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex	3,30	3,09	17,17
<b>III.19</b>	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex	3,30	2,98	16,56
	Tipologia provino	f max	Pmax = 2F	EJ medio
		(mm)	(kN)	(kN/m <sup>2</sup> )
		<b>Ammissibile</b>		<b>reale</b>
<b>I.1</b>	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con IPN e rete	3,30	7,09	39,32
<b>I.2</b>	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con RC02 e rete	3,30	7,36	40,84
<b>I.3</b>	Grigliato singolo SCH38/38DC	3,30	2,14	11,89

Tabella 4-5 Carichi massimi calcolati in corrispondenza della deformazione massima ammissibile

Dall'analisi dei carichi massimi ammissibili si conferma che le migliori configurazioni sono quelle che prevedono la rete in fibra di vetro. A seguire, in termini strettamente prestazionali, ci sono i pannelli sandwich realizzati con la resina epossidica Biresin ed infine i pannelli realizzati con l'incollaggio poliuretano Sikaflex. In generale i carichi raggiunti in condizione di deformazione massima ammissibile sono decisamente più alti di quelli previsti sia in condizioni di esercizio che agli stati limite ultimi. Questo sembra garantire una buona riserva di resistenza per le configurazioni esaminate.

Non si sono esplicitamente confrontate le configurazioni che prevedevano la discontinuità, sia in mezzzeria che all'appoggio. I pannelli incollati con la resina soddisfano le condizioni mentre quelli con l'adesivo poliuretano non risultano sufficientemente performanti. In ogni caso, considerazioni di praticità e di convenienza portano ad escludere queste configurazioni. Sarà quindi opportuno prevedere in fase di progettazione una opportuna tassellazione del piano per evitare discontinuità in campata.

Proprio per questo motivo è utile effettuare la valutazione della luce massima raggiungibile in base allo schema di carico considerato, trave con doppio appoggio. La formula per calcolare la freccia massima in corrispondenza della mezzzeria è:

$$f = \frac{5 q_{sle} l^4}{384EJ}$$

Secondo le Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14/01/2008) il limite per la luce massima ammissibile alla *Tabella 4.2.X* "Limiti di deformabilità per gli elementi di impalcato delle costruzioni ordinarie" vale:

$$f_{max} = \frac{l}{250}$$

Uguagliando le due formule si ricava il valore della luce massima ammissibile:

$$l_{max} = \sqrt[3]{\frac{384 EJ}{5 \cdot 250 q_{sle}}}$$

Effettuando i calcoli e sostituendo i valori dei carichi  $q_{sle} = 1,209 \text{ kN/m}$  per il caso di civile abitazione e  $q_{sle} = 1,509 \text{ kN/m}$  per il caso di ambienti suscettibili di affollamento si ottengono le luci massime ammissibili per ciascuna configurazione del pannello sandwich.

N°	Tipologia provino	q sle	l max	EJ medio	q sle	l max
		(kN/m)	(m)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m)	(m)
<b>III fase di sperimentazione</b>		<b>civile abitazione</b>		<b>reale</b>	<b>ambienti affollati</b>	
III.4	Grigliato singolo SCH38/38	1,209	0,82	2,14	1,509	0,76
III.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	1,209	1,49	13,01	1,509	1,38
III.1	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Biresin	1,209	1,95	29,13	1,509	1,81
III.2	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con Sikaflex	1,209	1,56	15,09	1,509	1,45
III.16	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Biresin	1,209	1,91	27,26	1,509	1,77
III.17	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Biresin	1,209	1,93	28,09	1,509	1,79
III.18	Doppio pannello di legno all'estradosso, grigliato intero all'estradosso, incollaggio con Sikaflex	1,209	1,63	17,17	1,509	1,52
III.19	Doppio pannello di legno all'intradosso, grigliato intero all'intradosso, incollaggio con Sikaflex	1,209	1,61	16,56	1,509	1,50
	Tipologia provino	q sle	l max	EJ medio	q sle	l max
		(kN/m)	(m)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m)	(m)
<b>I fase di sperimentazione</b>		<b>civile abitazione</b>		<b>reale</b>	<b>ambienti affollati</b>	
I.1	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con IPN e rete	1,209	2,15	39,32	1,509	2,00
I.2	Doppio pannello di legno e grigliato interposto, incollaggio con RC02 e rete	1,209	2,18	40,84	1,509	2,03
I.3	Grigliato singolo SCH38/38DC	1,209	1,45	11,89	1,509	1,34

Tabella 4-6 tabella delle luci massime ammissibili per le due condizioni di carico distribuito

Questi valori potrebbero essere utilizzati come riferimento per il predimensionamento nella disposizione dell'interasse delle travi principali in caso di realizzazione di nuovi solai. Per quanto riguarda la sostituzione e il recupero dell'esistente, osservando i valori, gli interassi delle travature presentano generalmente delle luci inferiori rendendo il sistema compatibile anche in queste condizioni.

#### 4.3.6 VERIFICA A FLESSIONE DELL'IMPALCATO

L'impalcato oggetto della presente ricerca prevede l'utilizzo un materiale come il grigliato in PRFV, non ancora inserito all'interno della normativa tecnica per le costruzioni. Si tratta inoltre di un pannello sandwich per il quale sarebbero necessarie ulteriori prove per definirne in maniera accurata le tensioni di snervamento e rottura con i relativi coefficienti di sicurezza.

È già stato analizzato un predimensionamento indicativo per la condizione di solaio su due appoggi. Per una verifica semplificata a flessione dell'impalcato poggiante su travi con interasse variabile, è necessario determinare le tensioni massime agenti sui singoli materiali, estrapolate dalle prove a flessione. Tali verifiche vengono effettuate sul singolo travetto componente il grigliato con larghezza pari a 38 mm.

La resistenza a trazione di un materiale viene valutata indirettamente tramite la prova a trazione per flessione applicando ad un provino prismatico semplicemente appoggiato due forze che generano una sollecitazione di flessione.

La macchina di prova utilizzata è paragonabile a quella della sperimentazione che prevede un doppio appoggio e carico ripartito tra due coltelli simmetricamente disposti rispetto alla mezzeria. Il momento così ottenuto si mantiene costante tra i due coltelli.

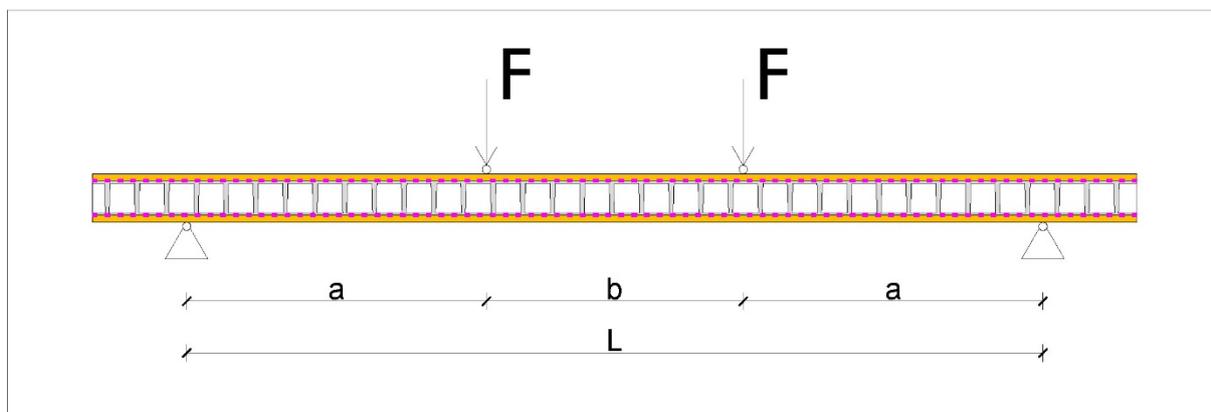


Figura 4-27 Schema di carico prova a 4 punti

Dove:

- $F = P/2$  carico concentrato applicato al pistone
- $a = 350$  mm distanza del carico concentrato dall'appoggio
- $L = 1000$  mm luce tra gli appoggi

L'ipotesi di base per le successive considerazioni è il comportamento elastico-lineare a farfalla con cui si può risalire alla resistenza a trazione attraverso la formula di Navier:

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W}$$

$$W = \frac{J}{y_n}$$

Dove  $W$  è il modulo di resistenza della sezione che dipende dall'inerzia  $J$  e dalla distanza dall'asse neutro alla fibra più sollecitata.

Lo stato tensionale dei singoli materiali è stato determinato a partire dalle prove a flessione sugli stessi. Si è proceduto con la determinazione dello stato tensionale dei singoli materiali a partire dal pannello in legno. Avendo a disposizione due multistrato di dimensioni 1220x300x9 mm è stata effettuata una prova a quattro punti come sopra indicato che ha generato il seguente grafico.

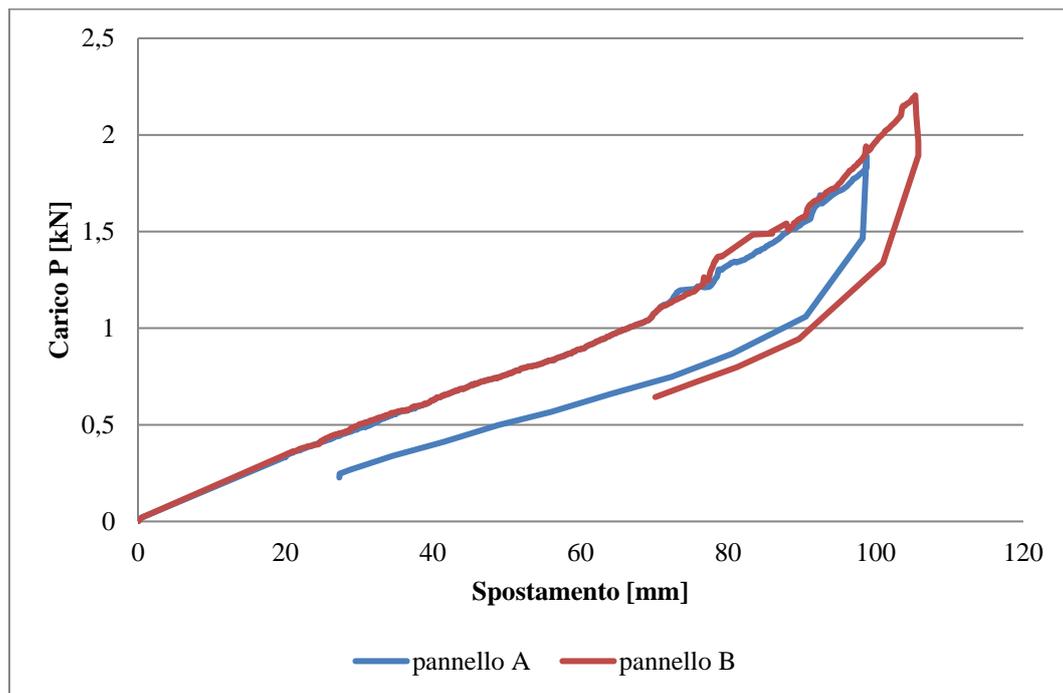


Figura 4-28 Grafico carico-spostamento dei pannelli multistrato

Come si può notare dal grafico le due curve presentano il medesimo andamento fino a  $P = 1\text{ kN}$ . Nell'intervallo di valori che va da 0 kN a 1 kN entrambi i provini sono caratterizzati da un comportamento elastico-lineare. È possibile ipotizzare che la tensione corrispondente al valore massimo dell'intervallo sia calcolabile attraverso la formulazione di Navier. Il valore estrapolato sarà quello utilizzato nel calcolo del momento resistente della sezione mista. Il pannello in legno considerato presenta sezione resistente 300x9 mm e le prove sono state effettuate sulla stessa macchina di prova utilizzata per i test di laboratorio. Di conseguenza la luce di calcolo è sempre 1000 mm.

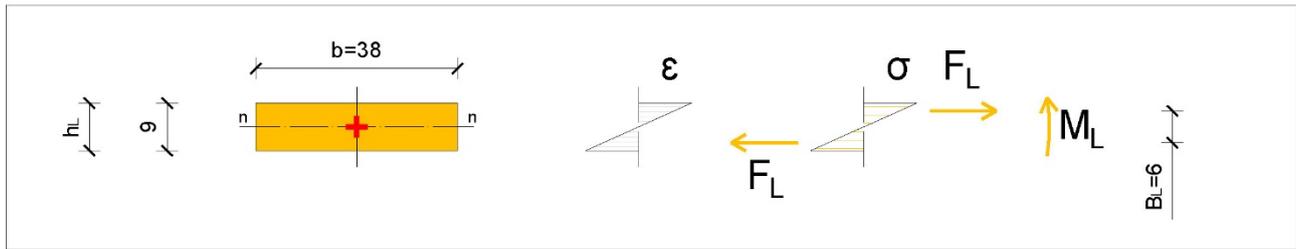


Figura 4-29 Sezione del pannello multistrato e andamento delle tensioni interne

Per rapportare tutto ad una singola travetta si calcola quindi il modulo di resistenza della sezione rettangolare del multistrato pari a:

$$W = \frac{J}{y_n} = \frac{b h_L^3}{12} \cdot \frac{2}{h_L} = \frac{38 \cdot 9^3}{12} \cdot \frac{2}{9} = 513 \text{ mm}^3$$

Da cui si risale al momento massimo agente sulla sezione:

$$M_u = F \cdot a = \frac{P(38/300)}{2} \cdot a = \frac{0,13}{2} \cdot 350 = 22,75 \text{ kNm}$$

Successivamente si calcola la resistenza ultima a trazione della fibra più sollecitata del legno:

$$\sigma_{L,u} = \frac{M_u}{W} = \frac{22,75}{513} = 0,044 \text{ kN/mm}^2$$

La tensione così calcolata verrà utilizzata in seguito nella determinazione delle sollecitazioni interne della sezione mista dell'impalcato.

Si procede secondo lo stesso metodo sul pannello in grigliato di dimensioni pari a 38x44x1220 mm di cui si riporta la curva carico-spostamento.

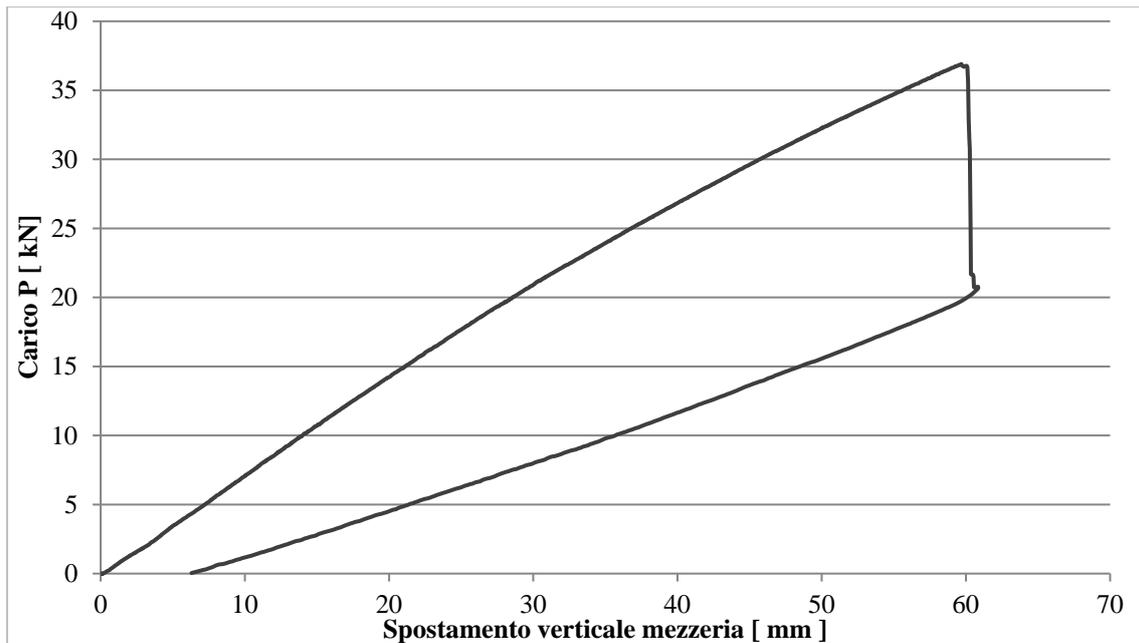


Figura 4-30 Prova monotona su grigliato singolo

Poiché il grigliato presenta un comportamento elastico fino a rottura, per la determinazione del momento massimo si considera il carico che porta alla rottura  $P = 36,90$  kN. Ai fini del calcolo delle tensioni, si considerano solo le tensioni sulle chiusure orizzontali di altezza 3 mm in quanto i traversi non incidono significativamente sulle caratteristiche meccaniche.

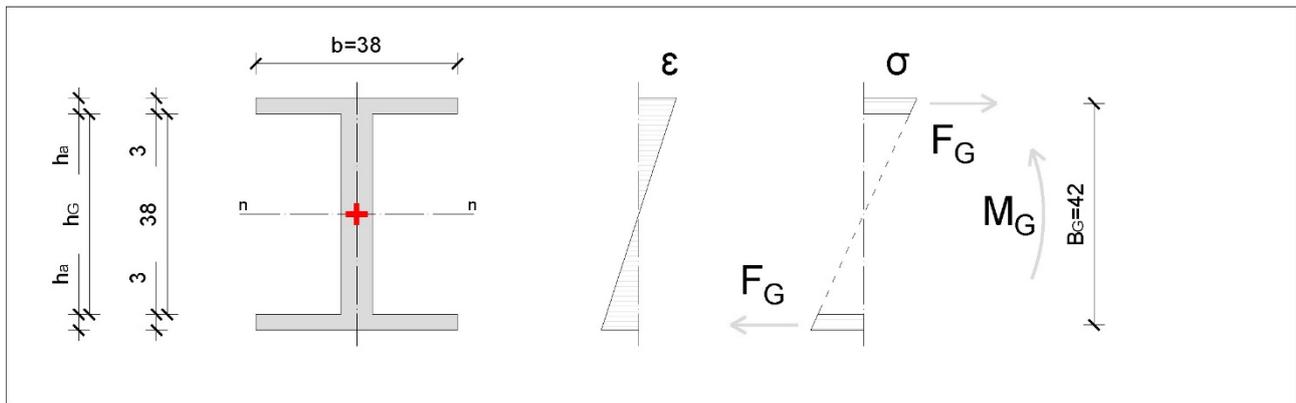


Figura 4-31 Sezione del pannello multistrato e andamento delle tensioni interne

Nell'ipotesi di comportamento elastico lineare del materiale, si calcola il modulo di resistenza delle sole ali che vale:

$$J_{G \text{ ali}} = 2 \times \left[ \frac{(38 \cdot 3^3)}{12} + (38 \cdot 3) \cdot (22 - 1,5)^2 \right] = 95988 \text{ mm}^4$$

$$W = \frac{J_{g,ali}}{y_n} = \frac{95988}{44} \cdot 2 = 4363 \text{ mm}^3$$

Da cui si risale al momento massimo agente sulla sezione:

$$M_u = F \cdot a = \frac{P(38/300)}{2} \cdot a = \frac{4,67}{2} \cdot 350 = 817 \text{ kNmm}$$

e successivamente alla resistenza ultima a trazione per il grigliato:

$$\sigma_{G,u} = \frac{M_u}{W} = \frac{817}{4363} = 0,19 \text{ kN/mm}^2$$

La tensione massima calcolata verrà utilizzata in seguito nella determinazione delle sollecitazioni interne della sezione mista dell'impalcato.

L'andamento delle tensioni nella sezione mista è strettamente correlato al rapporto tra i moduli elastici. Si determina la tensione massima del multistrato nella fase elastica ai fini dell'utilizzo nel calcolo del momento resistente per la sezione mista di altezza totale  $H = 62 \text{ mm}$ . Sia nel pannello multistrato che nel grigliato le tensioni hanno un andamento lineare con valore nullo in corrispondenza dell'asse neutro.

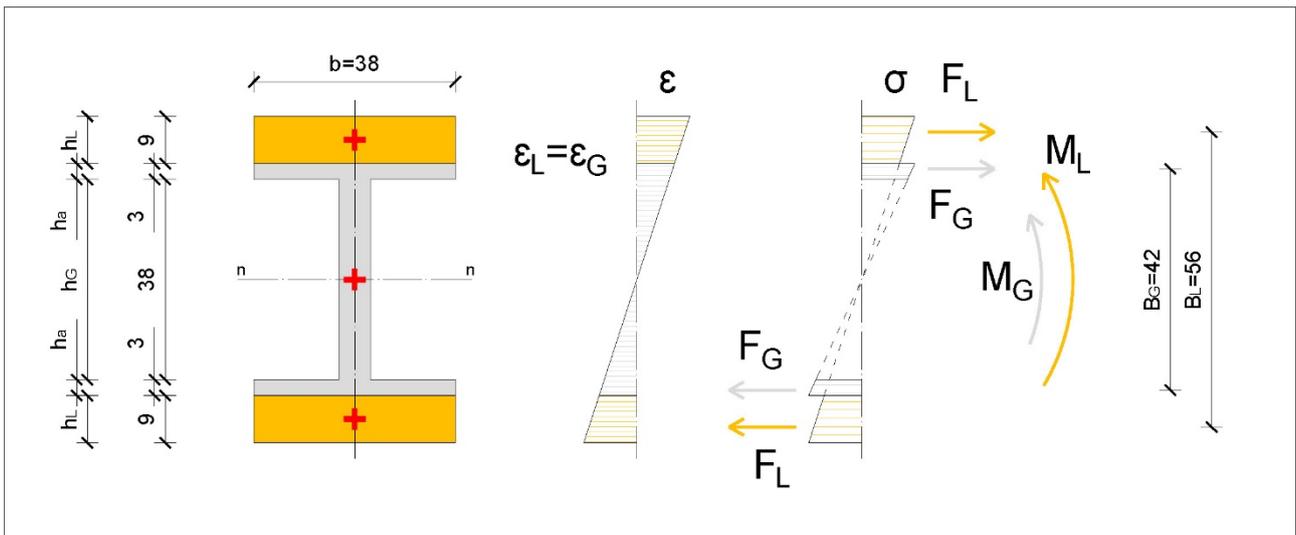


Figura 4-32 Sollecitazioni interne delle ali del grigliato

Per prima cosa si calcola lo stato tensionale all'interno del pannello multistrato. Si impone che la resistenza massima a trazione della fibra più esterna del pannello sia la tensione corrispondente alla rottura per trazione. Rimane incognita la tensione all'interfaccia legno-grigliato  $\sigma_{L\ int}$  che si ricava mediante proporzioni geometriche a partire dal valore  $\sigma_{L,u}$ , calcolato precedentemente:

$$\sigma_{L,u} = 0,044 \text{ kN/mm}^2$$

$$\sigma_{G,u} = 0,19 \text{ kN/mm}^2$$

$$\sigma_{L\ int} = \frac{\sigma_{u,L} \cdot \left(\frac{H}{2} - h_L\right)}{\frac{H}{2}} = \frac{0,044 \cdot (31 - 9)}{31} = 0,031 \text{ kN/mm}^2$$

La resina epossidica utilizzata permette di considerare il perfetto incollaggio tra gli elementi componenti garantendo il mantenimento delle sezioni piane e una curvatura costante dei materiali. Condizioni che permettono di considerare la medesima deformazione all'interfaccia legno-grigliato. Poiché i materiali hanno comportamento elastico lineare per calcolare lo stato tensionale all'interno del grigliato si può procedere uguagliando le deformazioni e ricordando che i moduli elastici valgono:

$$E_G = 12000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_L = 7500 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{L\ int} = \varepsilon_{G\ int}$$

$$\frac{\sigma_{L\ int}}{E_L} = \frac{\sigma_{G\ int}}{E_G}$$

$$\sigma_{G\ int} = \frac{\sigma_{L\ int}}{E_L} \cdot E_G = 0,05 \text{ kN/mm}^2$$

Calcolato il valore della tensione nel lembo più alto dell'ala del grigliato, all'interfaccia con il pannello multistrato, si procede ricavando la tensione nel lembo inferiore attraverso semplici proporzioni geometriche:

$$\sigma_{G\ inf} = \frac{\sigma_{G\ int} \cdot \left(\frac{h_G}{2} - h_a\right)}{\frac{h_G}{2}} = \frac{0,05 \cdot (22 - 3)}{22} = 0,043 \text{ kN/mm}^2$$

Il momento flettente massimo che la sezione riesce a sopportare nella fase elastica si ricava a partire dalle tensioni ricavate sopra.

Si calcolano le rispettive forze interne:

$$F_G = \frac{(\sigma_{G\ int} + \sigma_{G\ inf}) \cdot h_a}{2} \cdot b = \frac{(0,05 + 0,043) \cdot 3}{2} \cdot 38 = 5,3 \text{ kN/mm}^2$$

$$F_L = \frac{(\sigma_{L,u} + \sigma_{L\ int}) \cdot h_L}{2} \cdot b = \frac{(0,044 + 0,031) \cdot 9}{2} \cdot 38 = 12,8 \text{ kN/mm}^2$$

E i momenti generati dalla coppia interna:

$$M_G = F_G \cdot B_G = 5,3 \cdot 42 = 223 \text{ kNmm}$$

$$M_L = F_L \cdot B_L = 12,8 \cdot 56 = 717 \text{ kNmm}$$

Il momento resistente totale è pari alla somma dei due:

$$M_{RdT} = M_G + M_L = 223 + 717 = 940 \text{ kNmm}$$

Il momento resistente  $M_{RdT}$  è il massimo momento che la sezione mista del pannello sandwich può sopportare prima della rottura in caso di assenza di discontinuità verticali all'interno del pannello stesso in quel punto. In caso fossero presenti discontinuità verticali, sempre in via semplificata, si può considerare nullo il contributo resistente del grigliato in PRFV ed il momento resistente diventa:

$$M_{RdD} = M_L = 717 \text{ kNmm}$$

La verifica per un generico solaio di dimensioni variabili può essere condotta per le sezioni sollecitate a momento massimo e per le sezioni in cui siano presenti discontinuità ponendo che il momento sollecitante  $M_{EdT}$  sia sempre minore o uguale a quello resistente massimo

$$M_{EdT} \leq M_{RdT} \text{ per le sezioni prive di discontinuità}$$

$$M_{EdD} \leq M_{RdD} \text{ per le sezioni con discontinuità}$$

Volendo effettuare la verifica considerando i carichi previsti da normativa e lo schema di carico di trave appoggiata con carico  $q$  si possono utilizzare i valori già calcolati per civile abitazione e per ambienti suscettibili di affollamento.

- Civile abitazione

$$q_{38stu} = 5,639 \cdot 0,038 = 0,214 \text{ kN/m}$$

$$M_{EdT} = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,214 \cdot 1^2}{8} = 0,027 \text{ kNm} = 27 \text{ kNmm}$$

$M_{EdT} \leq M_{RdT}$  per le sezioni prive di discontinuità

$27 \leq 940$  verificato

- Ambienti suscettibili di affollamento

$$q_{38stu} = 7,139 \cdot 0,038 = 0,271 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,271 \cdot 1^2}{8} = 0,034 \text{ kNm} = 34 \text{ kNmm}$$

$M_{EdT} \leq M_{RdT}$  per le sezioni prive di discontinuità

$34 \leq 940$  verificato

Come era già stato confermato precedentemente la condizione di carico per civile abitazione e per ambienti suscettibili di affollamento, anche con uno schema statico particolarmente penalizzante come quello di trave su due appoggi, sottopone l'impalcato sandwich a sollecitazioni ben lontane da quelle di crisi.

Per verificare inoltre, che le considerazioni svolte siano in linea con i dati sperimentali, è possibile verificare se il momento corrispondente al carico di rottura di alcuni provini sia effettivamente inferiore rispetto al momento resistente definito nel metodo operativo.

Ad esempio, a partire dai dati sperimentali della configurazione di impalcato con sezione simmetrica incollata con resina epossidica si evince che il carico di rottura del provino III.1 è stato  $P = 46 \text{ kN}$  da cui si può ricavare il momento resistente sperimentale  $M_{RS}$  agente sulla sezione più sollecitata in mezzzeria:

$$M_{RS} = F \cdot a = \frac{P(38/300)}{2} \cdot a = \frac{5,83}{2} \cdot 350 = 1020 \text{ kNmm}$$

La verifica porta:

$$M_{RS} \geq M_{RdT} \text{ per le sezioni prive di discontinuit\`a}$$

$$1020 \geq 940 \text{ verificato}$$

Procedendo allo stesso modo alla verifica del provino III.10 che presenta sezione simmetrica con legno all'intradosso e all'estradosso, incollaggio a base di resina epossidica e discontinuit\`a in mezzzeria. Il carico di rottura di questo provino risulta  $P = 13 \text{ kN}$  da cui si pu\`o ricavare il momento agente sulla sezione pi\`u sollecitata in mezzzeria:

$$M_{RS} = F \cdot a = \frac{P(38/300)}{2} \cdot a = \frac{4,67}{2} \cdot 350 = 288 \text{ kNmm}$$

La verifica, a causa della discontinuit\`a, porta:

$$M_{RS} \geq M_{RdD} \text{ per le sezioni prive di discontinuit\`a}$$

$$288 \geq 717 \text{ non verificato}$$

Le considerazioni svolte portano a confermare come la presenza delle discontinuit\`a all'interno della sezione del pannello sandwich siano molto penalizzanti. \`E quindi opportuno prevedere degli accorgimenti in fase di progettazione che impediscano o minimizzino la necessit\`a di avere discontinuit\`a in campata.

## 4.4 SOLUZIONE PROGETTUALE

L'elemento di fabbrica progettato, \`e chiamato ad assolvere le funzioni ordinarie di un orizzontamento che sono sostegno dei carichi e ripartizione degli stessi alla struttura in elevazione.

Nei paragrafi seguenti verranno descritte le scelte progettuali che sono state effettuate a seguito delle valutazioni analitiche delle prove sperimentali. Si descriver\`a anche una possibile stratigrafia di completamento per rendere l'impalcato utilizzabile nelle nuove costruzioni o in interventi di recupero dell'esistente. Verranno in ultimo proposte alcune soluzioni operative per l'installazione dei pannelli e per la loro connessione alla muratura d'ambito e all'orditura principale. Si vuole inoltre garantire una stretta collaborazione tra impalcato e orditura principale al fine di scongiurare, in caso di eventi eccezionali come il sisma, collassi strutturali definiti come primo modo di danno.<sup>1</sup>

#### 4.4.1 SCELTE PROGETTUALI

Alla luce dei risultati ottenuti nella fase sperimentale, dopo l'analisi sistematica dei dati raccolti e in accordo con gli obiettivi prefissati si è giunti alla definizione di una soluzione progettuale che possa sia soddisfare le esigenze di intervento in caso di sostituzione completa o nuova progettazione del solaio sia costituire allo stesso tempo una valida alternativa per il recupero dell'esistente.

La scelta della migliore configurazione è stata dettata da diversi fattori. In primo luogo sono state considerate le caratteristiche prestazionali. Nella definizione dell'impalcato strutturale sono state poi considerate ragioni di praticità sia nella realizzazione del pannello sandwich sia nella modalità di posa dei pannelli stessi. In ultimo si è cercato di contenere i costi laddove l'utilizzo di materiali costosi non apportasse un adeguato miglioramento delle prestazioni.

La configurazione scelta presenta le seguenti caratteristiche:

- Sezione dell'impalcato simmetrica con grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno da 9 mm
- Resina epossidica (Biresin) come adesivo all'interfaccia legno-grigliato, senza l'utilizzo di una rete in vetroresina
- Assenza di discontinuità nel grigliato in direzione trasversale alla luce libera di inflessione.



Figura 4-33 Soluzione progettuale: pannello sandwich per solaio

Dal punto di vista analitico, i risultati ottenuti hanno dimostrato che la soluzione con grigliato interposto presenta vantaggi sotto più aspetti. In termini di rigidità si raggiungono valori elevati con deformazione minime nelle condizioni di utilizzo. Il contributo del grigliato stesso alla rigidità, che in una prima fase di calcolo teorico risultava pari al 30%, da prove sperimentali è risultato essere superiore fino a raggiungere il 40% e in linea con le altre configurazioni. Questo risulta un buon compromesso, poiché valori maggiori di “*sfruttamento*” renderebbero il comportamento del pannello sandwich più simile a quello del singolo grigliato chiuso senza il contributo irrigidente dei pannelli multistrato lignei.

Un ulteriore aspetto non trascurabile riguarda la possibilità di accostare i pannelli nelle due direzioni del piano sfruttando la battentatura (sfalsamento) superiore e inferiore del legno. In tal modo è possibile procedere allo snellimento delle fasi di cantiere garantendo delle pezzature standard nel montaggio del solaio. La possibilità di effettuare uno sfalsamento delle giunzioni nei tre strati dell’impalcato è di notevole importanza per garantire il comportamento a lastra della soluzione progettuale e la relativa riduzione delle deformazioni verticali.

I criteri che hanno portato a tale scelta, inoltre, sono legati ai concetti di miglioramento sismico secondo quanto riportato al capitolo 6, “criteri per il miglioramento sismico e tecniche di intervento” nelle “Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008”.<sup>2</sup> In particolare i temi salienti possono riassumersi come segue:

- riduzione delle masse
- durabilità dei materiali
- non invasività
- integrazione con l’esistente
- reversibilità
- rigidità sul piano del solaio.

Per quanto concerne la riduzione delle masse la soluzione proposta è sicuramente adeguata. Rispetto ad una tradizionale soletta collaborante in cemento armato, infatti, l’impalcato INTEGRO FS PRFV ha un peso di circa 3 volte inferiore. A fronte di circa  $0,4 \text{ kN/m}^2$  una soletta in calcestruzzo di 5 cm si attesta su un peso indicativo di  $1,2 \text{ kN/m}^2$ . Questo valutando solamente i carichi permanenti strutturali.

Dal punto di vista della durabilità dell’intervento, rispetto ai materiali monolitici, i compositi hanno una lunga vita a fatica e alta resistenza chimica alla corrosione. Sono materiali facilmente adattabili a diversi utilizzi strutturali e possono operare per lunghi periodi di tempo in ambienti aggressivi. Possono essere portati a misura attraverso semplici sistemi di taglio, utilizzabili anche in cantiere, per adattarsi alle diverse configurazioni geometriche. I danneggiamenti locali che avvengono all’interno del composito non ne pregiudicano il comportamento globale e possono essere facilmente riparati.

La concezione strutturale del pannello sandwich ben si sposa anche con i criteri di reversibilità e non invasività previsti dalle linee guida. Il sistema di montaggio prevede la connessione agli

elementi strutturali, quali orditura primaria e murature d'ambito, solo tramite collegamenti meccanici. Questo comporta anche una buona integrazione con l'edificio esistente che non subisce alterazioni dell'apparato costruttivo con cui è stato concepito.

Per quanto riguarda il processo produttivo, l'impalcato in esame si configura come un elemento prefabbricato di dimensioni massime pari a 1000x2000 mm, in linea con l'attuale produzione dei grigliati stampati della ditta MM. Le dimensioni e il peso leggero lo rendono inoltre maneggevole durante le operazioni di montaggio senza necessitare di manodopera specializzata. L'arrivo in cantiere di elementi preconfezionati e pronti per l'installazione diminuisce i tempi di lavoro ed elimina la fase di maturazione necessaria alle soluzioni tecniche tradizionali con soletta armata gettata in opera.

---

#### 4.4.2 STRATIGRAFIA DI COMPLETAMENTO

---

I solai ad ordito e impalcato in struttura lignea presentano generalmente un isolamento acustico insufficiente poiché gli elementi coinvolti presentano una massa molto ridotta. Anche l'impalcato oggetto di ricerca in questa tesi necessita opportuni accorgimenti in fase di realizzazione della stratigrafia di completamento per aumentare la massa del solaio così da aumentare le prestazioni fonoisolanti e fornire un adatto benessere acustico. Agire sulla stratigrafia di completamento consente anche di garantire un adeguato comfort termico e permette alla soluzione proposta di essere utilizzata come orizzontamento verso ambienti non riscaldati o verso l'esterno.

La stratigrafia proposta è costituita da soluzioni standardizzate reperibili sul mercato e serve, ai fini della ricerca, per definire una più accurata analisi dei carichi e una caratterizzazione termoacustica del solaio compatibile con i limiti posti da normativa.

Il pacchetto di finitura al di sopra dell'impalcato strutturale è costituito da:

- Isolante acustico massivo: Lastre a nido d'ape Fermacell con granulato di marmo
- Isolante termico: Polistirene XPS Floormate 300-A
- Isolante da calpestio: Anticalpestio Mapesilent Roll
- Sottopavimento: Lastre gessofibra Fermacell
- Sistema termoriflettente: Isoldrum Silver
- Sistema attivo scaldante elettrico: Film scaldante Accona
- Sistema termodiffondente: Isoldrum N sottopavimento
- Pavimentazione: doghe in legno con fissaggio a secco

#### 4.4.2.1 ISOLANTE ACUSTICO MASSIVO

Subito al di sopra del pannello sandwich, si andranno a porre dei fogli a nido d'ape, dell'altezza di 30mm, da riempire con apposito riempimento granulare, in modo da appesantire il solaio grezzo di circa  $45 \text{ kg/m}^2$ . Il granulato di marmo utilizzato è commercializzato dalla ditta Fermacell del gruppo Xella e presenta una granulometria medio-fine, 1-4 mm. Risulta stabile, imputrescibile e non soggetto a degrado. Il materiale è molto pesante, ha infatti una densità di circa  $1500 \text{ kg/m}^3$  che, seppur non rispettando il requisito di leggerezza, consente di conferire maggiore massa all'impalcato in modo da poter fare valutazioni di tipo acustico.

Abbinando questo sistema a controsoffitti sospesi in modo non rigido si ottengono valori di isolamento acustico conformi alle normative vigenti. Si viene a ricreare, in questo modo, un sistema massa (riempimento granulare) / molla (aria) / massa (controsoffitto), la cui efficienza a livello acustico è superiore a quella delle strutture monolitiche pesanti. Inoltre, tale strato, collabora all'isolamento termico dato che i granuli ( $\Phi = 1 \div 4 \text{ mm}$ ) hanno una conducibilità termica pari a  $\lambda = 0,09 \text{ W/mK}$  ( $R_D = \text{spessore}/\lambda = 0,03/0,09 = 0,3 \text{ m}^2\text{K/W}$ ).

Il materiale è distribuito in sacchi da 22,5 kg, pertanto la movimentazione in relazione al peso e al volume dell'imballaggio, è accettabile.

La posa risulta agevole con l'ausilio di un'asta rigida e non produce polveri, il granulato dopo la prima stesura necessita di essere compattato, tramite vibratura manuale, così da ridurre gli spazi interstiziali risultanti dal primo riempimento ed integrare il prodotto mancante.

Il criterio di reversibilità riguardo all'uso di questo prodotto nell'impalcato è pienamente rispettato, poiché è possibile rimuovere il materiale, aspirandolo con un bidone aspiratutto di tipo industriale, e stoccarlo per nuovi usi, senza che questo risulti alterato.



Figura 4-34 Nido d'ape e riempimento FERMACELL.

**4.4.2.2 ISOLANTE TERMICO**

Per l'estrema leggerezza, l'efficacia e la lavorabilità si è scelto il polistirene espanso estruso monostrato Floormate 300 prodotto dalla Dow.

<b>conducibilità termica</b>	$\lambda$	0,033 W	W/mK
<b>coefficiente resistenza diffusione vapore</b>	$\mu$	150	/
<b>Resistenza a compressione</b>	$\epsilon = 0,1$	$\geq 300$	kPa
<b>Resistenza a compressione</b>	lungo termine	$\geq 90$	kPa

Tabella 4-7 Proprietà del polistirene

Lo spessore dello strato di polistirene varia a seconda del solaio al quale viene applicato poiché la normativa prescrive limiti di trasmittanza diversi a seconda degli ambienti che l'elemento divide. I limiti trasmittanza  $U$  [ $W/m^2K$ ] dell'involucro edilizio (Allegato B del Decreto interministeriale 26 giugno 2015: Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici).

Si adottano quindi spessore differenti ma già in produzione.

Per gli elementi divisori orizzontali e verticali tra edifici o unità confinanti, a prescindere dalla zona climatica, il valore limite fissato è pari a  $0,80$  [ $W/m^2K$ ]. In questo caso si adottano pannelli con spessore pari a 3 cm, in grado di fornire  $R_D = \text{spessore}/\lambda = 0,03/0,033 = 0,9$   $m^2K/W$ .

Per i solai confinanti con ambienti esterni si adottano pannelli con spessore pari a 10cm, in grado di fornire una resistenza termica pari a  $R_D = \text{spessore}/\lambda = 0,1/0,033 = 3,0$   $m^2K/W$ .



Figura 4-35 Isolante Floormate 300

**4.4.2.3 ISOLANTE AL RUMORE DA CALPESTIO**

Per sopperire al problema del rumore da calpestio si adotta un sistema modulare, Mapesilent Roll che consiste in una membrana elastoplastomerica di 1 cm a base di bitumi e polimeri speciali con armatura in poliesteri, accoppiata ad uno strato resiliente in fibra di poliesteri, rivestita in superficie

da un tessuto non tessuto in polipropilene, prodotto dalla Mapei, che inoltre contribuisce all'isolamento termico ( $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ ,  $RD = \text{spessore}/\lambda = 0,01/0,035 = 0,28 \text{ m}^2\text{K/W}$ ).

Le membrane sono impermeabili quindi svolgono anche un'importante funzione di protezione, per gli strati sottostanti, da eventuali perdite o allagamenti.

Il sistema in questione permette la rapida e semplice realizzazione di uno strato continuo privo di ponti termici e acustici. Non risulta necessario o possibile effettuare operazioni preventive in officina per agevolare quelle di cantiere che risultano già semplici e rapide data la natura della soluzione fornita dalla Mapei, ideata appositamente per massetti a secco.



Figura 4-36 Fasi della posa dell'isolante da calpestio

#### 4.4.2.4 SOTTOPAVIMENTO

Per completare il sistema massa–molla–massa, già anticipato nel paragrafo precedente, si è scelto di posare sopra l'isolante da calpestio pannelli in gesso fibra, prodotti dalla ditta Fermacell. Il materiale scelto, inoltre, ha funzione di ripartizione dei carichi e conferimento di massa all'intero pacchetto.

Le lastre Fermacell Gessofibra sono composte da due soli componenti naturali: gesso e fibre di cellulosa ottenute da carta riciclata selezionata e sminuzzata. Si tratta quindi di una soluzione che rispecchia a pieno i principi di sostenibilità ambientale. Miscelando questi materiali in acqua (senza altri leganti), il gesso reagisce per calcinazione e avvolge le fibre di cellulosa penetrandole. Sottoponendo tale miscela a compressione si ottengono le lastre base di gessofibra. In seguito al taglio, nei vari formati previsti, e all'asciugatura, le lastre vengono levigate e impermeabilizzate con una mano di primer su entrambi i lati. Grazie alla presenza di fibre le lastre hanno elevata stabilità, resistenza meccanica e ottime caratteristiche di resistenza al fuoco.

<b>Peso</b>		0,23	kN/m <sup>2</sup>
<b>conducibilità termica</b>	$\lambda$	0,033 W	W/mK
<b>coefficiente resistenza diffusione vapore</b>	$\mu$	13	/
<b>Resistenza termica</b>	R <sub>D</sub>	0,06	m <sup>2</sup> K/W
<b>Protezione antincendio</b>	F30	30	minuti

Tabella 4-8 Proprietà delle lastre accoppiate in gessofibra 10 + 10 mm

Le lastre per sottofondi a secco Fermacell risultano maneggevoli, lavorabili da una sola persona, facili da posare, hanno una notevole rapidità d'ecuzione e sono subito calpestabili e rivestibili, resistenti all'abrasione. I pannelli sono indicati anche per gli ambienti umidi e sotto i sistemi di riscaldamento a pavimento.

Le lastre per sottofondo Fermacell sono costituite da due lastre di Fermacell Gessofibra da 10 mm incollate tra loro. Le due lastre sono disposte in modo sfalsato, in modo da formare una battentatura larga 50 mm.

La dimensione delle lastre è 1500 x 500 mm (0,75 m<sup>2</sup>).



Figura 4-37 Lastre di gessofibra

#### 4.4.2.5 SISTEMA TERMORIFLETTENTE

Prima di inserire il sistema scaldante a pavimento è opportuno prevedere uno strato termoriflettente in modo da minimizzare le dispersioni di energia verso l'esterno o verso ambienti non riscaldati.



**SCHEDA TECNICA**

NUOVE COSTRUZIONI E RISANAMENTO → GAMMA PARQUET → LINEA CASA

## Isoldrum Silver

Materassino isolante in polietilene NPE, in spessore circa 3 mm, rivestito con film alluminato e dotato di nastro adesivo per sigillare la cimosa.  
**Da posare con il film alluminato rivolto verso l'alto.**

■ <b>SPESSORE</b>	Circa 3 mm.
■ <b>ISOLAMENTO DRUM SOUND</b>	A. Intensità 32,1 sone (reference %).
■ <b>ISOLAMENTO AL CALPESTIO</b>	$\Delta L_w = 19$ dB (sotto 7 mm di laminato DPL).
■ <b>COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE</b>	7.500 cicli a 25 kPa.
■ <b>RESISTENZA ALL'IMPATTO - LARGE BALL TEST</b>	1700 mm (sotto 7 mm di laminato DPL).
■ <b>RESISTENZA A COMPRESSIONE</b>	10 kPa (0,5 mm di deformazione).
■ <b>CREEP DEFORMAZIONE VISCOSA</b>	0,5 kPa (max carico con def < 0,5 mm in 10 anni).
■ <b>RESISTENZA TERMICA</b>	$R_f = 0,094$ m <sup>2</sup> K/W (a 10°C).
■ <b>VALORE sd</b>	150 metri.
■ <b>FORMATO</b>	In rotoli da: 1 m x 15 m pari a 15 m <sup>2</sup> .
■ <b>CONFEZIONE</b>	In scatole di cartone da 28 rotoli (420 m <sup>2</sup> ).

**isoldrum**

Figura 4-38 Proprietà materassino termoriflettente

Questa funzione può essere svolta dal materassino termoriflettente Isoldrum Silver 2 mm prodotto dalla Isolmant che riflette il calore prodotto dal sistema di riscaldamento posizionato sopra di esso proteggendo i precedenti strati ed evitandone un rapido ed anomalo deperimento. Oltre alla funzione termoriflettente migliora l'isolamento dai rumori da calpestio.

#### 4.4.2.6 SISTEMA ATTIVO SCALDANTE ELETTRICO

La soluzione impiantistica adottata per il riscaldamento è di tipo elettrico, attraverso l'installazione di un film riscaldante sotto pavimento. L'impianto di riscaldamento è costituito da un film scaldante Accona prodotto dalla Ath Energia, distribuito sotto forma di rotoli.

Il riscaldamento elettrico a pavimento è un sistema a una bassa inerzia, risulta pertanto il sistema ottimale se installato in un edificio molto isolato, preferibilmente dall'interno.

Il film riscaldante deve avere le seguenti caratteristiche:

- resistenza metallica
- emissione radiante ad infrarossi a lunga distanza (circa 7 metri)
- conforme alla CEI335-2-106, UTE C 73-999; 97 ed EN 60335-2-96
- protezione contro i surriscaldamenti

- protezione finale in PVC rinforzato.

Il film riscaldante Accona, per il riscaldamento elettrico di pavimenti isolati, viene fornito in rotoli di larghezza, lunghezza e potenza variabili, e può essere installato in tutti gli ambienti compresi quelli umidi.

Il prodotto risulta semplice da installare e non necessita di manutenzione. Può essere posato senza sistemi autolivellanti ed è compatibile con pavimenti a secco in legno massello o laminato. La pellicola riscaldante deve essere srotolata e posizionata direttamente sopra il sottofondo del pavimento, su un materassino morbido di polietilene standard a cui viene fissata con del nastro adesivo e poi ricoperta dal rivestimento previsto.

Come per tutti i sistemi di riscaldamento elettrico a pavimento, è importante che lo strato isolante sulla parte posteriore del film riscaldante Accona sia efficace, così da evitare le perdite di calore verso il basso, pertanto è stato previsto un elemento termoriflettente descritto precedentemente.

Descrizione	Potenza [W]	Larghezza [mm]	Lunghezza [mm]
Film riscaldante in rotoli ACCONA 30 W/m² - 36 W-230 V-500x400 - Class II	36	500	2400
Film riscaldante in rotoli ACCONA 30 W/m² - 36 W-230 V-500x2950 - Class II	36	500	3000
Film riscaldante in rotoli ACCONA 30 W/m² - 36 W-230 V-500x4000 - Class II	36	500	4000
Film riscaldante in rotoli ACCONA 30 W/m² - 36 W-230 V-500x4800 - Class II	36	500	4800
Film riscaldante in rotoli ACCONA 30 W/m² - 36 W-230 V-500x5850 - Class II	36	500	5850
<b>500 mm - 150 W/m²</b>			
Descrizione	Potenza [W]	Larghezza [mm]	Lunghezza [mm]
Film riscaldante in rotoli ACCONA 150 W/m² - 180 W-230 V-500x400 - Class II	180	500	2400
Film riscaldante in rotoli ACCONA 150 W/m² - 225 W-230 V-500x3000 - Class II	225	500	3000
Film riscaldante in rotoli ACCONA 150 W/m² - 270 W-230 V-500x4000 - Class II	270	500	4000
Film riscaldante in rotoli ACCONA 150 W/m² - 315 W-230 V-500x4800 - Class II	315	500	4800
Film riscaldante in rotoli ACCONA 150 W/m² - 360 W-230 V-500x5850 - Class II	360	500	5850
Film riscaldante in rotoli ACCONA 150 W/m² - 405 W-230 V-500x6450 - Class II	405	500	6450
<b>540 mm - 135 W/m²</b>			
Descrizione	Potenza [W]	Larghezza [mm]	Lunghezza [mm]
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 44 W-230 V-540x850 - Class II	44	540	335
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 88 W-230 V-540x1100 - Class II	88	540	1110
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 132 W-230 V-540x1350 - Class II	132	540	1350
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 176 W-230 V-540x2250 - Class II	176	540	2240
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 220 W-230 V-540x2925 - Class II	220	540	2925
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 264 W-230 V-540x3600 - Class II	264	540	3600
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 308 W-230 V-540x4275 - Class II	308	540	4200
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 352 W-230 V-540x4950 - Class II	352	540	4950
Film riscaldante in rotoli ACCONA 135 W/m² - 396 W-230 V-540x5625 - Class II	396	540	5250
<b>540 mm - 175 W/m²</b>			
Descrizione	Potenza [W]	Larghezza [mm]	Lunghezza [mm]
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 105 W-230 V-540x1100 - Class II	105	540	1170
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 140 W-230 V-540x1350 - Class II	140	540	1350
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 175 W-230 V-540x2250 - Class II	175	540	2240
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 210 W-230 V-540x2925 - Class II	210	540	2925
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 245 W-230 V-540x3600 - Class II	245	540	3600
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 280 W-230 V-540x4275 - Class II	280	540	4200
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 315 W-230 V-540x4950 - Class II	315	540	4950
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 350 W-230 V-540x5625 - Class II	350	540	5250
Film riscaldante in rotoli ACCONA 175 W/m² - 385 W-230 V-540x6300 - Class II	385	540	6300

**ACCONA GAMMA**  
FILM RISCALDANTE IN ROTOLI PER PAVIMENTI FLOTTANTI, DA POSARE SOPRA UN MATERASSINO DI POLIETILENE STANDARD (NON INCLUSO)  
(# 42-43)




Descrizione Tecnica

Figura 4-39 Proprietà del film scaldante Accona

#### 4.4.2.7 SISTEMA TERMODIFFONDENTE

Il film diffondente Isoldrum N 1 mm ( $R_D = 0$ ;  $032 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) serve per uniformare la distribuzione del calore prodotto dal film sottostante e attenua la propagazione del rumore da calpestio.

SCHEDA TECNICA



NUOVE COSTRUZIONI E RINNOVAMENTO → GAMMA PARQUET → LINEA OSA





## Isoldrum N

Materassino isolante in polietilene di tipo "HDPE", ad elevata densità, in spessore circa 1 mm, gofrato e serigrafato.

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>SPESSORE</b></li> <li>■ <b>ISOLAMENTO DRUM SOUND</b></li> <li>■ <b>ISOLAMENTO AL CALPESTIO</b></li> <li>■ <b>COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE</b></li> <li>■ <b>RESISTENZA ALL'IMPATTO - LARGE BALL TEST</b></li> <li>■ <b>RESISTENZA A COMPRESSIONE</b></li> <li>■ <b>CREEP DEFORMAZIONE VISCOSA</b></li> <li>■ <b>VALORE sd</b></li> <li>■ <b>RESISTENZA TERMICA</b></li> <li>■ <b>FORMATO</b></li> <li>■ <b>CONFEZIONE</b></li> </ul>	<p>Circa 1 mm.</p> <p>AA+ Intensità 23 sone (28%).</p> <p><math>\Delta L_w = 19</math> dB (sotto 7 mm di laminato DPL).</p> <p>&gt;100.000 cicli a 25 kPa.</p> <p>600 mm (sotto 7 mm di laminato DPL).</p> <p>110 kPa (0,5 mm di deformazione).</p> <p>30 kPa (max carico con def &lt; 0,5 mm in 10 anni).</p> <p>6 metri.</p> <p><math>R_t = 0,032</math> m<sup>2</sup>K/W (a 10° C).</p> <p>In rotoli da: 1 m x 20 m pari a 20 m<sup>2</sup>.</p> <p>In scatole di cartone da 25 rotoli (500 m<sup>2</sup>).</p>
---	--



Figura 4-40 Proprietà materassino diffondente

Il materassino Isoldrum N posato tra il film scaldante e la pavimentazione in parquet, ha la funzione di limitare i rumori di calpestio dovuti al pavimento flottante, ma anche di uniformare la dispersione del calore prodotto dall’impianto di riscaldamento elettrico a pavimento.

#### 4.4.2.8 PAVIMENTAZIONE

Per la finitura del pacchetto si può scegliere qualunque materiale che consente il riscaldamento a pavimento. In questo caso si è ipotizzata una pavimentazione in doghe di legno con fissaggio a secco, cioè ad incastro, senza uso di colle per rispettare appieno il tema della reversibilità.



Figura 4-41 Film termoriflettente, film scaldante, film diffondente e pavimentazione.

### 4.4.3 ANALISI TERMICA DEL SOLAIO

Una volta definito il pacchetto di finitura viene qui analizzato il comportamento termico del solaio attraverso la definizione della trasmittanza termica.

La norma UNI EN ISO 6946 prescrive un metodo di calcolo per la determinazione della resistenza termica e della trasmittanza termica idonee per definire il flusso di calore che attraversa i vari componenti edilizi.

La trasmittanza  $U$  [ $W/m^2K$ ] viene definita come: flusso di calore che passa attraverso un'area di  $1 m^2$  con una differenza di temperatura tra interno ed esterno di  $1 K$ .

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{q}{A \times \Delta T}$$

Per quanto riguarda strati omogenei, la resistenza termica totale  $R_T$  [ $m^2K/W$ ], analogamente a quella elettrica, si ricava sommando i contributi forniti da tutti gli strati.

$$R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se}$$

Nel caso in esame, descrivendo il pacchetto di finitura, si è considerato lo strato costituito dal grigliato stampato in PRFV come una intercapedine d'aria tra i due pannelli multistrato, ignorando il contributo del materiale polimerico alla resistenza termica. Inoltre non è stata considerata la pavimentazione in legno. L'ipotesi analizzata riguarda un solaio interpiano per il quale bisogna garantire una trasmittanza  $U \leq 0,8 W/m^2K$ .

Per eseguire il calcolo della trasmittanza totale  $R_T$  sono stati utilizzati i valori forniti dalle schede tecniche delle aziende produttrici per descrivere l'intero pacchetto (Tabella 10-9):

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore)	S [mm]	Lambda [W/mK]	C [W/m <sup>2</sup> K]	M.S. [kg/m <sup>2</sup> ]	P<50*10 <sup>12</sup> [kg/msPa]	C.S. [J/kgK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
1	Adduttanza Superiore	0		7.700			0	0.130
2	Materassino diffondente Isoldrum N a base di polietilene HQPO	1	0.350	350.000	0.95	1.043	1500	0.003
3	Isoldrum Silver materassino termoriflettente a base di polietilene NPE	3	0.350	116.667	2.85	1.043	1500	0.009
4	Lastre Fermacell Gessofibra preaccoppiate	20	0.320	16.000	23.00	14.846	1100	0.063
5	Mapesilent Roll	10	0.350	35.000	18.00	1.287	1000	0.029

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore)	S [mm]	Lambda [W/mK]	C [W/m <sup>2</sup> K]	M.S. [kg/m <sup>2</sup> ]	P<50*10 <sup>12</sup> [kg/msPa]	C.S. [J/kgK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
6	Floormate 300A isolante in polistirene espanso-estruso con pelle	30	0.033	1.100	0.90	1.043	1200	0.909
7	Granulato di marmo Fermacell a nido d'ape	30	0.400	13.333	45.00	38.600	840	0.075
8	Pannello multistrato	9	0.100	11.111	4.05	0.300	1000	0.090
9	Grigliato PRFV+aria	44	0.290	6.591	2.20	193.000	1000	0.152
10	Pannello multistrato	9	0.100	11.111	4.05	0.300	1000	0.090
11	Adduttanza Inferiore	0		7.700			0	0.130

Tabella 4-9 Dati tecnici dei vari elementi componenti il pacchetto solaio

Dove:

- s = Spessore dello strato [mm];
- lambda = Conduttività termica del materiale [W/mK];
- C = Conduttanza unitaria [W/m<sup>2</sup>K];
- M.S. = Massa Superficiale [kg/m<sup>2</sup>];
- P<50\*10<sup>12</sup> = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50% [kg/msPa];
- C.S. = Calore Specifico [J/kgK];
- R = Resistenza termica dei singoli strati [m<sup>2</sup>K/W];

Eseguendo il calcolo della trasmittanza secondo la norma UNI EN ISO 6946 si ottiene:

$$R_T = 1,678 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Da cui:

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,596 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \leq 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Per uno spessore totale di parete  $S_T = 156 \text{ mm}$ .

L'inerzia termica dell'intero pacchetto si può descrivere attraverso due principali proprietà termiche dinamiche:

- trasmittanza termica periodica  $Y_{ie} = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$
- capacità termica areica interna periodica  $C_{ip} = 24,943 \text{ kJ/m}^2\text{K}$

Da questi valori si possono definire sia il parametro adimensionale definito come fattore di attenuazione  $F_d = 0,60$  e il tempo di sfasamento calcolato in ore  $S = 5,53$  h.

Tenendo inoltre conto della massa superficiale  $M_s = 101$  kg/m<sup>2</sup> e volendo valutare le prestazioni acustiche passive del pacchetto secondo la norma UNI EN 12354 "Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti" si può fare riferimento al Rapporto tecnico U20001230 "Acustica in edilizia. Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici. Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale".

Tale Rapporto Tecnico, sviluppato dall'UNI ente normativo italiano, ha lo scopo di adattare le norme Europee alla realtà costruttiva nazionale proponendo un modello di calcolo di più semplice approccio. Le formule semplificate proposte per il calcolo dell'indice del potere fonoisolante  $R_w$  [dB] sono 2:

- Laboratori italiani

$$R_w = 20 \log (M_s) - 2$$

Tale formula è valida per partizioni orizzontali e verticali (singole o doppie) con  $M_s > 80$  kg/m<sup>2</sup>. Nel caso di pareti doppie l'intercapedine deve essere priva di riempimento e di spessore uguale o minore di 5 cm.

- Formula CEN

$$R_w = 37,5 \log (M_s) - 44$$

Tale formula è valida per strutture di base monolitiche con  $M_s > 150$  kg/m<sup>2</sup>.

Nel caso in esame, data la ridotta massa superficiale del solaio considerato risulta applicabile solo la prima:

- Laboratori italiani

$$R_w = 20 \log (101) - 2 = 38,08 \text{ dB}$$

La stratigrafia proposta permette di affermare che l'impalcato INTEGRO FS PRFV, associato ad opportuni materiali di completamento, consente facilmente di raggiungere prestazioni termoacustiche on grado di garantirne l'utilizzo come orizzontamento interno con spessori relativamente ridotti. La compatibilità con diversi sistemi e prodotti commerciali garantisce la possibilità, soprattutto agendo sugli strati isolanti del pacchetto, di poter raggiungere valori di trasmittanza adeguati anche all'utilizzo in condizioni di solaio controterra o verso ambienti esterni.

L'integrazione con il sistema di riscaldamento a pavimento elettrico (principale o integrativo) consente inoltre di alleggerire le lavorazioni e gli ingombri per l'installazione di un sistema di canalizzazioni idrotermosanitarie.

---

#### 4.4.4 APPLICAZIONI

L'elemento di fabbrica progettato, è chiamato ad assolvere le funzioni ordinarie di un orizzontamento quali il sostegno dei carichi e la ripartizione degli stessi alla struttura in elevazione.

Si vuole inoltre garantire una stretta collaborazione tra impalcato e orditura principale al fine di scongiurare, in caso di eventi eccezionali come il sisma, collassi strutturali definiti come primo modo di danno.<sup>3</sup>

La continuità strutturale e la rigidità di piano sono caratteristiche necessarie a una corretta ripartizione dell'azione dinamica alla struttura verticale e contribuiscono ad evitarne il collasso. Sono questi i requisiti che devono caratterizzare la soluzione progettuale per l'impalcato in esame.

L'introduzione di un collegamento efficace lungo la muratura d'ambito, assicura il comportamento scatolare della cella muraria dell'edificio, ripartendo le azioni dovute al sisma tra orizzontamenti e murature in proporzione alle proprie rigidità.

La sostituzione di solai originari con solai in laterocemento, con adeguati valori di rigidità ma estremamente pesanti, ha portato spesso in passato ad un peggioramento delle condizioni statiche degli edifici. Nei confronti di azioni orizzontali questi interventi hanno generato sollecitazioni dinamiche elevate sulle pareti, che ne hanno determinato un collasso fuori dal piano a causa del fenomeno del martellamento.<sup>4</sup>

##### 4.4.4.1 COLLEGAMENTI

Nel rispetto delle Norme Tecniche (D.M. 14 gennaio 2008) i solai devono avere un comportamento a diaframma al fine di ripartire le azioni orizzontali del sisma ai diversi elementi resistenti dell'organismo strutturale assicurando, in questo modo, una risposta coerente di tutte le sue parti. Nel caso di soluzioni a secco si deve porre particolare accortezza allo studio e al calcolo dei collegamenti. Al fine di garantire una corretta ripartizione degli sforzi è necessario un collegamento efficace tra solaio e muratura, attraverso dall'introduzione di un cordolo perimetrale.<sup>5</sup>

Tale cordolo, disposto lungo le murature d'ambito alla quota dei solai, svolge diverse funzioni quali:

- contenimento dei meccanismi di danno per azioni fuori piano della muratura
- assorbimento delle sollecitazioni orizzontali da ripartire alle murature d'ambito su cui gravano
- ripartizione dei carichi statici per diffonderli alle murature sottostanti

In ultimo si deve garantire la resistenza agli sforzi assiali di trazione e compressione che si generano sull'elemento stesso. Quindi la rigidità dell'elemento data dalla sua altezza, è un fattore negativo perché in caso di azioni dinamiche genera il martellamento delle murature secondo "l'effetto trave".

La considerazione di questi aspetti, unita alla particolare conformazione del pannello sandwich, ha determinato la scelta di un cordolo in profilato in pultruso a L 75x50x8 mm sulla faccia interna della parete. Si garantisce la connessione all'orditura primaria e alla muratura mediante ancoraggi meccanici con un passo di 60 cm. Gli ancoraggi possono essere realizzati con barre filettate in acciaio infisse nella muratura d'ambito e ancorate con resine chimiche.

Questa risulta essere la scelta più adeguata, data la natura dell'impalcato in oggetto, in quanto i cordoli in cemento armato, oltre a non rispettare i requisiti della reversibilità e della realizzazione a secco, rischierebbero di non apportare significativi contenimenti dei meccanismi fuori piano a causa della loro eccessiva rigidità. Si vuole inoltre superare la soluzione in acciaio che a parità di caratteristiche meccaniche, apporta un contributo in termini di peso pari a tre volte quello apportato dal profilato in PRFV.

Il principale vantaggio apportato da tale cordolo è sua leggerezza, ricordando inoltre che si tratta di una soluzione versatile e duratura nel tempo, facile da posare e reversibile.

<b>Materiale</b>	<b>Resistenza a trazione [MPa]</b>	<b>Modulo Elastico [MPa]</b>	<b>Peso specifico [kN/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Normativa</b>
<b>PRFV</b>	400	0,3 x 10 <sup>5</sup>	20	ASTM D 638
<b>ACCIAIO S275</b>	430	2,1 x 10 <sup>5</sup>	79	NTC 2008

Tabella 4-10 Caratteristiche meccaniche acciaio e PRFV secondo normativa

I materiali pultrusi sono anisotropi in quanto le fibre che costituiscono la parte resistente si dispongono secondo una direzione preferenziale. La scelta del profilo a L disposto superiormente al pannello sandwich è legato ad una maggiore facilità di posa in opera degli elementi durante le operazioni in cantiere. Il maggiore sviluppo orizzontale del profilo ad "L" consente inoltre di effettuare il collegamento verticale in una zona del grigliato strutturale più "interna" coinvolgendo un maggior numero di travette interne.

Le connessioni bullonate nei compositi, seguono le tipologie utilizzate per acciaio e alluminio, sebbene presentino delle specificità dovute all’ortotropia del materiale ed alle ridotte capacità di adattamento plastico rispetto ai due materiali tradizionali. Nella realizzazione di unioni bullonate si deve tenere presente la ridotta resistenza a trazione in direzione delle fibre.<sup>6</sup>

Per tale motivo e nel rispetto della continuità strutturale di cui si è parlato sopra, è risultato opportuno prevedere un irrigidimento della soluzione angolare di arrivo dei cordoli. Qui, i due profili, terminanti con un taglio obliquo a 45°, giungono dalle due direzioni ortogonali e si inseriscono in una cuffia in acciaio appositamente predisposta e connessa alla muratura. Tale cuffia angolare garantisce una migliore distribuzione delle tensioni nella fase del serraggio dei bulloni.

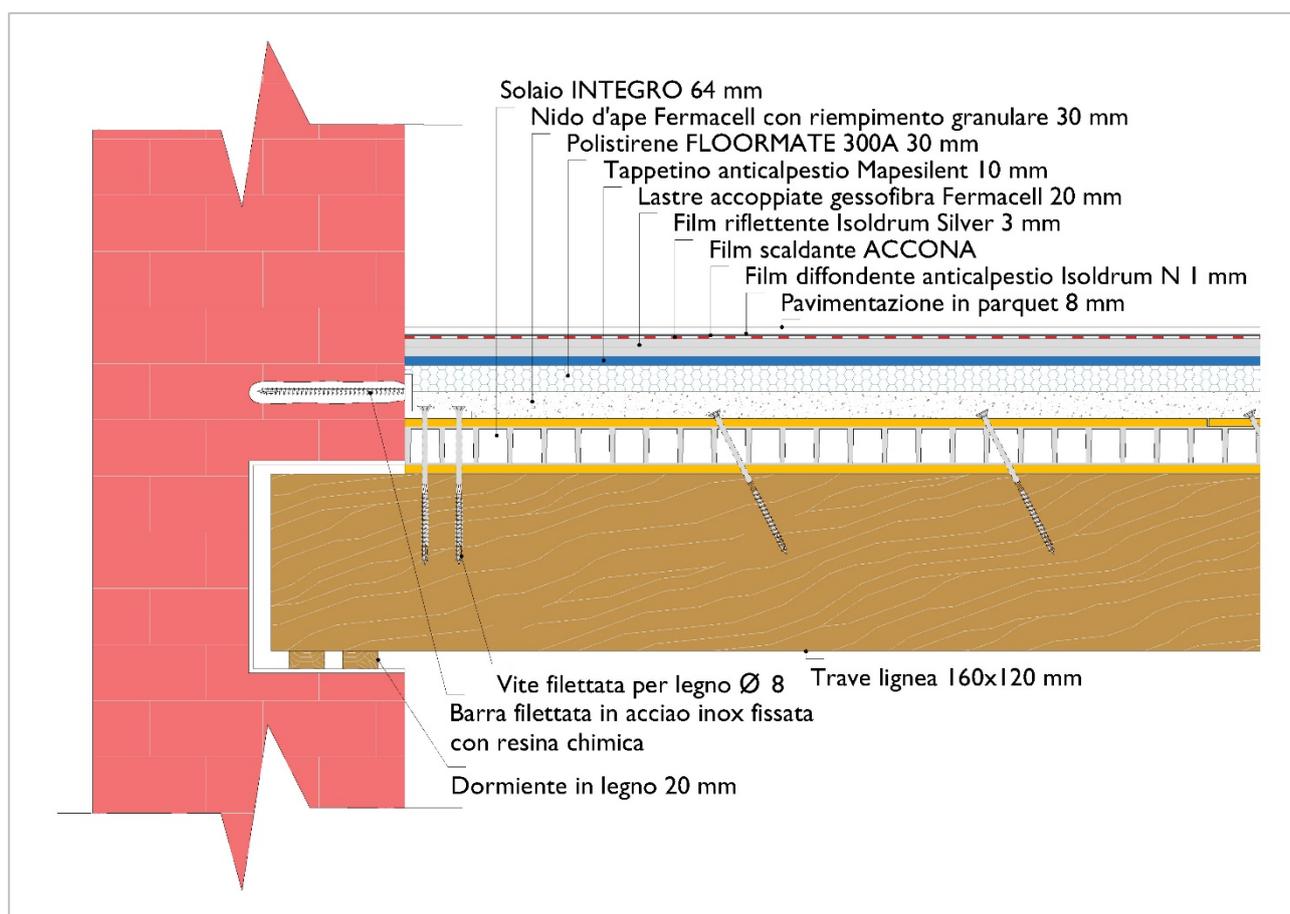


Figura 4-42 Particolare del nodo strutturale muro-solaio con stratigrafia di completamento

Al fine di garantire la continuità strutturale e la rigidità di piano necessaria per una corretta ripartizione dei carichi statici e dinamici, l’impalcato viene connesso alla travatura principale tramite un sistema di viti strutturali per legno di diametro pari a 8 mm e una lunghezza di 180 mm. Il passo delle viti in direzione dell’asse della trave è pari a 300 mm. La dimensione e il passo delle viti non sono state calcolate ma vengono indicate qualitativamente per confronto con soluzioni commerciali.

Il motivo di tale scelta è legato alla possibilità di valutare l'effettiva correttezza di tale tipologia di connessione nelle sperimentazioni future. In particolare è necessario verificare sperimentalmente la connessione in relazione all'alesaggio dei fori nei punti di contatto tra il gambo della vite e i pannelli multistrato. Inoltre la vite lavora senza un contrasto orizzontale a causa del vuoto all'interno delle maglie del grigliato. Questa peculiarità potrebbe incidere negativamente sull'efficacia del collegamento.

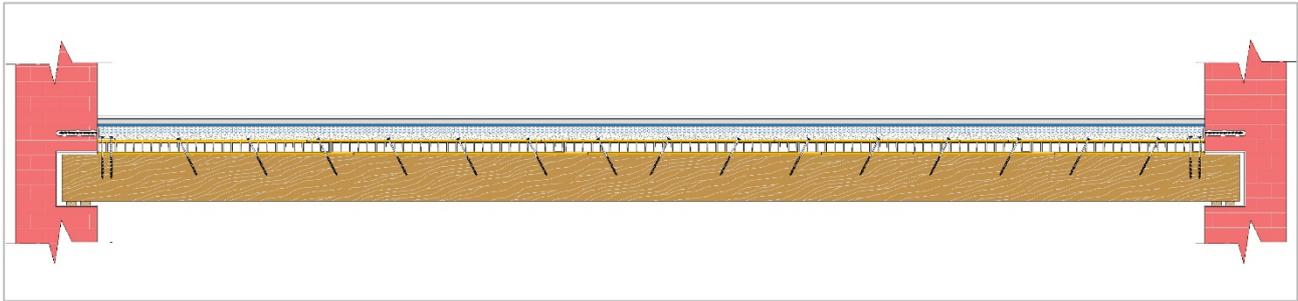


Figura 4-43 Connessione del solaio alla trave

#### 4.4.4.2 NUOVE COSTRUZIONI

La soluzione progettuale individuata, prevede l'utilizzo di pannelli sandwich a sezione simmetrica con grigliato interposto. Questi vengono confezionati prima del loro trasporto in cantiere in cui arrivano con moduli standard di 1x2 m. Questa scelta è dettata anche dal processo di produzione del grigliato in PRFV, la cui matrice polimerica viene colata su stampi di dimensioni fisse dopo la disposizione (roving) delle fibre di vetro.

Dovendo applicare la soluzione proposta in una nuova costruzione, ad esempio al modulo strutturale INTEGRO BS 400, risulta conveniente disporre le travi dell'orditura principale ad interassi pari a 1 m. Questo per ragioni legate sia alle considerazioni ottenute dalla sperimentazione in merito alle caratteristiche di rigidità e resistenza del sistema ma anche a ragioni di praticità legate ai metodi di produzione dei singoli pannelli. L'intenzione è anche quella di aumentare l'interasse dell'orditura principale rispetto agli impalcati tradizionali ad orditura semplice con tavolato semplice o doppio, sfruttando al meglio le prestazioni offerte dal sistema INTEGRO FS PRFV.

Il pannello sandwich standard "S" è realizzato sfalsando di 100 mm in direzione longitudinale e trasversale i layers costituenti il pacchetto strutturale. Questa operazione si intende da realizzare in officina dove è anche più semplice gestire la fase di incollaggio. In questo modo il pannello dotato di doppia battentatura può essere portato in cantiere già pronto all'installazione secondo una specifica modalità di posa, da definire in relazione al solaio da realizzare.

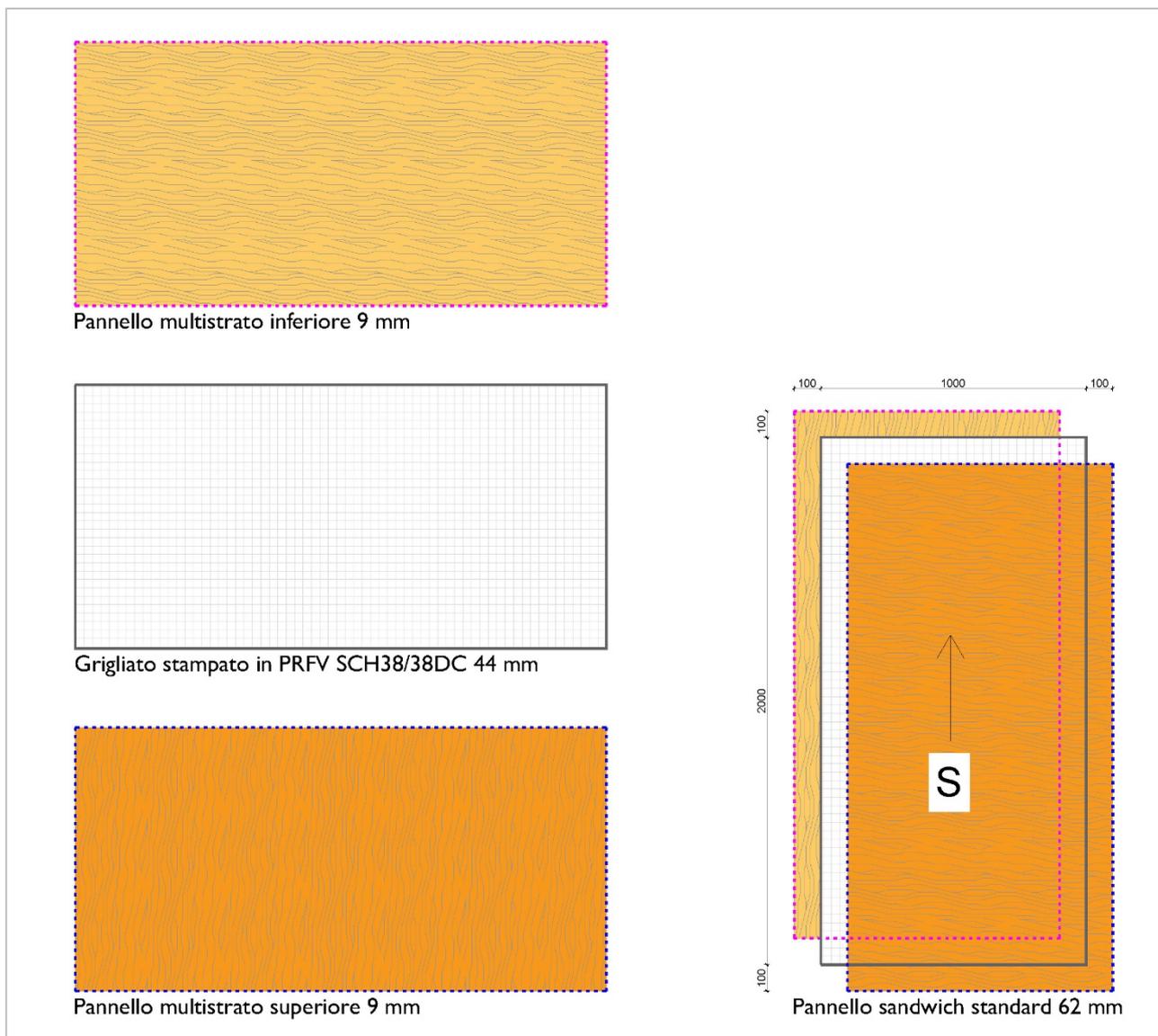


Figura 4-44 Pannello sandwich con battentatura

Il pannello sandwich deve essere posato direttamente al di sopra delle travi, a cui si connette meccanicamente tramite viti strutturali per legno, garantendo un numero minimo di due appoggi rispetto all'orditura principale. Per questo motivo, per ottimizzare l'inserimento all'interno del sistema strutturale, è stata studiata la possibile configurazione di posa dei pannelli al fine di garantire un corretto sfalsamento dei giunti ed evitare conseguentemente qualsiasi tipo di discontinuità verticale. In particolare, si vuole scongiurare la perdita di continuità materiale del grigliato in corrispondenza della luce libera di inflessione.

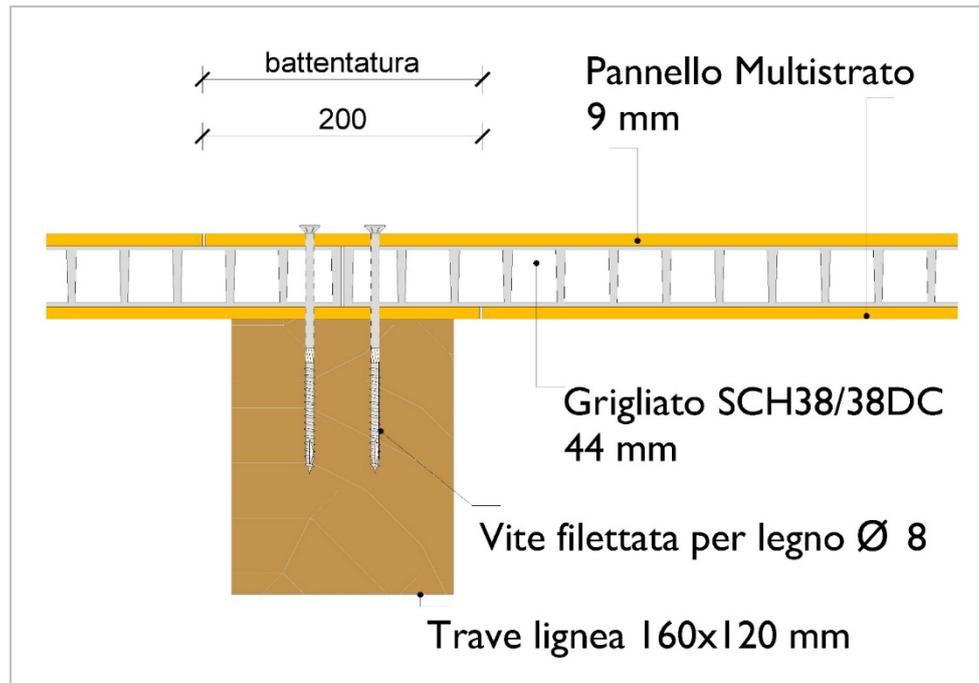


Figura 4-45 Particolare del nodo trave-solaio

Per valutare il corretto sfalsamento si è analizzata la “cella tipo” di dimensioni pari a 4 x 4 m costituente il modulo base del sistema INTEGRO BS 400. L’obiettivo è quello di ottimizzare il processo costruttivo e coniugare tale sistema con la filosofia della prefabbricazione abbattendo così costi, tempi e difficoltà contingenti.

I requisiti da rispettare, come detto, sono che i pannelli multistrato inferiori poggino direttamente sulla travatura principale e che il grigliato non presenti discontinuità in campata. Per minimizzare le lavorazioni in cantiere, invece che utilizzare il solo pannello “S”, appare più opportuno, date le particolari dimensioni del sistema, definire 3 tipologie di pannello preformate. La pezzatura indicata con “A” serve per la partenza in angolo. La battentatura non è completa ma lascia un lato lungo e uno corto a filo per garantire il corretto accostamento alle murature perimetrali. La pezzatura indicata con “B” ha un solo lato corto privo di battentatura per poter essere postata tra la trave di spina e quella di bordo. La pezzatura indicata con “C” non è altro che quella “A” invertita per chiudere l’angolo opposto. All’interno della cellula 4x4 m l’impalcato si completa “specchiando” i pannelli rispetto alla trave di spina. Si utilizzano un totale di 8 pannelli, di cui 2 di tipo “A”, 4 di tipo “B” e 2 di tipo “C” senza sfrido alcuno.

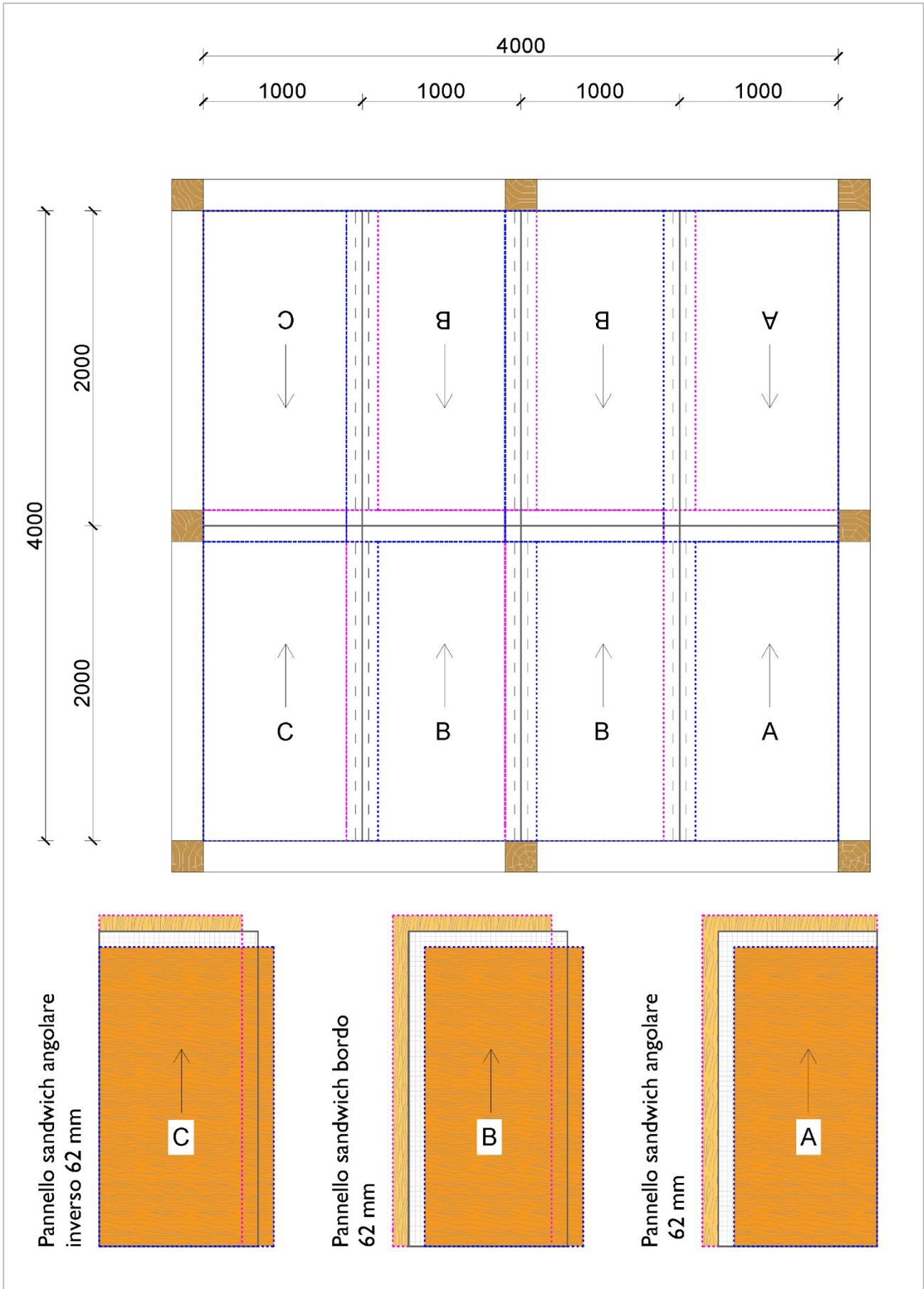


Figura 4-46 Posa dei pannelli con battentatura nel caso di nuovo solaio

#### 4.4.4.3 RECUPERO DELL'ESISTENTE

Una soluzione analoga può essere adottata nel caso dei solai con insufficienti spessori strutturali rispetto alle condizioni normative d'uso.

Prima di procedere alla scelta ci si è interrogati sulla concreta possibilità di trovarsi in presenza o meno del tavolato. Nel caso di intervento su un solaio tradizionale ad orditura semplice e assi in legno, quest'ultimi possono assumere la funzione di casseratura a perdere su cui si installano i pannelli sandwich INTEGRO FS PRFV che vanno in seguito connessi meccanicamente alla travatura inferiore.

Il vantaggio dell'elemento di fabbrica, che andrebbe a sostituire una ipotetica soletta armata collaborante in c.a., è quello di poter essere installato a secco. È necessario però studiare le possibili configurazioni di posa ottimizzata, in funzione del passo delle travature preesistenti, garantendo la connessione meccanica tra orditura principale e pannelli in almeno due punti di appoggio.

Per valutare il corretto sfalsamento si è analizzata una cella muraria esistente di dimensioni pari a 4,75 x 6,71 m. L'obiettivo è quello di ottimizzare il processo costruttivo e coniugare tale sistema con la filosofia della prefabbricazione abbattendo così costi, tempi e difficoltà contingenti confrontandosi con le eventuali problematiche legate problematica dell'esistente.

L'ipotesi progettuale prevede che i pannelli multistrato inferiori poggino direttamente sul tavolato principale preesistente e che i pannelli siano connessi sempre con almeno 2 travi dell'orditura principale.

Come per le nuove realizzazioni, si utilizza una pezzatura speciale indicata con "A" per realizzare la partenza in angolo. Il primo pannello ad essere posato sarà quello A1 che è privo di battentatura su due lati. La pezzatura "B" viene utilizzata per continuare la posa lungo la parete. I pannelli B1, B2, B3, B4, poiché arrivano direttamente al muro lungo una delle due direzioni, avranno un solo lato privo di battentatura. Il numero indicato nei pannelli fornisce l'andamento della posa. Finito il primo lato si comincia con i pannelli standard "S" avendo cura di sfalsare la partenza per evitare discontinuità corrispondenti nei pannelli. In questo caso si procede tagliando il pannello S1 a metà. Questa operazione può essere fatta agevolmente in cantiere con l'ausilio di normali macchine utensili senza pregiudicare le performance del pannello tagliato.

Si procede poi alla posa dei pannelli S avendo cura di "recuperare" gli sfridi per la partenza delle file successive.

Nel caso in esame la superficie da ricoprire è pari a 32 m<sup>2</sup> con un numero di 8 travi posti ad interasse di 0,7 m.

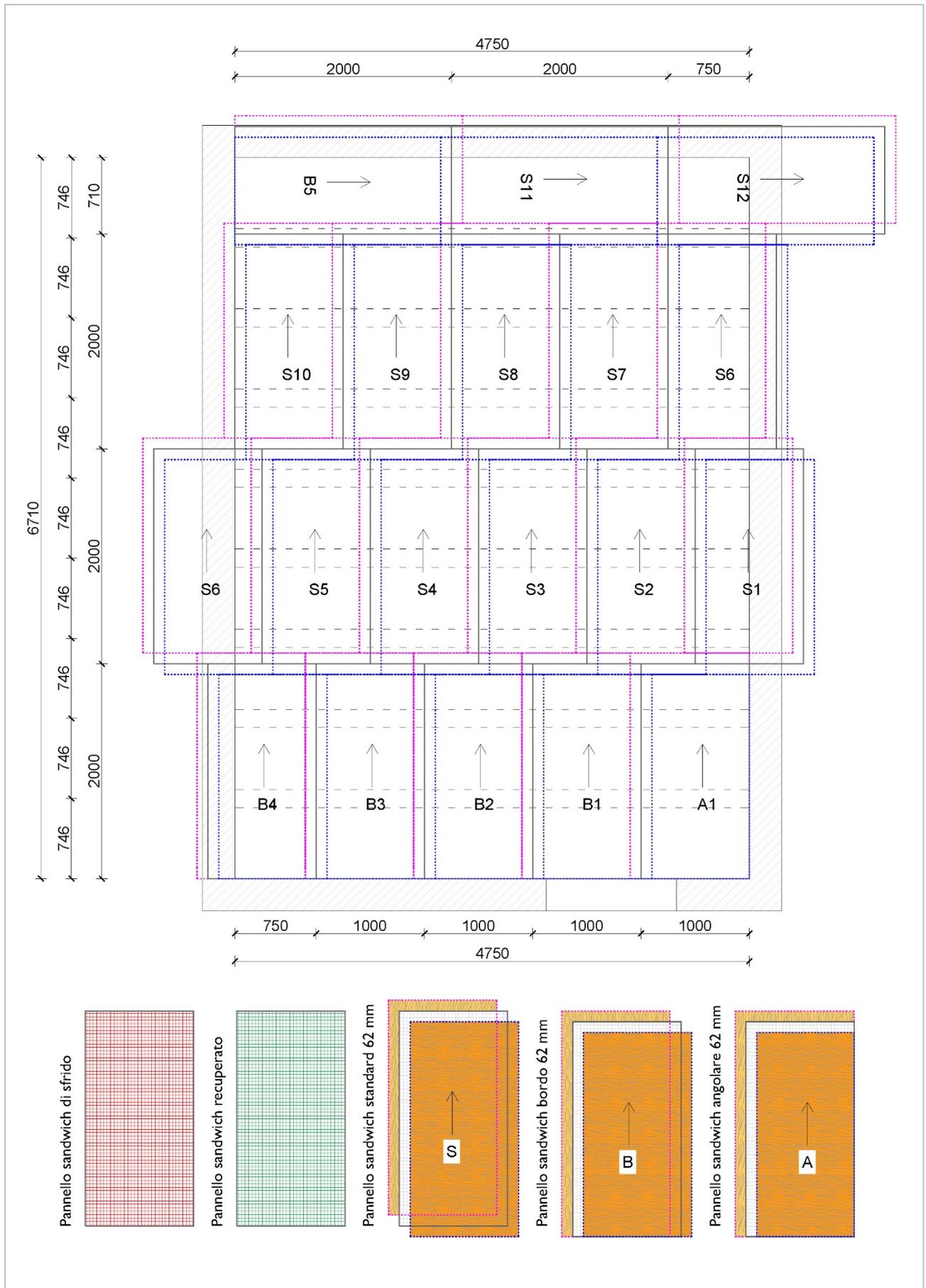


Figura 4-47 Posa dei pannelli con battentatura nel caso di sostituzione solaio e tavolato preesistente

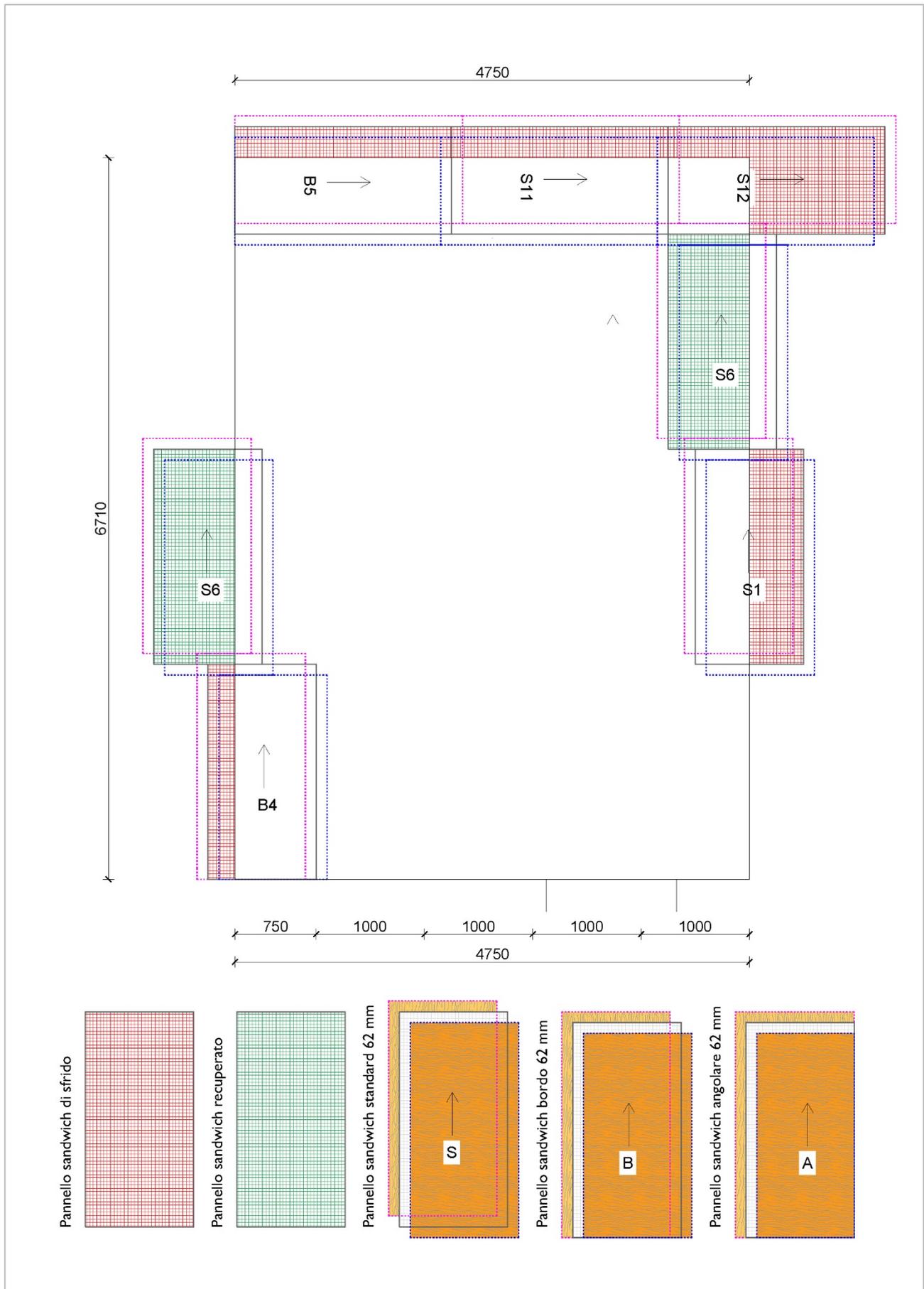


Figura 4-48 Sfrido e taglio dei pannelli

In totale si utilizzano un totale di 16 pannelli, di cui 1 di tipo “A”, 5 di tipo “B” e 12 di tipo “S” con uno sfrido di circa 4 m<sup>2</sup>.

Nella soluzione progettuale per l'esistente ci si deve confrontare con un'elevata possibilità di imbattersi in casistiche particolari comportando un alto tasso di sfrido. Nel caso in esame è stato possibile recuperare buona parte dei pannelli effettuando tagli negli stessi in corrispondenza della parte in eccesso. La disposizione dei pannelli in opera avviene secondo un preciso ordine, seguendo l'andamento delle file orizzontali al termine delle quali si riparte con il pannello di sfrido fino al completamento. La battentatura così predisposta consente di semplificare il montaggio e non comporta particolari difficoltà al raggiungimento delle chiusure angolari. La possibilità di sagomare i pannelli in opera consente comunque di risolvere particolari problemi di fuori squadra presenti nella gran parte delle situazioni reali senza incidere sulle caratteristiche prestazionali dei pannelli.

---

<sup>1</sup> Gulli, *Recupero sostenibile del patrimonio costruito in ambito sismico*.

<sup>2</sup> Ministero per i Beni, «Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio del patrimonio culturale: Allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni» (2011), <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=QpmUtCdIaIcC&oi=fnd&pg=PA184&dq=%22QUADRO+RIASSUNTIVO+DEL+PERCORSO+DI+VALUTAZIONE%22+%22Stefano+Podest%C3%A0,+Sonia+Parodi,+Lorenzo%22+%22STRUMENTO+PER+LA+PREVENZIONE+ED+IL+MIGLIORAMENTO%22+%22SCUOLA+ELEMENTARE+DE%22+%22A.+Programma+per+il+monitoraggio+dello+stato+di+conservazione+dei%22+&ots=IFJCwPLztR&sig=NOKUvMQXxGFF-drDKe0It5a9-hQ>.

<sup>3</sup> Gulli, *Recupero sostenibile del patrimonio costruito in ambito sismico*.

<sup>4</sup> Giovanetti e Argalia, *Manuale del recupero del comune di Citta di Castello*.

<sup>5</sup> Riccardo Gulli, *Struttura e costruzione*, Nuova edizione rivista e ampliata (Mariotti 1820, 2017).

<sup>6</sup> CNR, «Guide for the design and construction of structures made of FRP pultruded elements. Advisory Committee on Technical Recommendations for Constructions, Italian National Research Council», 9 ottobre 2008.

---

# CONCLUSIONI



## I. ESITI FINALI

All'interno dell'ambito disciplinare dell'architettura tecnica, con attenzione verso lo studio e la riproposizione di tecniche costruttive storiche, il progetto di ricerca si è dedicato allo sviluppo di un sistema strutturale modulare e alla individuazione di un nuovo sistema di impalcato ligneo con anima di PRFV che possa essere utilizzato sia nel recupero di solai esistenti sia all'interno del sistema strutturale proposto.

L'approccio che si è cercato di mantenere è stato caratterizzato dal delicato equilibrio tra teoria e pratica del costruire. Se da un lato si è cercato di partire dai dati empirici portati dall'osservazione e dalla comprensione delle tecniche costruttive storiche, dall'altro si sono volute confrontare le soluzioni pratiche progettate e testate con gli aspetti normativi teorici. Il legame che si è venuto a creare tra esperienza pratica costruttiva e riflessione teorica costituisce uno degli aspetti più caratterizzanti e innovativi di questo percorso di ricerca all'interno di un Dipartimento di Architettura.

Il progetto di ricerca, dato il suo carattere multidisciplinare ed eterogeneo, non è stato privo di difficoltà che ne hanno determinato un percorso non del tutto lineare all'interno del quale si sono alternate fasi di ricerca teorica, sperimentazione costruttiva, prove di laboratorio ed analisi dei dati acquisiti. Molto spesso le risultanze sperimentali hanno consigliato o obbligato a modificare gli obiettivi prefissati in un processo di feedback continuo.

La struttura della presente tesi cerca di sistematizzare il lavoro svolto mostrandone un inquadramento generale secondo uno schema logico.

Delineati, infatti, i profili teorici e gli assunti programmatici, attraverso una precisa individuazione dell'ambito disciplinare e del campo di indagine, sono stati presentati le istanze e gli obiettivi della ricerca.

Per meglio inquadrare la vision complessiva all'interno della quale si vuole operare, è stata definita una cornice di riferimento in modo da circoscrivere il quadro esigenziale che secondo il candidato le nuove tecniche costruttive dovrebbero soddisfare. L'analisi sociologica rispetto alle nuove esigenze di una popolazione in movimento ha evidenziato come, nel prossimo futuro, le caratteristiche di temporaneità, flessibilità, modularità e assemblabilità diventeranno vieppiù cogenti per le nuove costruzioni. A queste esigenze si può rispondere soddisfacendo determinati requisiti che sono stati individuati primariamente in termini di sostenibilità e di bioclimatica. Concetti che sono noti ma che possono assumere declinazioni diverse da quelle comunemente accettate in funzione delle tecniche costruttive utilizzate. Le strategie che adottate per garantire un approccio sostenibile sono

state individuate in una ottimale gestione dei processi che minimizzi l'impatto sul suolo attraverso una realizzazione a secco delle opere; in un forte ricorso a elementi industrializzati o prefabbricati per ottimizzare la gestione del cantiere e, soprattutto, nella rivalutazione dell'aspetto bioclimatico della massività dell'involucro che, recentemente, è stata sostituita dall'iperisolamento delle case adiabatiche. (si veda Parte 1 - Profili teorici - Capitolo I "*Principi, criteri e modelli*")

Con la definizione progettuale del modulo intelaiato INTEGRO BS 400, si tenta di tenere conto dei principi individuati puntando a realizzare un sistema strutturale modulare con caratteristiche massive che possa essere utilizzato in tutta la fascia mediterranea per la realizzazione di edifici in maniera efficiente e rapida ma che contemplino in origine caratteristiche di flessibilità e mutabilità nell'arco della loro vita utile. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II "*Sistema INTEGRO BS 400*")

Sono dapprima stati individuati i riferimenti a precise tecniche costruttive storiche che hanno caratterizzato la tradizione costruttiva italiana e che hanno mostrato buone caratteristiche in merito alla risposta al sisma nel corso dei secoli. Il riferimento più prossimo è stato quello alla "*casa baraccata*" e più in generale agli edifici costituiti da "*muratura armata*" o "*muratura animata*". (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II "*Sistema INTEGRO BS 400*" - Paragrafo 1 "*La casa baraccata*")

A partire dai riferimenti costruttivi si è intrapreso un percorso di sviluppo del sistema che, dal concept iniziale, ha visto diverse fasi di sviluppo fino alla individuazione di una soluzione definitiva attraverso numerose fasi di prototipazione in scala per determinarne la fattibilità tecnica. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II "*Sistema INTEGRO BS 400*" - Paragrafo 2 "*Sviluppo del modulo*" e Paragrafo 3 "*Il sistema strutturale INTEGRO BS 400*")

Una volta concepito il sistema nelle sue parti si è voluto darne una caratterizzazione in termini statici, termofisici e costruttivi. È stato affrontato inoltre il paradigma della modularità attraverso la definizione di un sistema di supporto parametrico alla progettazione che sfruttasse ed enfatizzasse le caratteristiche del modulo base. Ovviamente la progettazione parametrica non deve essere intesa come surrogato del progettista, anzi, il corretto soddisfacimento delle istanze di sostenibilità e l'approccio bioclimatico portano ad intendere il sistema strutturale stesso come funzionale ad una corretta progettazione. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo II "*Sistema INTEGRO BS 400*" - Paragrafo 4 "*Caratterizzazione del sistema*")

Lo sviluppo dell'impalcato sandwich INTEGRO FS PRFV, anch'esso un sistema modulare basato sull'utilizzo di un grigliato stampato in PRFV inserito tra due pannelli multistrato lignei, è stato dettato dalla piena integrabilità all'interno del sistema strutturale modulare. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*")

Poiché nasce originariamente per l'intervento di recupero e consolidamento di solai lignei esistenti, si sono trattate le principali caratteristiche dei solai ad ordito ed impalcato tradizionali e alcune fondamentali tecniche di intervento. Sono inoltre state individuate alcune soluzioni commerciali per la realizzazione di nuovi solai che potessero mostrare caratteristiche simili alla soluzione proposta. In generale si è visto che il mercato offre innumerevoli possibilità ma si è anche potuto verificare che generalmente si tratta di interventi "*a umido*". (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 1 "*Solai in legno*")

Per verificare l'ipotesi progettuale che prevede la realizzazione di un pannello sandwich con un core strutturale in PRFV sono state approntate una serie di sperimentazioni in laboratorio al fine di caratterizzare l'impalcato in termini di rigidità e flessione. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 2 "*Pannello sandwich*")

L'esecuzione di prove di carico a 4 coltelli su diversi banchi di prova ha costituito una delle parti più impegnative di questo percorso di tesi. I risultati sperimentali hanno di volta in volta animato le successive valutazioni teoriche oltre a costituire un bagaglio di esperienza notevole per il candidato. Il confronto trasversale dei dati è poi stato fondamentale per raggiungere la soluzione progettuale definitiva. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 3 "*Attività di laboratorio*")

Di questa è stata poi data una caratterizzazione in termini di materiali utilizzati e rispetto all'integrazione di una stratigrafia di completamento che rispetti anch'essa il paradigma della reversibilità e della realizzazione completamente a secco. Della soluzione progettuale sono state infine definite le caratteristiche che ne determinano la possibilità di utilizzo sia all'interno del modulo intelaiato INTEGRO BS 400, sia l'utilizzo in interventi di recupero. (si veda Parte 2 - Soluzioni applicative - Capitolo III "*Solaio INTEGRO FS PRFV*" - Paragrafo 3 "*Analisi dei dati*")

Riassunto in breve il percorso di ricerca, si può affermare che, in relazione agli obiettivi primari della ricerca, delineati nelle fasi introduttive, gli esiti finali sono i seguenti:

- Ideazione, sviluppo e perfezionamento di un sistema strutturale basato sul recupero di tecniche costruttive storiche attualizzate in una concezione moderna ed innovativa dell'arte del costruire. Il sistema INTEGRO BS 400 è stato definito progettualmente in ogni sua parte attraverso un percorso continuo di affinamento delle singole parti costituenti. Il recupero di una tecnica costruttiva storica che prevedeva la collaborazione di muratura e telaio ligneo è stata attualizzata attraverso un sistema strutturale modulare, realizzabile a secco, in grado di soddisfare i requisiti di massività e al contempo di reversibilità previsti dal paradigma della sostenibilità.

- A partire da esperienze precedenti, miglioramento ed ottimizzazione di un innovativo pannello sandwich strutturale, INTEGRO FS PRFV, atto a svolgere le funzioni di impalcato in orizzontamenti lignei sia all'interno del sistema strutturale sia negli interventi sul patrimonio edilizio esistente. Le indagini sperimentali e le prove di laboratorio hanno consentito di caratterizzare un sistema modulare di impalcato, realizzabile a secco, reversibile, estremamente leggero ma al contempo sufficientemente rigido da garantire un ottimo comportamento in relazione alla ripartizione dei carichi orizzontali.

In rapporto agli obiettivi secondari della ricerca, in riferimento al modulo intelaiato INTEGRO BS 400, i risultati finali sono i seguenti:

- Comprensione qualitativa delle performance statico strutturali del sistema parete proposto nonché delle sue potenzialità aggregative ed espressive. Sono state delineate in maniera qualitativa, le performance statiche del modulo in relazione al particolare sistema di assemblaggio a secco con sistema di post compressione della muratura. La modularità è stata valutata attraverso la definizione di un tool di progettazione parametrica. Le caratteristiche espressive sono state definite in relazione al pacchetto di finitura e alla possibilità di realizzazione delle aperture all'interno del tamponamento, senza vanificare il comportamento controventante dei campi murari.
- Individuazione delle criticità relative alla fattibilità tecnica delle soluzioni proposte in previsione di un ulteriore sviluppo e affinamento orientato ad una sperimentazione costruttiva a scala reale. Sono state effettuate diverse esperienze di prototipazione in scala che hanno consentito di cogliere con maggiore precisione rispetto alla modellazione digitale tutte le problematiche costruttive delle diverse versioni del sistema. La sperimentazione costruttiva, seppur non effettuata a scala reale, ha permesso di valutare qualitativamente le tempistiche necessarie alle varie lavorazioni e formulare un processo di cantierizzazione del sistema in previsione della realizzazione di un prototipo in scala reale.

In rapporto agli obiettivi secondari della ricerca, in riferimento all'impalcato sandwich INTEGRO FS PRFV, i risultati finali sono i seguenti:

- Piena comprensione delle caratteristiche di resistenza e rigidità dell'impalcato sandwich ed ottimizzazione della sua composizione. I dati raccolti dalle prove di carico hanno consentito di individuare la migliore configurazione dell'impalcato sandwich. Le speculazioni teoriche

---

in merito allo scarso sfruttamento delle caratteristiche del grigliato stampato in PRFV non hanno trovato riscontro durante i test. Anche le possibili ottimizzazioni della sezione resistente attraverso l'uso di pannelli asimmetrici o sistemi di adesione più elastici non hanno portato a risultati significativi. L'attività sperimentale ha portato a confermare la bontà dell'assunto iniziale che garantisce un incremento di rigidezza ed una forte limitazione flessionale nel pannello sandwich rispetto agli elementi costituenti considerati singolarmente.

- Individuazione dei migliori sistemi di posa e connessione dell'impalcato alle orditure principali con individuazione di criteri base per il calcolo del solaio in condizioni di utilizzo. Le prove dinamiche e le configurazioni doppie con battentatura hanno mostrato come un sistema modulare di pannelli di dimensioni finite 100x200 cm possa garantire una posa efficace sia per la realizzazione di nuovi impalcati sia nel recupero dell'esistente. È stato anche possibile definire un sistema semplificato di dimensionamento e verifica per un generico impalcato realizzato su un'orditura ad interasse variabile.

## II. SVILUPPI FUTURI

Sulla base dei risultati ottenuti e dall'analisi delle criticità e potenzialità individuati nelle soluzioni progettuali proposte, è possibile prevedere sviluppi futuri della ricerca.

In particolare per quanto riguarda il sistema strutturale INTEGRO BS 400, l'approccio eminentemente pratico, orientato a verificarne le caratteristiche costruttive, lascia aperti numerosi percorsi di sviluppo legati, soprattutto alla piena comprensione delle caratteristiche meccaniche e del comportamento generale del sistema parete. Se le caratteristiche di isolamento ed inerzia termica sono state valutate con sufficiente precisione riconducendosi ai dati disponibili, il comportamento complessivo della parete rispetto alle sollecitazioni statiche e sismiche è stato valutato senza poter contare su dati di letteratura consistenti. Risulta soprattutto fondamentale indagare attraverso prove sperimentali in scala reale il comportamento del sistema di post compressione utilizzato per rendere solidali i campi di muratura animata a secco. Questo percorso, oltre ad essere estremamente specialistico, necessita anche di un investimento economico non indifferente per poter realizzare diversi provini in scala reale di campi di muratura e non è stato possibile affrontarlo all'interno della presente Tesi di Dottorato.

Le caratteristiche prestazionali del sistema potrebbero inoltre giovare del ricorso a materiali innovativi in sostituzione dei blocchi in laterizio. In origine si era pensato di utilizzare blocchi rettificati realizzati ad hoc attraverso processi di geopolimerizzazione ottenuti da scarti di laterizio. Lo studio sui blocchi AAM (Alkali Activated Material), intrapreso all'interno del DA, non ha portato ai risultati sperati, soprattutto in termini di ingegnerizzazione della produzione, ma ciò non impedisce la possibilità di rivolgersi ad altre tipologie di materiali. Gli studi sulla paglia come materiale strutturale sembrano promettenti ed anche i blocchi in calce e canapa, già in commercio, potrebbero essere facilmente ripensati in un'ottica di sostituzione dei blocchi di laterizio all'interno del sistema INTEGRO BS 400. Oltre alla compatibilità in termini di prestazioni termiche e statiche andrebbe però valutata la possibilità di produrre elementi rettificati compatibili con le tolleranze costruttive richieste.

La modularità del sistema, volutamente ricercata per garantire i requisiti di assemblabilità e flessibilità all'interno di un processo costruttivo il più possibile industrializzato, è stata formalmente affrontata definendo un tool parametrico di progettazione che consente di giungere, a partire dal singolo modulo, alla definizione coerente di organismi edilizi più complessi. Le problematiche legate alla progettazione a scala urbana e architettonica non sono state affrontate e rappresentano un possibile percorso di sviluppo in termini di resa estetica ed espressiva per valorizzare un sistema

strutturale ed elevarlo a sistema costruttivo vero e proprio, completo in tutte le sue parti e pronto all'uso. L'integrazione impiantistica, ad esempio, è stata considerata in termini progettuali integrando un sistema di riscaldamento elettrico a pavimento, ipotizzando la realizzazione dell'impianto elettrico stesso nelle contropareti esterne. I sistemi di adduzione idrica e scarico delle acque, seppur compatibili ed integrabili potrebbero essere maggiormente ottimizzati se valutati globalmente all'interno di uno specifico progetto.

Per quanto riguarda l'impalcato sandwich INTEGRO FS PRFV, la sperimentazione di laboratorio ha consentito di comprendere approfonditamente alcune caratteristiche del sistema, soprattutto in merito alla rigidità e resistenza del singolo pannello per carichi statici e dinamici perpendicolari al pannello stesso. Considerando positivamente i dati acquisiti un potenziale sviluppo potrebbe essere ricercato nella caratterizzazione del sistema per carichi orizzontali. Questo permetterebbe di valutare meglio il comportamento del sistema nei confronti dell'azione sismica e la sua validità nella ripartizione dei carichi alle murature d'ambito.

Altro aspetto tecnico da valutare sperimentalmente sarebbe proprio il sistema di connessione a secco con l'orditura principale e con le murature. Il ricorso a connettori meccanici semplici e già presenti in commercio potrebbe essere sufficiente ma, in un'ottica di ottimizzazione delle performance e data la particolare struttura a maglie chiuse del grigliato, potrebbe essere sviluppato un sistema ottimizzato di connettori maggiormente integrato al sistema. Lo sviluppo di connettori ottimizzati porterebbe anche a sviluppare meglio il sistema di posa. Le sperimentazioni sui pannelli doppi hanno mostrato come la battentatura risulti efficace per instaurare un comportamento collaborante di due pannelli adiacenti. Il prossimo passo deve essere orientato a definire il comportamento a lastra di un intero solaio costituito da pannelli modulari di dimensioni 100x200 cm.

Un ultimo aspetto che potrebbe portare a sviluppi futuri riguarda l'ingegnerizzazione della produzione dei singoli pannelli. La realizzazione dei provini mediante l'incollaggio dei pannelli multistrato al grigliato stampato in PRFV è avvenuta manualmente in modo artigianale all'interno dei laboratori. L'incollaggio è stato garantito attraverso la stesura di uno strato uniforme di adesivo sulle varie superfici di contatto. I dati sperimentali hanno mostrato come gli incollaggi fossero in genere "sovradimensionati" rispetto alle caratteristiche meccaniche che erano chiamati a garantire. Prove specifiche di pelatura, scorrimento per taglio a compressione e a trazione e per torsione potrebbero determinare una ottimizzazione in termini di materiale utilizzato per le giunzioni. Questo porterebbe, unitamente alla definizione di un preciso processo automatizzato di stesura del collante, ad una ottimizzazione del processo produttivo e ad una conseguenziale riduzione dei costi di produzione.

*«L'ingegneria non riguarda soluzioni perfette, ma è fare il meglio possibile con risorse limitate.»*

*«L'esperienza è ciò che ottieni quando non sei riuscito a ottenere ciò che volevi.»*

Randy Pausch

---

# APPENDICE



## A. PROGETTAZIONE PARAMETRICA

---

### A.1 SCHEDE PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI

---

A.1.1 RISULTATI PRIMA ITERAZIONE

- 1 modulo: nella prima iterazione si ha un unico modulo, quindi un'unica soluzione generale e univoca.

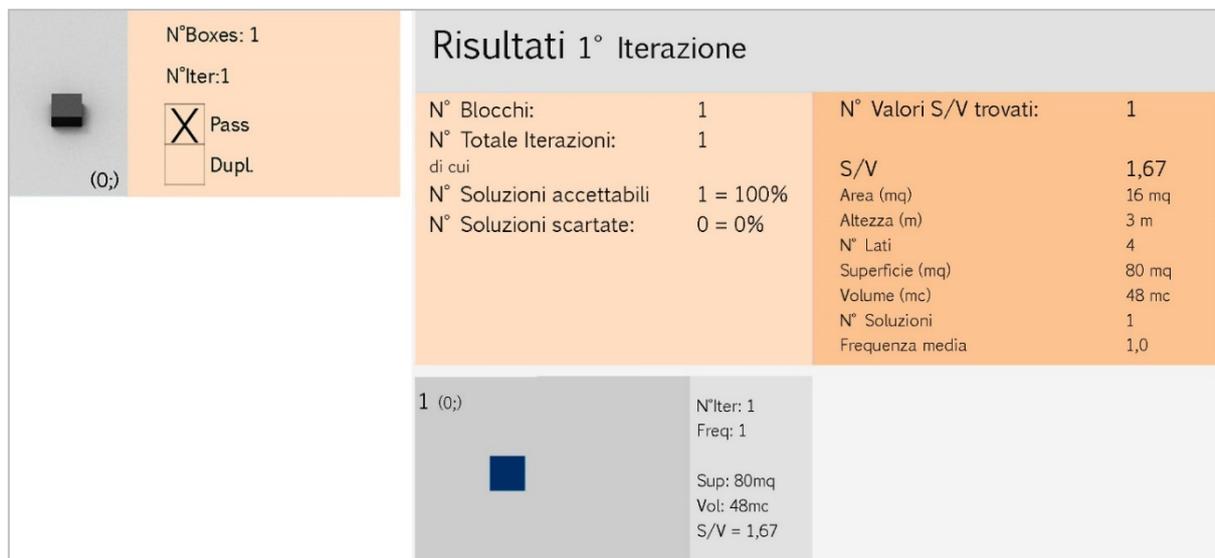


Figura A-1 I Iterazione

A.1.2 RISULTATI SECONDA ITERAZIONE

- Da 1 a 2 moduli: nella seconda iterazione si aggiunge un modulo al primo. Si ottengono 4 soluzioni generali che sono tutte costituite dalla rotazione rigida di un'unica forma, quindi si ha un'unica soluzione effettiva.



Figura A-2 II Iterazione

A.1.3 RISULTATI TERZA ITERAZIONE

- Da 2 a 3 moduli: all'unica soluzione della seconda iterazione si aggiunge un terzo modulo. Si ottengono 6 soluzioni generali, di cui solo 2 elementi non sono duplicati e sono unici.

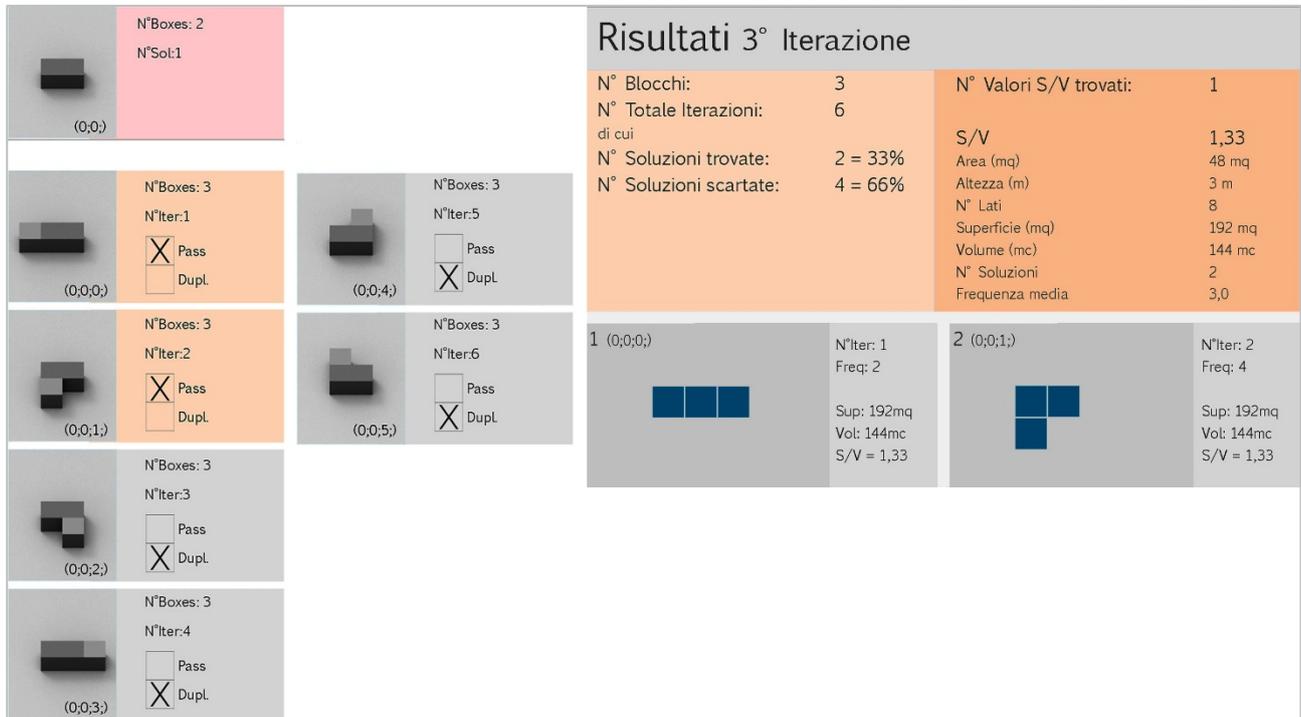


Figura A-3 III Iterazione

A.1.4 RISULTATI QUARTA ITERAZIONE

- Da 3 a 4 moduli: a partire dalle due soluzioni trovate si passa alla quarta iterazione e in questa fase si hanno 16 soluzioni generali ridotte poi a 5 soluzioni uniche.

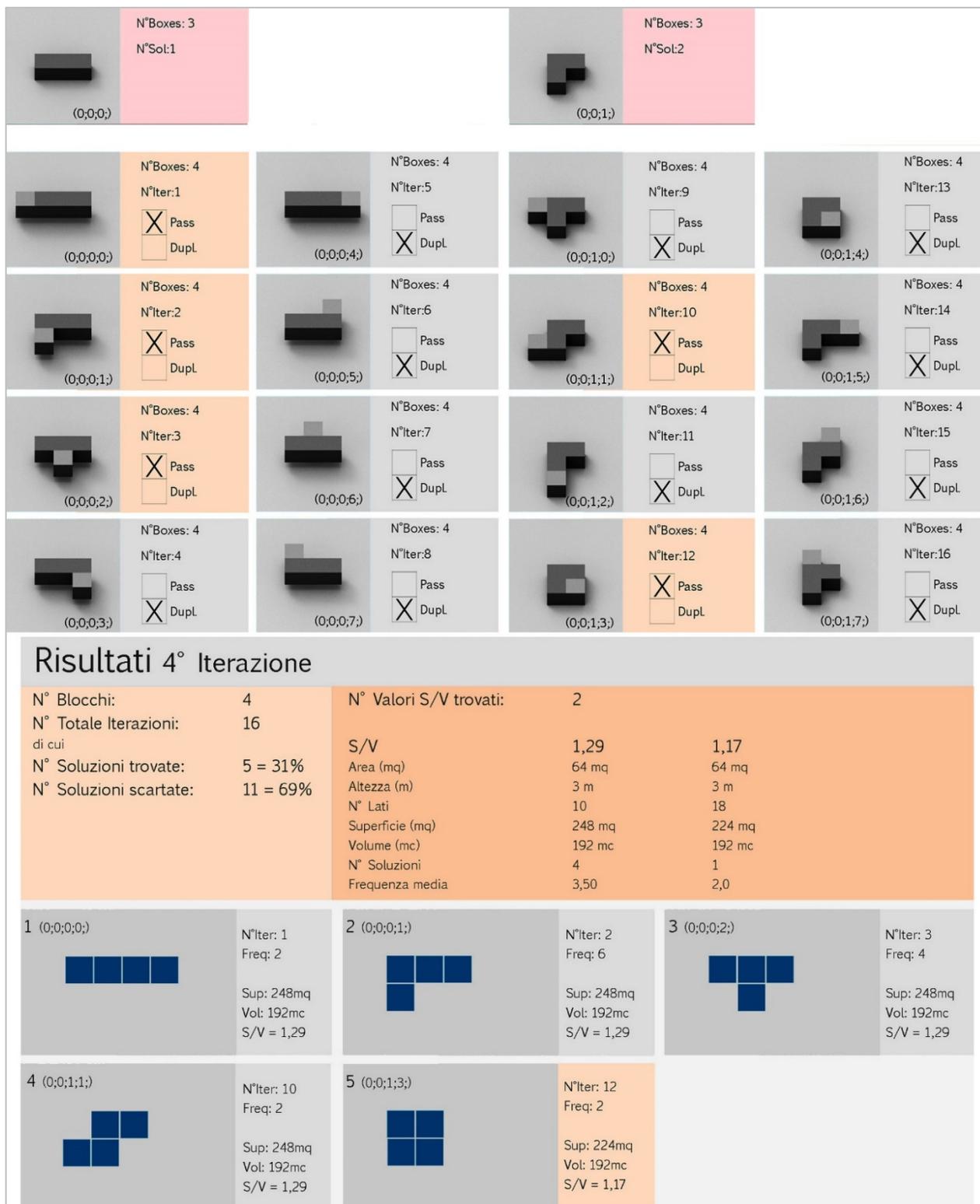


Figura A-4 IV Iterazione

A.1.5 RISULTATI QUINTA ITERAZIONE

- Da 4 a 5 moduli: a partire da queste cinque soluzioni trovate si passa alla quinta iterazione, dove si hanno 48 soluzioni generali di cui solo 12 soluzioni uniche.



Figura A-5 V Iterazione prima parte

 (0,0,1,3) N°Boxes: 4 N°Sol:5		
 (0,0,1,3,0) N°Boxes: 5 N°Iter:41 Pass Dupl	 (0,0,1,3,5) N°Boxes: 5 N°Iter:46 Pass Dupl	
 (0,0,1,3,1) N°Boxes: 5 N°Iter:42 Pass Dupl	 (0,0,1,3,6) N°Boxes: 5 N°Iter:47 Pass Dupl	
 (0,0,1,3,2) N°Boxes: 5 N°Iter:43 Pass Dupl	 (0,0,1,3,7) N°Boxes: 5 N°Iter:48 Pass Dupl	
 (0,0,1,3,3) N°Boxes: 5 N°Iter:44 Pass Dupl		
 (0,0,1,3,4) N°Boxes: 5 N°Iter:45 Pass Dupl		

Risultati 5° Iterazione		
N° Blocchi:	5	
N° Totale Iterazioni:	48	
N° Soluzioni trovate:	12 = 25%	
N° Soluzioni scartate:	36 = 75%	
N° Valori S/V trovati:	2	
S/V	1,27	1,17
Area (mq)	80 mq	80 mq
Altezza (m)	3 m	3 m
N° Lati	12	10
Superficie (mq)	304 mq	280 mq
Volume (mc)	240 mc	240 mc
N° Soluzioni	11	1
Frequenza media	2,73	18,00

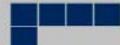
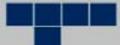
1 (0,0,0,0)  N°Iter: 1 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	2 (0,0,0,0,1)  N°Iter: 2 Freq: 5 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	3 (0,0,0,0,2)  N°Iter: 3 Freq: 7 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	4 (0,0,0,1,1)  N°Iter: 12 Freq: 3 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27
5 (0,0,0,1,2)  N°Iter: 13 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	6 (0,0,0,1,3)  N°Iter: 14 Freq: 18 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17	7 (0,0,0,1,5)  N°Iter: 16 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	8 (0,0,0,1,7)  N°Iter: 18 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27
9 (0,0,0,1,8)  N°Iter: 19 Freq: 5 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	10 (0,0,0,1,9)  N°Iter: 20 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	11 (0,0,0,2,8)  N°Iter: 29 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	12 (0,0,1,1,3)  N°Iter: 34 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27

Figura A-6 V Iterazione seconda parte

A.1.6 RISULTATI SESTA ITERAZIONE

- Da 5 a 6 moduli: a partire da queste si passa alla sesta iterazione e in questa fase si hanno 142 soluzioni generali ridotte poi a 36 soluzioni uniche.



Figura A-7 VI Iterazione prima parte



Figura A-8 VI Iterazione seconda parte

Risultati 6° Iterazione							
N° Blocchi: 6		N° Valori S/V trovati: 3					
N° Totale Iterazioni: 142		S/V	1,25	1,17	1,08		
N° Soluzioni trovate: 35 = 25%		Area (mq)	96 mq	96 mq	96 mq		
N° Soluzioni scartate: 437 = 75%		Altezza (m)	3 m	3 m	3 m		
		N° Lati	14	12	10		
		Superficie (mq)	360 mq	336 mq	312 mq		
		Volume (mc)	288 mc	288 mc	288 mc		
		N° Soluzioni	28	6	1		
		Frequenza media	3,18	8,00	5		
1 (0;0;0;0;0)	N°Iter: 1 Freq: 2	2 (0;0;0;0;1)	N°Iter: 2 Freq: 5	3 (0;0;0;0;2)	N°Iter: 3 Freq: 6	4 (0;0;0;0;3)	N°Iter: 4 Freq: 3
5 (0;0;0;0;1;1)	N°Iter: 14 Freq: 2	6 (0;0;0;0;1;2)	N°Iter: 15 Freq: 3	7 (0;0;0;0;1;3)	N°Iter: 16 Freq: 7	8 (0;0;0;0;1;5)	N°Iter: 18 Freq: 4
9 (0;0;0;0;1;6)	N°Iter: 19 Freq: 1	10 (0;0;0;0;1;8)	N°Iter: 21 Freq: 1	11 (0;0;0;0;1;9)	N°Iter: 22 Freq: 4	12 (0;0;0;0;1;10)	N°Iter: 23 Freq: 3
13 (0;0;0;0;1;11)	N°Iter: 24 Freq: 2	14 (0;0;0;0;2;3)	N°Iter: 28 Freq: 5	15 (0;0;0;0;2;4)	N°Iter: 29 Freq: 3	16 (0;0;0;0;2;9)	N°Iter: 34 Freq: 2
17 (0;0;0;0;2;10)	N°Iter: 35 Freq: 6	18 (0;0;0;0;1;1;2)	N°Iter: 39 Freq: 1	19 (0;0;0;0;1;1;3)	N°Iter: 40 Freq: 3	20 (0;0;0;0;1;1;4)	N°Iter: 41 Freq: 4
21 (0;0;0;0;1;1;5)	N°Iter: 42 Freq: 3	22 (0;0;0;0;1;1;7)	N°Iter: 44 Freq: 3	23 (0;0;0;0;1;1;9)	N°Iter: 46 Freq: 3	24 (0;0;0;0;1;1;10)	N°Iter: 47 Freq: 4
25 (0;0;0;0;1;1;11)	N°Iter: 48 Freq: 4	26 (0;0;0;0;1;2;2)	N°Iter: 51 Freq: 4	27 (0;0;0;0;1;2;4)	N°Iter: 53 Freq: 4	28 (0;0;0;0;1;2;5)	N°Iter: 54 Freq: 5
29 (0;0;0;0;1;3;3)	N°Iter: 64 Freq: 8	30 (0;0;0;0;1;3;4)	N°Iter: 65 Freq: 5	31 (0;0;0;0;1;3;7)	N°Iter: 68 Freq: 11	32 (0;0;0;0;1;3;8)	N°Iter: 69 Freq: 11
33 (0;0;0;0;1;5;9)	N°Iter: 80 Freq: 6	34 (0;0;0;0;1;5;10)	N°Iter: 81 Freq: 2	35 (0;0;1;1;3;3)	N°Iter: 134 Freq: 2		

Figura A-9 VI Iterazione risultati

A.1.7 RISULTATI SETTIMA ITERAZIONE

- Da 6 a 7 moduli: infine si passa alla settima iterazione e in questa fase si hanno 472 soluzioni generali da analizzare, di cui solo 108 sono uniche.



Figura A-10 VII Iterazione prima parte

A.1 SCHEDE PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI

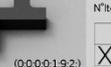
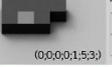
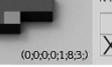
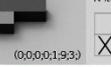
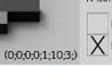
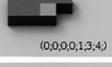
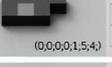
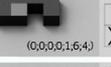
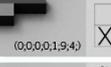
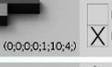
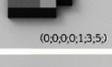
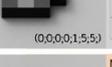
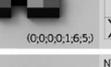
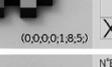
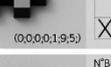
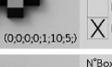
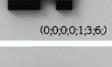
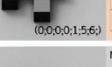
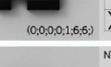
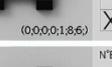
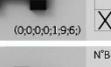
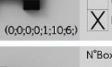
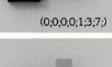
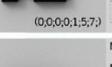
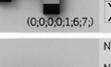
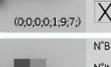
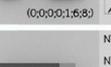
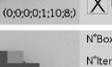
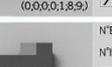
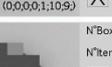
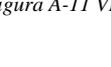
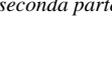
 (0,0,0;1,3) N°Boxes: 6 N°Sol:7	 (0,0,0;1,5) N°Boxes: 6 N°Sol:8	 (0,0,0;1,6) N°Boxes: 6 N°Sol:9	 (0,0,0;1,8) N°Boxes: 6 N°Sol:10	 (0,0,0;1,9) N°Boxes: 6 N°Sol:11	 (0,0,0;1,10) N°Boxes: 6 N°Sol:12
 (0,0,0;1,3,0) N°Boxes: 7 N°Iter:85 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,0) N°Boxes: 7 N°Iter:97 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,0) N°Boxes: 7 N°Iter:111 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,0) N°Boxes: 7 N°Iter:125 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,0) N°Boxes: 7 N°Iter:139 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,0) N°Boxes: 7 N°Iter:153 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,4) N°Boxes: 7 N°Iter:86 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,1) N°Boxes: 7 N°Iter:98 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,1) N°Boxes: 7 N°Iter:112 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,1) N°Boxes: 7 N°Iter:126 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,1) N°Boxes: 7 N°Iter:140 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,4) N°Boxes: 7 N°Iter:154 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,2) N°Boxes: 7 N°Iter:87 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,2) N°Boxes: 7 N°Iter:99 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,2) N°Boxes: 7 N°Iter:113 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,2) N°Boxes: 7 N°Iter:127 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,2) N°Boxes: 7 N°Iter:141 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,2) N°Boxes: 7 N°Iter:155 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,3) N°Boxes: 7 N°Iter:88 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,3) N°Boxes: 7 N°Iter:100 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,3) N°Boxes: 7 N°Iter:114 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,3) N°Boxes: 7 N°Iter:128 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,3) N°Boxes: 7 N°Iter:142 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,3) N°Boxes: 7 N°Iter:156 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,4) N°Boxes: 7 N°Iter:89 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,4) N°Boxes: 7 N°Iter:101 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,4) N°Boxes: 7 N°Iter:115 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,4) N°Boxes: 7 N°Iter:129 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,4) N°Boxes: 7 N°Iter:143 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,4) N°Boxes: 7 N°Iter:157 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,5) N°Boxes: 7 N°Iter:90 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,5) N°Boxes: 7 N°Iter:102 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,5) N°Boxes: 7 N°Iter:116 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,5) N°Boxes: 7 N°Iter:130 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,5) N°Boxes: 7 N°Iter:144 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,5) N°Boxes: 7 N°Iter:158 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,6) N°Boxes: 7 N°Iter:91 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,6) N°Boxes: 7 N°Iter:103 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,6) N°Boxes: 7 N°Iter:117 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,6) N°Boxes: 7 N°Iter:131 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,6) N°Boxes: 7 N°Iter:145 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,6) N°Boxes: 7 N°Iter:159 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,7) N°Boxes: 7 N°Iter:92 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,7) N°Boxes: 7 N°Iter:104 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,7) N°Boxes: 7 N°Iter:118 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,7) N°Boxes: 7 N°Iter:132 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,7) N°Boxes: 7 N°Iter:146 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,7) N°Boxes: 7 N°Iter:160 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,8) N°Boxes: 7 N°Iter:93 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,8) N°Boxes: 7 N°Iter:105 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,8) N°Boxes: 7 N°Iter:119 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,8) N°Boxes: 7 N°Iter:133 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,8) N°Boxes: 7 N°Iter:147 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,8) N°Boxes: 7 N°Iter:161 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,9) N°Boxes: 7 N°Iter:94 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,9) N°Boxes: 7 N°Iter:106 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,9) N°Boxes: 7 N°Iter:120 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,9) N°Boxes: 7 N°Iter:134 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,9) N°Boxes: 7 N°Iter:148 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,9) N°Boxes: 7 N°Iter:162 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,10) N°Boxes: 7 N°Iter:95 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,10) N°Boxes: 7 N°Iter:107 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,10) N°Boxes: 7 N°Iter:121 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,10) N°Boxes: 7 N°Iter:135 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,10) N°Boxes: 7 N°Iter:149 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,10) N°Boxes: 7 N°Iter:163 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0;1,3,11) N°Boxes: 7 N°Iter:96 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,5,11) N°Boxes: 7 N°Iter:108 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,11) N°Boxes: 7 N°Iter:122 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,11) N°Boxes: 7 N°Iter:136 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,11) N°Boxes: 7 N°Iter:150 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,11) N°Boxes: 7 N°Iter:164 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl
	 (0,0,0;1,5,12) N°Boxes: 7 N°Iter:109 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,12) N°Boxes: 7 N°Iter:123 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,12) N°Boxes: 7 N°Iter:137 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,12) N°Boxes: 7 N°Iter:151 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,12) N°Boxes: 7 N°Iter:165 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
	 (0,0,0;1,5,13) N°Boxes: 7 N°Iter:110 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,6,13) N°Boxes: 7 N°Iter:124 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,8,13) N°Boxes: 7 N°Iter:138 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,9,13) N°Boxes: 7 N°Iter:152 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0;1,10,13) N°Boxes: 7 N°Iter:166 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl

Figura A-11 VII Iterazione seconda parte

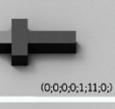
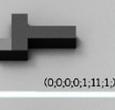
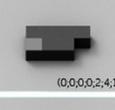
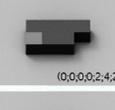
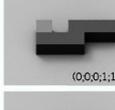
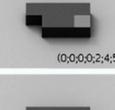
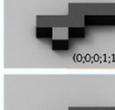
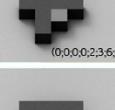
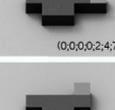
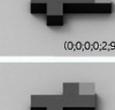
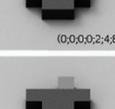
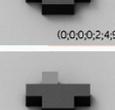
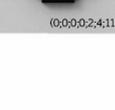
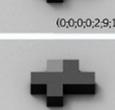
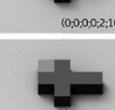
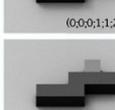
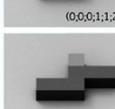
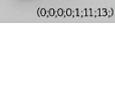
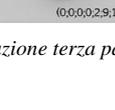
 (0,0,0,1:11)	N'Boxes: 6 N'Sol:13	 (0,0,0,2:3)	N'Boxes: 6 N'Sol:14	 (0,0,0,2:4)	N'Boxes: 6 N'Sol:15	 (0,0,0,2:9)	N'Boxes: 6 N'Sol:16	 (0,0,0,2:10)	N'Boxes: 6 N'Sol:17	 (0,0,0,1:2)	N'Boxes: 6 N'Sol:18
 (0,0,0,1:11,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:167 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:181 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:195 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:207 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:221 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:235 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:168 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:182 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:196 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:208 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:222 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:236 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:169 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:183 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:197 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:209 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:223 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:237 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:170 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:184 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:198 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:210 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:224 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:238 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:171 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:185 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:199 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:211 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:225 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:239 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:172 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:186 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:200 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:212 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:226 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:240 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:173 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:187 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:201 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:213 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:227 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:241 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:174 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:188 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:202 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:214 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:228 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:242 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:175 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:189 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:203 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:215 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:229 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:243 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:176 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:190 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:204 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:216 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:230 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:244 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:177 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:191 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:205 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:217 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:231 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:245 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:178 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:192 Pass Dupl	 (0,0,0,2:4,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:206 Pass Dupl	 (0,0,0,2:9,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:218 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:232 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:246 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:179 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:193 Pass Dupl			 (0,0,0,2:9,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:219 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:233 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:247 Pass Dupl
 (0,0,0,1:11,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:180 Pass Dupl	 (0,0,0,2:3,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:194 Pass Dupl			 (0,0,0,2:9,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:220 Pass Dupl	 (0,0,0,2:10,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:234 Pass Dupl	 (0,0,0,1:2,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:248 Pass Dupl

Figura A-12 VII Iterazione terza parte

A.1 SCHEDE PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI

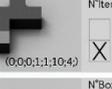
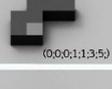
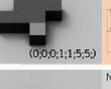
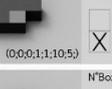
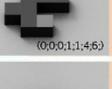
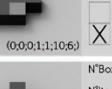
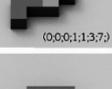
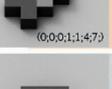
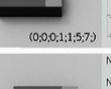
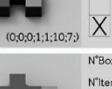
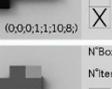
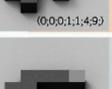
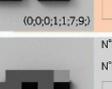
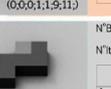
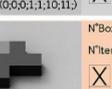
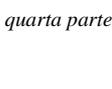
 (0,0,0,1,1,3)	N'Boxes: 6 N'Sol:19	 (0,0,0,1,1,4)	N'Boxes: 6 N'Sol:20	 (0,0,0,1,1,5)	N'Boxes: 6 N'Sol:21	 (0,0,0,1,1,7)	N'Boxes: 6 N'Sol:22	 (0,0,0,1,1,9)	N'Boxes: 6 N'Sol:23	 (0,0,0,1,1,10)	N'Boxes: 6 N'Sol:24
 (0,0,0,1,1,3,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:249 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:263 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:277 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:289 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:303 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,0)	N'Boxes: 7 N'Iter:317 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:250 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:264 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:278 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:290 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:304 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,1)	N'Boxes: 7 N'Iter:318 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:251 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:265 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:279 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:291 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:305 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,2)	N'Boxes: 7 N'Iter:319 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:252 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:266 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:280 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:292 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:306 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,3)	N'Boxes: 7 N'Iter:320 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:253 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:267 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:281 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:293 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:307 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,4)	N'Boxes: 7 N'Iter:321 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:254 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:268 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:282 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:294 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:308 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,5)	N'Boxes: 7 N'Iter:322 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:255 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:269 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:283 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:295 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:309 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,6)	N'Boxes: 7 N'Iter:323 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:256 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:270 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:284 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:296 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:310 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,7)	N'Boxes: 7 N'Iter:324 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:257 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:271 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:285 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:297 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:311 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,8)	N'Boxes: 7 N'Iter:325 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:258 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:272 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:286 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:298 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:312 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,9)	N'Boxes: 7 N'Iter:326 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:259 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:273 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:287 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:299 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:313 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,10)	N'Boxes: 7 N'Iter:327 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:260 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:274 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,5,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:288 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,7,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:300 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:314 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,11)	N'Boxes: 7 N'Iter:328 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:261 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:275 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl			 (0,0,0,1,1,7,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:301 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:315 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,12)	N'Boxes: 7 N'Iter:329 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl
 (0,0,0,1,1,3,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:262 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,4,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:276 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl			 (0,0,0,1,1,7,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:302 <input checked="" type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,9,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:316 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl	 (0,0,0,1,1,10,13)	N'Boxes: 7 N'Iter:330 <input type="checkbox"/> Pass <input checked="" type="checkbox"/> Dupl

Figura A-13 VII Iterazione quarta parte

 (0,0,1,1,11) N'Boxes: 6 N'Sol:25	 (0,0,1,2,2) N'Boxes: 6 N'Sol:26	 (0,0,1,2,4) N'Boxes: 6 N'Sol:27	 (0,0,1,2,5) N'Boxes: 6 N'Sol:28	 (0,0,1,3,3) N'Boxes: 6 N'Sol:29	 (0,0,1,3,4) N'Boxes: 6 N'Sol:30
 (0,0,1,1,11,0) N'Boxes: 7 N'Iter:331 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,0) N'Boxes: 7 N'Iter:345 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,0) N'Boxes: 7 N'Iter:359 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,0) N'Boxes: 7 N'Iter:373 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,0) N'Boxes: 7 N'Iter:385 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,0) N'Boxes: 7 N'Iter:397 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,1) N'Boxes: 7 N'Iter:332 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,1) N'Boxes: 7 N'Iter:346 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,1) N'Boxes: 7 N'Iter:360 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,1) N'Boxes: 7 N'Iter:374 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,1) N'Boxes: 7 N'Iter:386 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,1) N'Boxes: 7 N'Iter:398 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,2) N'Boxes: 7 N'Iter:333 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,2) N'Boxes: 7 N'Iter:347 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,2) N'Boxes: 7 N'Iter:361 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,2) N'Boxes: 7 N'Iter:375 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,2) N'Boxes: 7 N'Iter:387 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,2) N'Boxes: 7 N'Iter:399 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,3) N'Boxes: 7 N'Iter:334 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,3) N'Boxes: 7 N'Iter:348 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,3) N'Boxes: 7 N'Iter:362 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,3) N'Boxes: 7 N'Iter:376 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,3) N'Boxes: 7 N'Iter:388 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,3) N'Boxes: 7 N'Iter:400 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,4) N'Boxes: 7 N'Iter:335 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,4) N'Boxes: 7 N'Iter:349 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,4) N'Boxes: 7 N'Iter:363 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,4) N'Boxes: 7 N'Iter:377 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,4) N'Boxes: 7 N'Iter:389 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,4) N'Boxes: 7 N'Iter:401 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,5) N'Boxes: 7 N'Iter:336 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,5) N'Boxes: 7 N'Iter:350 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,5) N'Boxes: 7 N'Iter:364 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,5) N'Boxes: 7 N'Iter:378 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,5) N'Boxes: 7 N'Iter:390 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,5) N'Boxes: 7 N'Iter:402 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,6) N'Boxes: 7 N'Iter:337 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,6) N'Boxes: 7 N'Iter:351 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,6) N'Boxes: 7 N'Iter:365 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,6) N'Boxes: 7 N'Iter:379 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,6) N'Boxes: 7 N'Iter:391 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,6) N'Boxes: 7 N'Iter:403 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,7) N'Boxes: 7 N'Iter:338 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,7) N'Boxes: 7 N'Iter:352 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,7) N'Boxes: 7 N'Iter:366 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,7) N'Boxes: 7 N'Iter:380 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,7) N'Boxes: 7 N'Iter:392 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,7) N'Boxes: 7 N'Iter:404 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,8) N'Boxes: 7 N'Iter:339 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,8) N'Boxes: 7 N'Iter:353 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,8) N'Boxes: 7 N'Iter:367 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,8) N'Boxes: 7 N'Iter:381 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,8) N'Boxes: 7 N'Iter:393 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,8) N'Boxes: 7 N'Iter:405 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,9) N'Boxes: 7 N'Iter:340 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,9) N'Boxes: 7 N'Iter:354 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,9) N'Boxes: 7 N'Iter:368 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,9) N'Boxes: 7 N'Iter:382 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,9) N'Boxes: 7 N'Iter:394 Pass Dupl	 (0,0,1,3,4,9) N'Boxes: 7 N'Iter:406 Pass Dupl
 (0,0,1,1,11,10) N'Boxes: 7 N'Iter:341 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,10) N'Boxes: 7 N'Iter:355 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,10) N'Boxes: 7 N'Iter:369 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,10) N'Boxes: 7 N'Iter:383 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,10) N'Boxes: 7 N'Iter:395 Pass Dupl	
 (0,0,1,1,11,11) N'Boxes: 7 N'Iter:342 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,11) N'Boxes: 7 N'Iter:356 Pass Dupl	 (0,0,1,2,4,11) N'Boxes: 7 N'Iter:370 Pass Dupl	 (0,0,1,2,5,11) N'Boxes: 7 N'Iter:384 Pass Dupl	 (0,0,1,3,3,11) N'Boxes: 7 N'Iter:396 Pass Dupl	
 (0,0,1,1,11,12) N'Boxes: 7 N'Iter:343 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,12) N'Boxes: 7 N'Iter:357 Pass Dupl	 (0,0,0,2,4,12) N'Boxes: 7 N'Iter:371 Pass Dupl			
 (0,0,1,1,11,13) N'Boxes: 7 N'Iter:344 Pass Dupl	 (0,0,1,2,2,13) N'Boxes: 7 N'Iter:358 Pass Dupl	 (0,0,0,2,4,13) N'Boxes: 7 N'Iter:372 Pass Dupl			

Figura A-14 VII Iterazione quinta parte

A.1 SCHEDE PER L'AGGREGAZIONE DEI MODULI

 (0,0,1,3,7) N'Boxes: 6 N'Sol:31	 (0,0,1,3,8) N'Boxes: 6 N'Sol:32	 (0,0,1,5,9) N'Boxes: 6 N'Sol:33	 (0,0,1,5,10) N'Boxes: 6 N'Sol:34	 (0,0,1,1,3,3) N'Boxes: 6 N'Sol:35
 (0,0,1,3,7,9) N'Boxes: 7 N'Iter:407 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,9) N'Boxes: 7 N'Iter:419 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,9) N'Boxes: 7 N'Iter:431 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,9) N'Boxes: 7 N'Iter:445 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,9) N'Boxes: 7 N'Iter:459 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,1) N'Boxes: 7 N'Iter:408 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,1) N'Boxes: 7 N'Iter:420 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,1) N'Boxes: 7 N'Iter:432 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,1) N'Boxes: 7 N'Iter:446 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,1) N'Boxes: 7 N'Iter:460 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,2) N'Boxes: 7 N'Iter:409 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,2) N'Boxes: 7 N'Iter:421 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,2) N'Boxes: 7 N'Iter:433 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,2) N'Boxes: 7 N'Iter:447 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,2) N'Boxes: 7 N'Iter:461 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,3) N'Boxes: 7 N'Iter:410 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,3) N'Boxes: 7 N'Iter:422 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,3) N'Boxes: 7 N'Iter:434 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,3) N'Boxes: 7 N'Iter:448 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,3) N'Boxes: 7 N'Iter:462 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,4) N'Boxes: 7 N'Iter:411 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,4) N'Boxes: 7 N'Iter:423 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,4) N'Boxes: 7 N'Iter:435 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,4) N'Boxes: 7 N'Iter:449 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,4) N'Boxes: 7 N'Iter:463 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,5) N'Boxes: 7 N'Iter:412 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,5) N'Boxes: 7 N'Iter:424 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,5) N'Boxes: 7 N'Iter:436 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,5) N'Boxes: 7 N'Iter:450 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,5) N'Boxes: 7 N'Iter:464 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,6) N'Boxes: 7 N'Iter:413 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,6) N'Boxes: 7 N'Iter:425 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,6) N'Boxes: 7 N'Iter:437 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,6) N'Boxes: 7 N'Iter:451 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,6) N'Boxes: 7 N'Iter:465 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,7) N'Boxes: 7 N'Iter:414 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,7) N'Boxes: 7 N'Iter:426 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,7) N'Boxes: 7 N'Iter:438 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,7) N'Boxes: 7 N'Iter:452 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,7) N'Boxes: 7 N'Iter:466 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,8) N'Boxes: 7 N'Iter:415 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,8) N'Boxes: 7 N'Iter:427 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,8) N'Boxes: 7 N'Iter:439 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,8) N'Boxes: 7 N'Iter:453 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,8) N'Boxes: 7 N'Iter:467 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,9) N'Boxes: 7 N'Iter:416 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,9) N'Boxes: 7 N'Iter:428 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,9) N'Boxes: 7 N'Iter:440 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,9) N'Boxes: 7 N'Iter:454 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,9) N'Boxes: 7 N'Iter:468 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,10) N'Boxes: 7 N'Iter:417 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,10) N'Boxes: 7 N'Iter:429 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,10) N'Boxes: 7 N'Iter:441 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,10) N'Boxes: 7 N'Iter:455 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,10) N'Boxes: 7 N'Iter:469 Pass Dupl
 (0,0,1,3,7,11) N'Boxes: 7 N'Iter:418 Pass Dupl	 (0,0,1,3,8,11) N'Boxes: 7 N'Iter:430 Pass Dupl	 (0,0,1,5,9,11) N'Boxes: 7 N'Iter:442 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,11) N'Boxes: 7 N'Iter:456 Pass Dupl	 (0,0,1,1,3,3,11) N'Boxes: 7 N'Iter:470 Pass Dupl
		 (0,0,1,5,9,12) N'Boxes: 7 N'Iter:443 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,12) N'Boxes: 7 N'Iter:457 Pass Dupl	 (0,0,1,1,9,12) N'Boxes: 7 N'Iter:471 Pass Dupl
		 (0,0,1,5,9,13) N'Boxes: 7 N'Iter:444 Pass Dupl	 (0,0,1,5,10,13) N'Boxes: 7 N'Iter:458 Pass Dupl	 (0,0,1,1,9,13) N'Boxes: 7 N'Iter:472 Pass Dupl

Figura A-15 VII Iterazione sesta parte

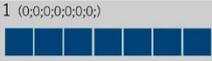
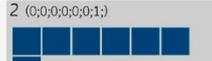
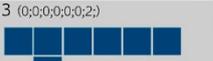
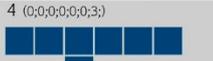
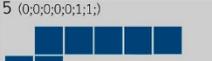
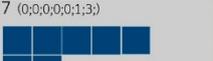
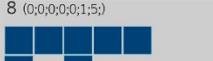
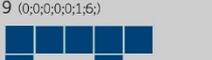
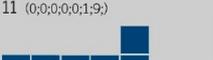
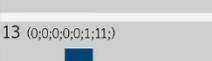
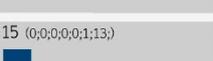
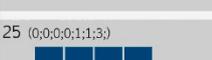
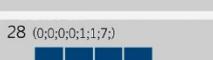
Risultati: 7° Iterazione			
N° Blocchi: 7 N° Totale Iterazioni: 472 di cui N° Soluzioni trovate: 108 = 23% N° Soluzioni scartate: 364 = 77%		N° Valori S/V trovati: 3	
		S/V: 1,24 Area (mq): 112 mq Altezza (m): 3 m N° Lati: 16 Superficie (mq): 416 mq Volume (mc): 336 mc N° Soluzioni: 83 Frequenza media: 2,95	S/V: 1,17 Area (mq): 112 mq Altezza (m): 3 m N° Lati: 14 Superficie (mq): 392 mq Volume (mc): 336 mc N° Soluzioni: 21 Frequenza media: 8,29
		S/V: 1,10 Area (mq): 112 mq Altezza (m): 3 m N° Lati: 12 Superficie (mq): 368 mq Volume (mc): 336 mc N° Soluzioni: 4 Frequenza media: 13,25	
1 (0;0;0;0;0;0)  N°Iter: 1 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	2 (0;0;0;0;0;1)  N°Iter: 2 Freq: 5 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	3 (0;0;0;0;0;2)  N°Iter: 3 Freq: 6 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	4 (0;0;0;0;0;3)  N°Iter: 4 Freq: 7 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
5 (0;0;0;0;1;1)  N°Iter: 16 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	6 (0;0;0;0;1;2)  N°Iter: 17 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	7 (0;0;0;0;1;3)  N°Iter: 18 Freq: 7 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	8 (0;0;0;0;1;5)  N°Iter: 20 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
9 (0;0;0;0;1;6)  N°Iter: 21 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	10 (0;0;0;0;1;7)  N°Iter: 22 Freq: 1 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	11 (0;0;0;0;1;9)  N°Iter: 24 Freq: 1 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	12 (0;0;0;0;1;10)  N°Iter: 25 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
13 (0;0;0;0;1;11)  N°Iter: 26 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	14 (0;0;0;0;1;12)  N°Iter: 27 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	15 (0;0;0;0;1;13)  N°Iter: 28 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	16 (0;0;0;0;2;3)  N°Iter: 32 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
17 (0;0;0;0;2;4)  N°Iter: 33 Freq: 9 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	18 (0;0;0;0;2;6)  N°Iter: 35 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	19 (0;0;0;0;2;10)  N°Iter: 39 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	20 (0;0;0;0;2;11)  N°Iter: 40 Freq: 5 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
21 (0;0;0;0;2;12)  N°Iter: 41 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	22 (0;0;0;0;3;4)  N°Iter: 47 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	23 (0;0;0;0;3;11)  N°Iter: 54 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	24 (0;0;0;0;1;1;2)  N°Iter: 59 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
25 (0;0;0;0;1;1;3)  N°Iter: 60 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	26 (0;0;0;0;1;1;4)  N°Iter: 61 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	27 (0;0;0;0;1;1;5)  N°Iter: 62 Freq: 9 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	28 (0;0;0;0;1;1;7)  N°Iter: 64 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24

Figura A-16 VII Iterazione risultati prima parte

29 (0;0;0;0;1;1;8)  N°iter: 65 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	30 (0;0;0;0;1;1;10)  N°iter: 67 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	31 (0;0;0;0;1;1;11)  N°iter: 68 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	32 (0;0;0;0;1;1;12)  N°iter: 69 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
33 (0;0;0;0;1;1;13)  N°iter: 70 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	34 (0;0;0;0;1;2;2)  N°iter: 73 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	35 (0;0;0;0;1;2;3)  N°iter: 74 Freq: 1 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	36 (0;0;0;0;1;2;4)  N°iter: 75 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
37 (0;0;0;0;1;2;5)  N°iter: 76 Freq: 7 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	38 (0;0;0;0;1;2;7)  N°iter: 78 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	39 (0;0;0;0;1;2;8)  N°iter: 79 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	40 (0;0;0;0;1;2;10)  N°iter: 81 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
41 (0;0;0;0;1;2;11)  N°iter: 82 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	42 (0;0;0;0;1;2;12)  N°iter: 83 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	43 (0;0;0;0;1;2;13)  N°iter: 84 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	44 (0;0;0;0;1;3;3)  N°iter: 88 Freq: 6 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17
45 (0;0;0;0;1;3;4)  N°iter: 89 Freq: 20 Sup: 368mq Vol: 336mc S/V = 1,10	46 (0;0;0;0;1;3;6)  N°iter: 91 Freq: 9 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	47 (0;0;0;0;1;3;8)  N°iter: 93 Freq: 8 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	48 (0;0;0;0;1;3;9)  N°iter: 94 Freq: 11 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17
49 (0;0;0;0;1;3;10)  N°iter: 95 Freq: 11 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	50 (0;0;0;0;1;3;11)  N°iter: 96 Freq: 8 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	51 (0;0;0;0;1;5;6)  N°iter: 103 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	52 (0;0;0;0;1;5;10)  N°iter: 107 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
53 (0;0;0;0;1;5;11)  N°iter: 108 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	54 (0;0;0;0;1;5;12)  N°iter: 109 Freq: 6 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	55 (0;0;0;0;1;5;13)  N°iter: 110 Freq: 5 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	56 (0;0;0;0;1;6;10)  N°iter: 121 Freq: 6 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
57 (0;0;0;0;1;6;11)  N°iter: 122 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	58 (0;0;0;0;1;9;10)  N°iter: 149 Freq: 1 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	59 (0;0;0;0;1;9;11)  N°iter: 150 Freq: 7 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	60 (0;0;0;0;1;10;11)  N°iter: 164 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
61 (0;0;0;0;2;3;3)  N°iter: 184 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	62 (0;0;0;0;2;3;5)  N°iter: 186 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	63 (0;0;0;0;2;3;6)  N°iter: 187 Freq: 7 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	64 (0;0;0;0;2;3;11)  N°iter: 192 Freq: 5 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
65 (0;0;0;0;2;3;12)  N°iter: 193 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	66 (0;0;0;0;2;4;9)  N°iter: 204 Freq: 13 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	67 (0;0;0;1;1;2;4)  N°iter: 239 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	68 (0;0;0;1;1;2;5)  N°iter: 240 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24

Figura A-17 VII Iterazione risultati seconda parte

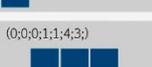
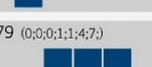
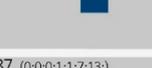
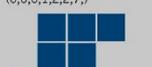
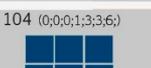
69 (0;0;0;1;1;2;9)  N°iter: 244 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	70 (0;0;0;1;1;3;3)  N°iter: 252 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	71 (0;0;0;1;1;3;4)  N°iter: 253 Freq: 1 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	72 (0;0;0;1;1;3;9)  N°iter: 258 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
73 (0;0;0;1;1;3;11)  N°iter: 260 Freq: 2 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	74 (0;0;0;1;1;3;12)  N°iter: 261 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	75 (0;0;0;1;1;3;13)  N°iter: 262 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	76 (0;0;0;1;1;4;2)  N°iter: 265 Freq: 6 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
77 (0;0;0;1;1;4;3)  N°iter: 266 Freq: 7 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	78 (0;0;0;1;1;4;6)  N°iter: 269 Freq: 4 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24	79 (0;0;0;1;1;4;7)  N°iter: 270 Freq: 10 Sup: 392mq Vol: 336mc S/V = 1,17	80 (0;0;0;1;1;4;9)  N°iter: 272 Freq: 3 Sup: 416mq Vol: 336mc S/V = 1,24
81 (0;0;0;1;1;4;11)  N°iter: 274 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	82 (0;0;0;1;1;4;12)  N°iter: 275 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	83 (0;0;0;1;1;5;5)  N°iter: 282 Freq: 6 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17	84 (0;0;0;1;1;7;8)  N°iter: 297 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27
85 (0;0;0;1;1;7;9)  N°iter: 298 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	86 (0;0;0;1;1;7;12)  N°iter: 301 Freq: 4 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	87 (0;0;0;1;1;7;13)  N°iter: 302 Freq: 3 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	88 (0;0;0;1;1;9;5)  N°iter: 308 Freq: 7 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17
89 (0;0;0;1;1;9;7)  N°iter: 310 Freq: 3 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	90 (0;0;0;1;1;9;9)  N°iter: 312 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	91 (0;0;0;1;1;9;10)  N°iter: 313 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	92 (0;0;0;1;1;9;11)  N°iter: 314 Freq: 9 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17
93 (0;0;0;1;1;10;12)  N°iter: 329 Freq: 6 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17	94 (0;0;0;1;1;11;9)  N°iter: 340 Freq: 3 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	95 (0;0;0;1;1;11;13)  N°iter: 344 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	96 (0;0;0;1;2;2;3)  N°iter: 348 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27
97 (0;0;0;1;2;2;7)  N°iter: 352 Freq: 9 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17	98 (0;0;0;1;2;2;9)  N°iter: 354 Freq: 4 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	99 (0;0;0;1;2;2;11)  N°iter: 356 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	100 (0;0;0;1;2;4;2)  N°iter: 361 Freq: 3 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27
101 (0;0;0;1;2;4;5)  N°iter: 364 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	102 (0;0;0;1;2;4;6)  N°iter: 365 Freq: 18 Sup: 368mq Vol: 336mc S/V = 1,10	103 (0;0;0;1;2;4;9)  N°iter: 368 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	104 (0;0;0;1;3;3;6)  N°iter: 391 Freq: 11 Sup: 368mq Vol: 336mc S/V = 1,10
105 (0;0;0;1;3;7;9)  N°iter: 416 Freq: 4 Sup: 368mq Vol: 336mc S/V = 1,10	106 (0;0;0;1;5;9;11)  N°iter: 442 Freq: 8 Sup: 280mq Vol: 240mc S/V = 1,17	107 (0;0;0;1;5;9;13)  N°iter: 444 Freq: 1 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27	108 (0;0;1;1;3;3;5)  N°iter: 464 Freq: 2 Sup: 304mq Vol: 240mc S/V = 1,27

Figura A-18 VII Iterazione risultati terza parte

## **A.2 SCHEDE PER L'ADATTABILITA' FUNZIONALE**

---

A.2.1 SCHEDA MONOLOCALE A - 1 SOLUZIONE

- Soluzione 1: 2 moduli - 32 mq

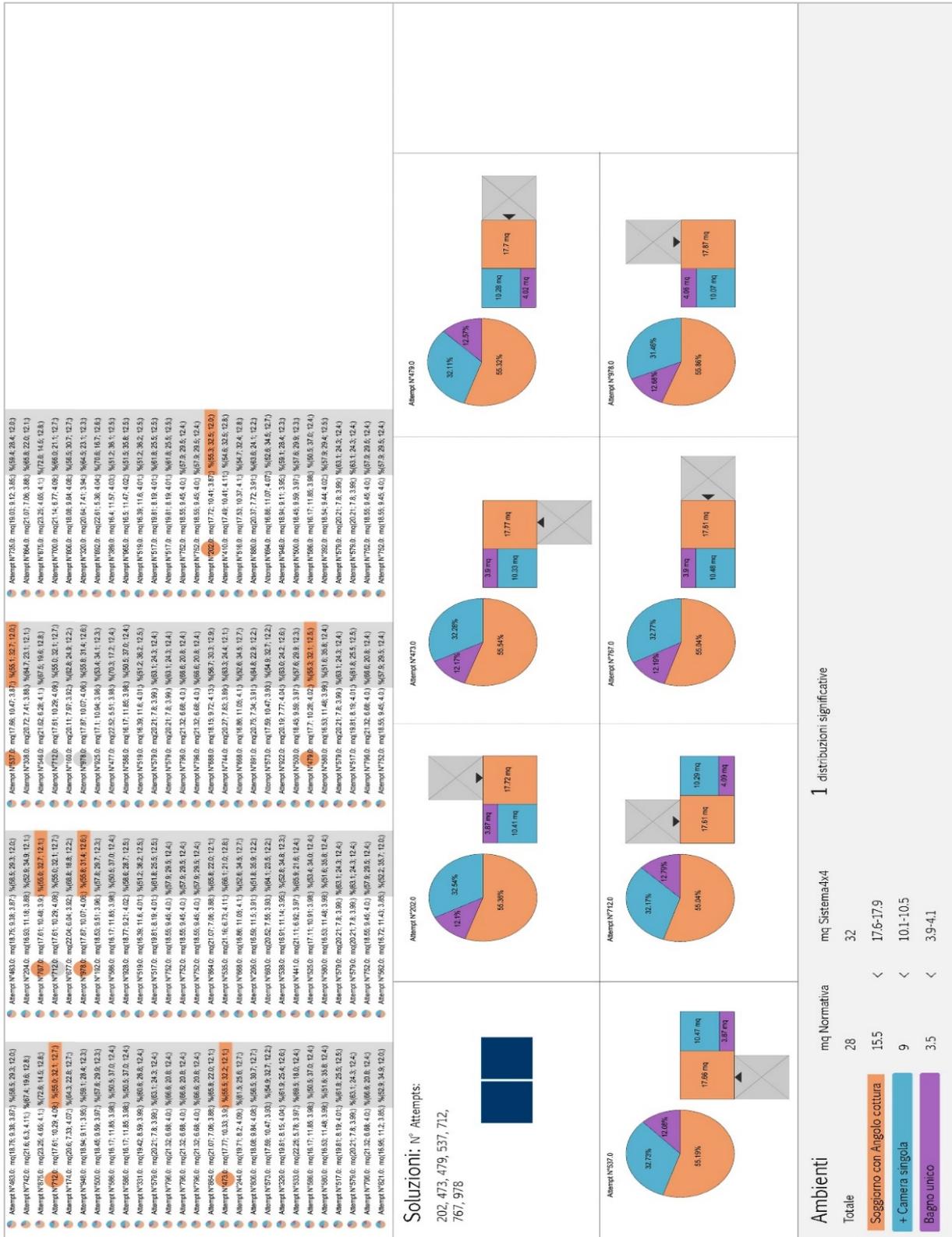


Figura A-19 - Monolocale A - 2 moduli - soluzione 1

A.2.2 SCHEDA BILOCALE AA - 2 SOLUZIONI

- Soluzione 1: 3 blocchi - 48 mq

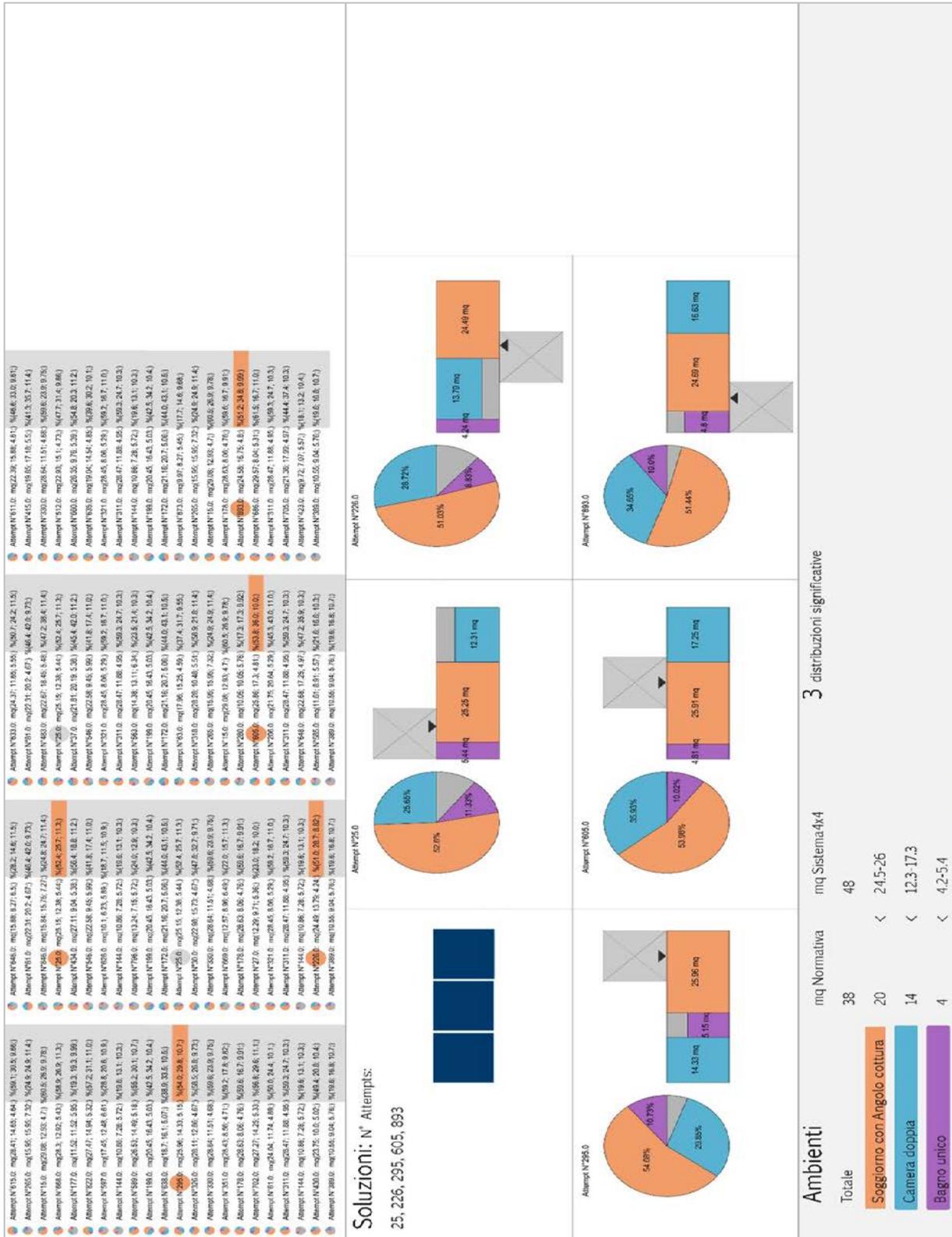


Figura A-20 - Bilocale AA - 3 moduli - soluzione 1



A.2.3 TRILOCALE AAB - 5 SOLUZIONI

- Soluzione 1: 4 blocchi - 64 mq

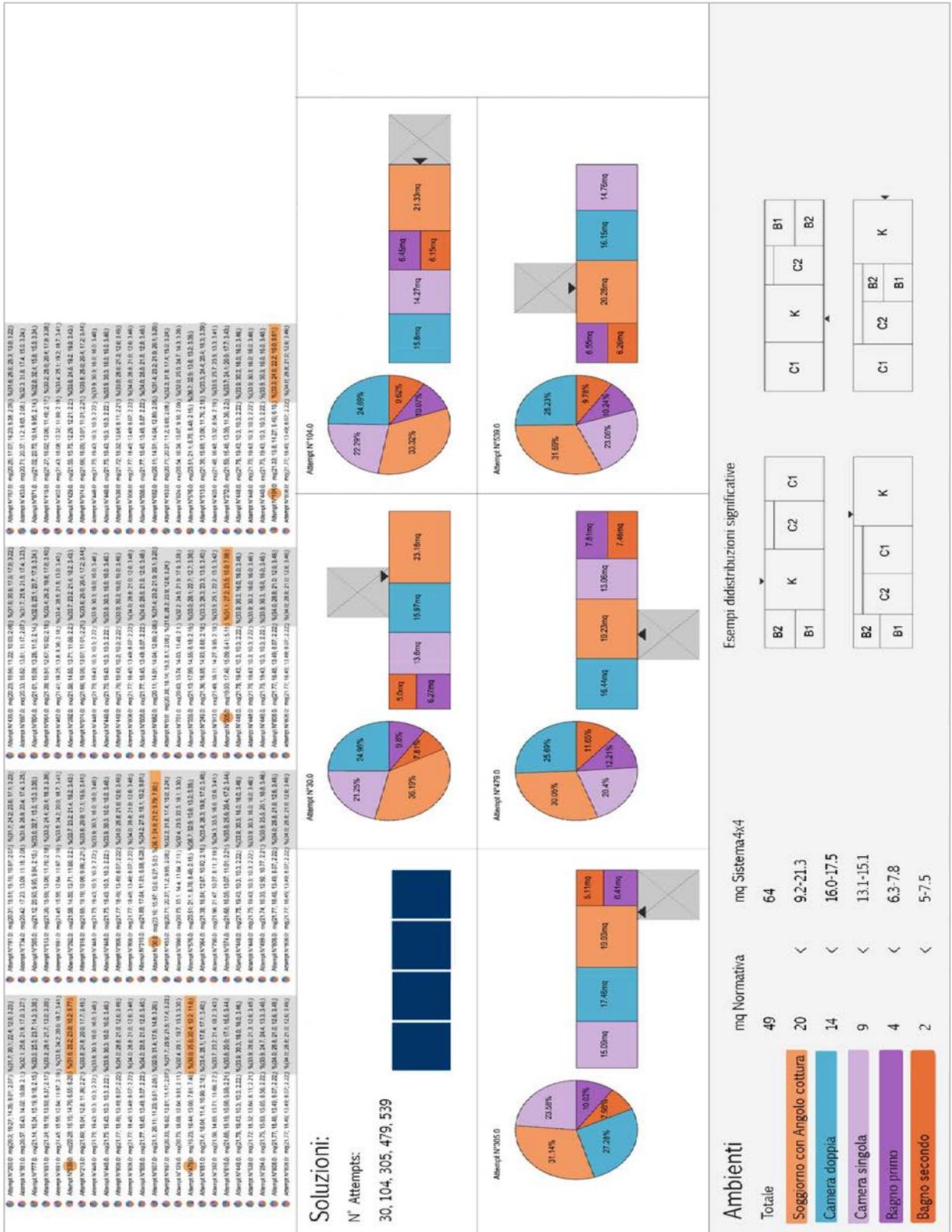


Figura A-22 - Trilocale Aab - 4 moduli - soluzione 1

- Soluzione 2: 4 blocchi - 64 mq

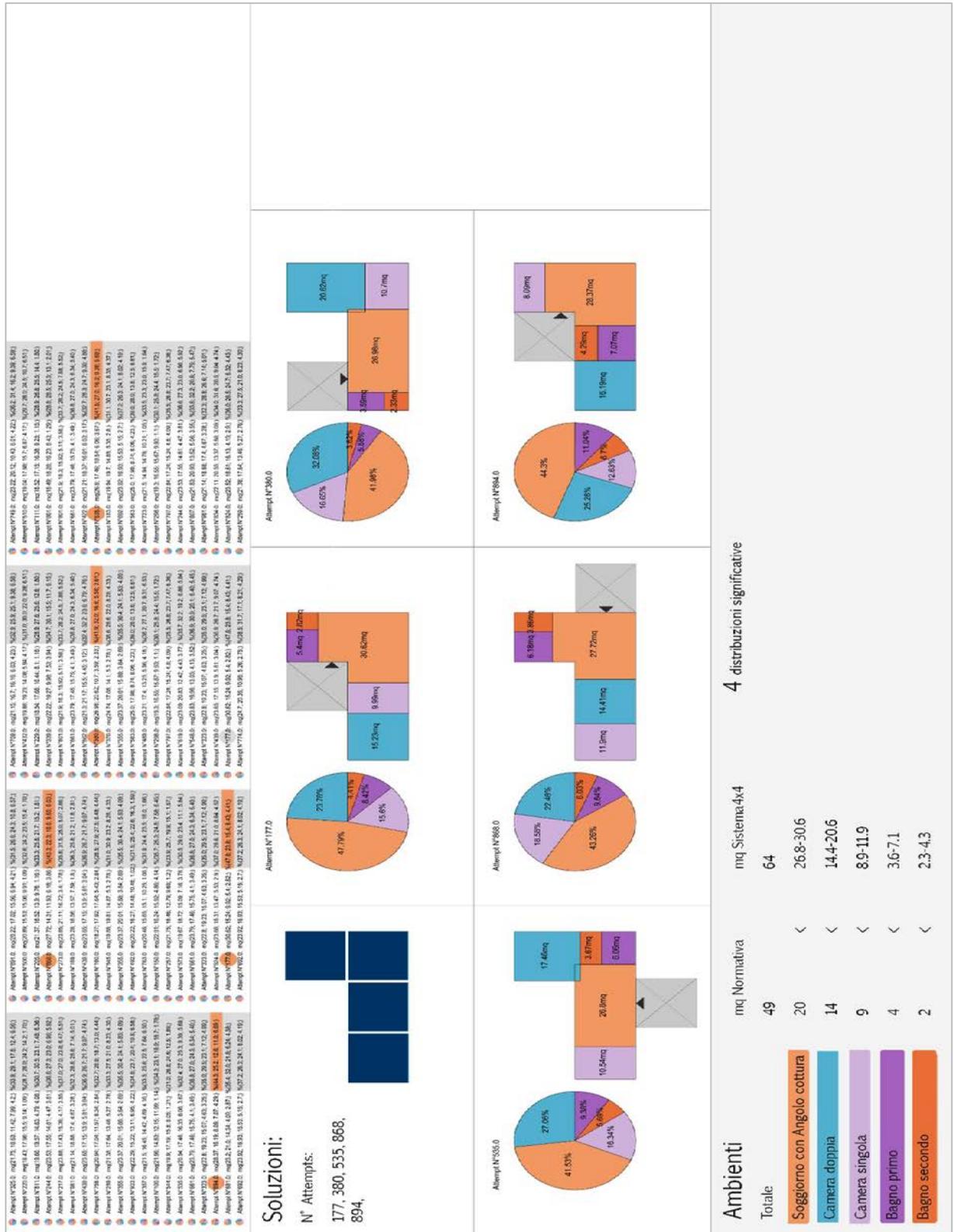


Figura A-23 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 2



- Soluzione 4: 4 blocchi - 64 mq

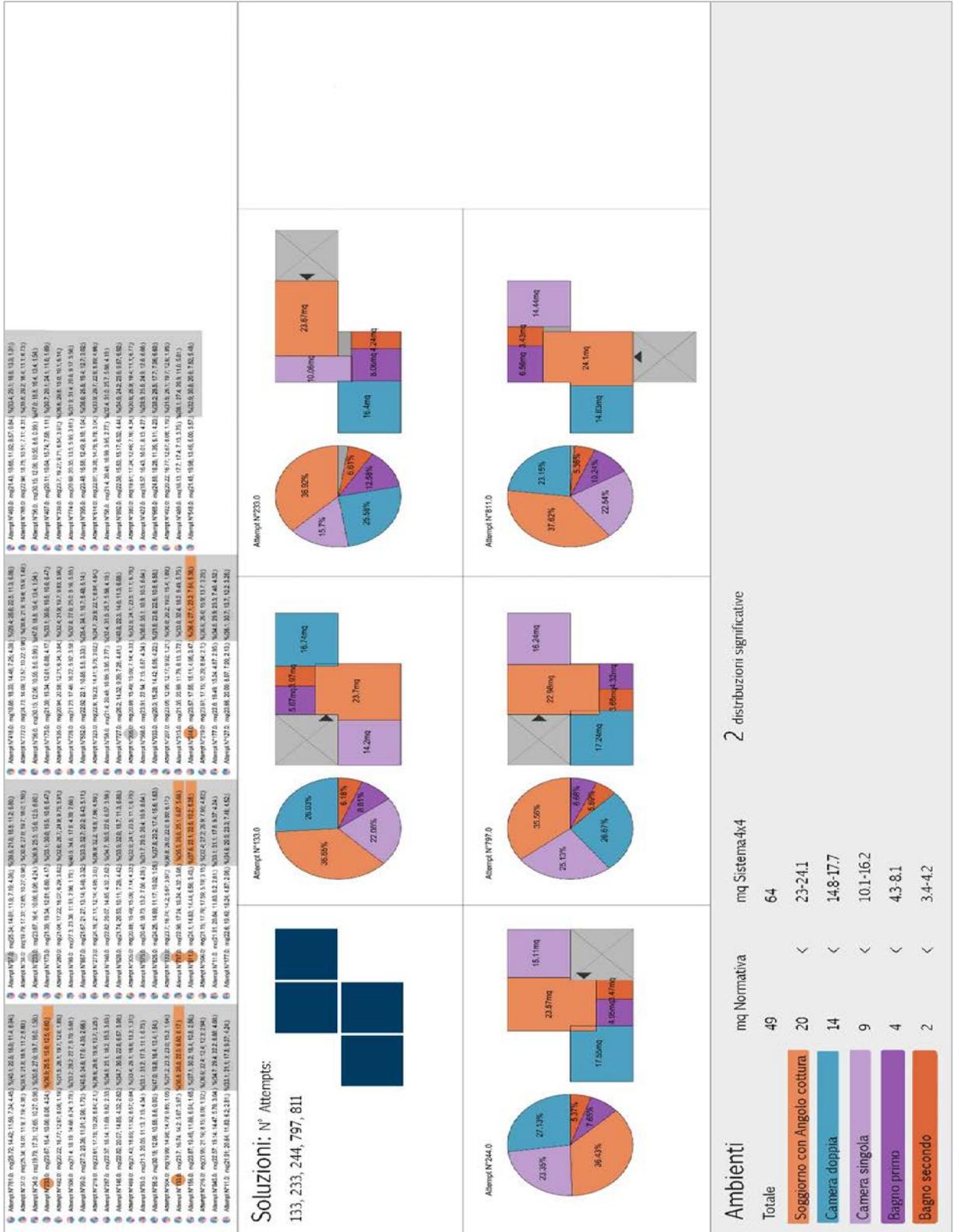


Figura A-25 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 4

- Soluzione 5: 4 blocchi - 64 mq

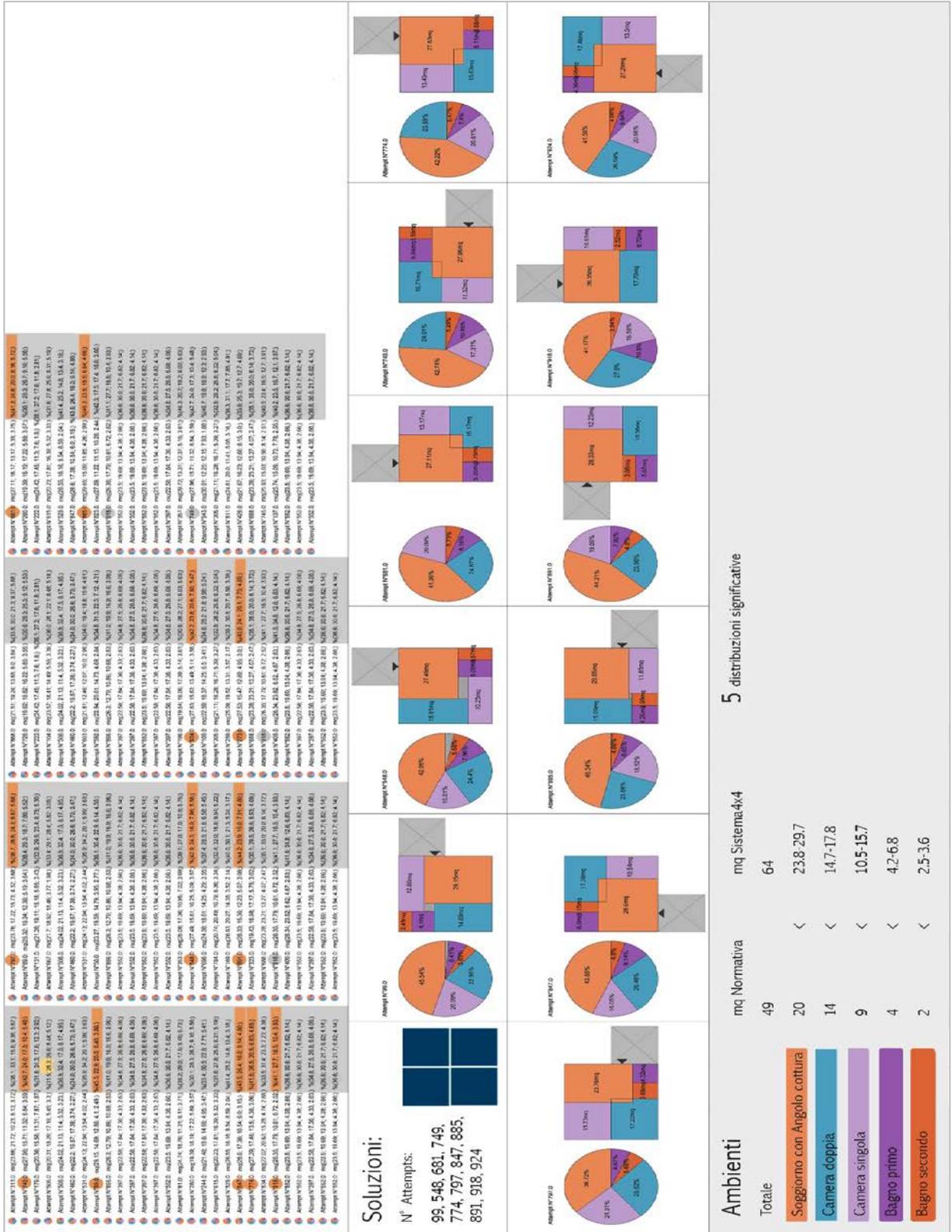


Figura A-26 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 5

A.2.4 QUADRILOCALE AAA - 5 SOLUZIONI

- Soluzione 1: 4 blocchi - 64 mq

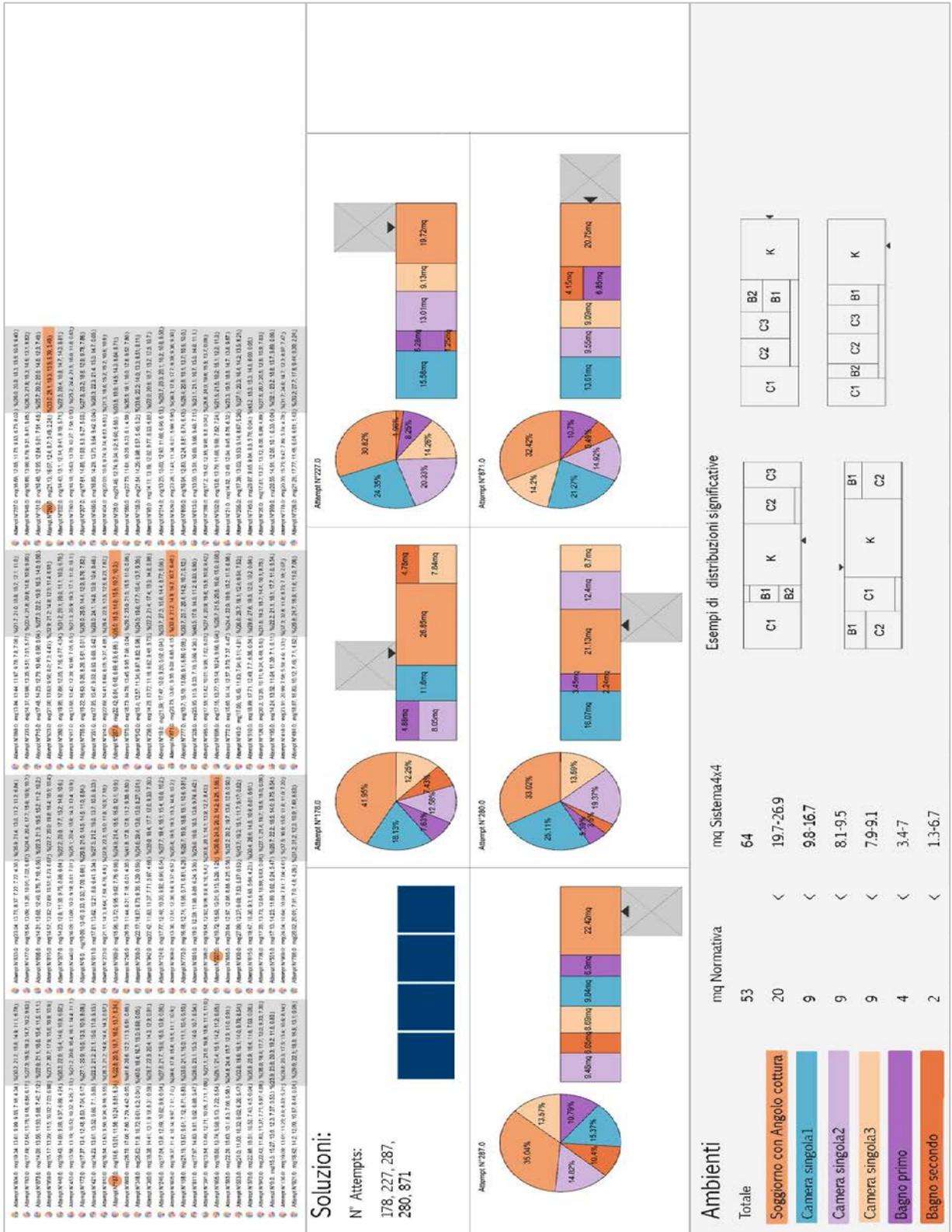


Figura A-27 -Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 1

- Soluzione 2: 4 blocchi - 64 mq



Figura A-28 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 2

- Soluzione 3: 4 blocchi - 64 mq

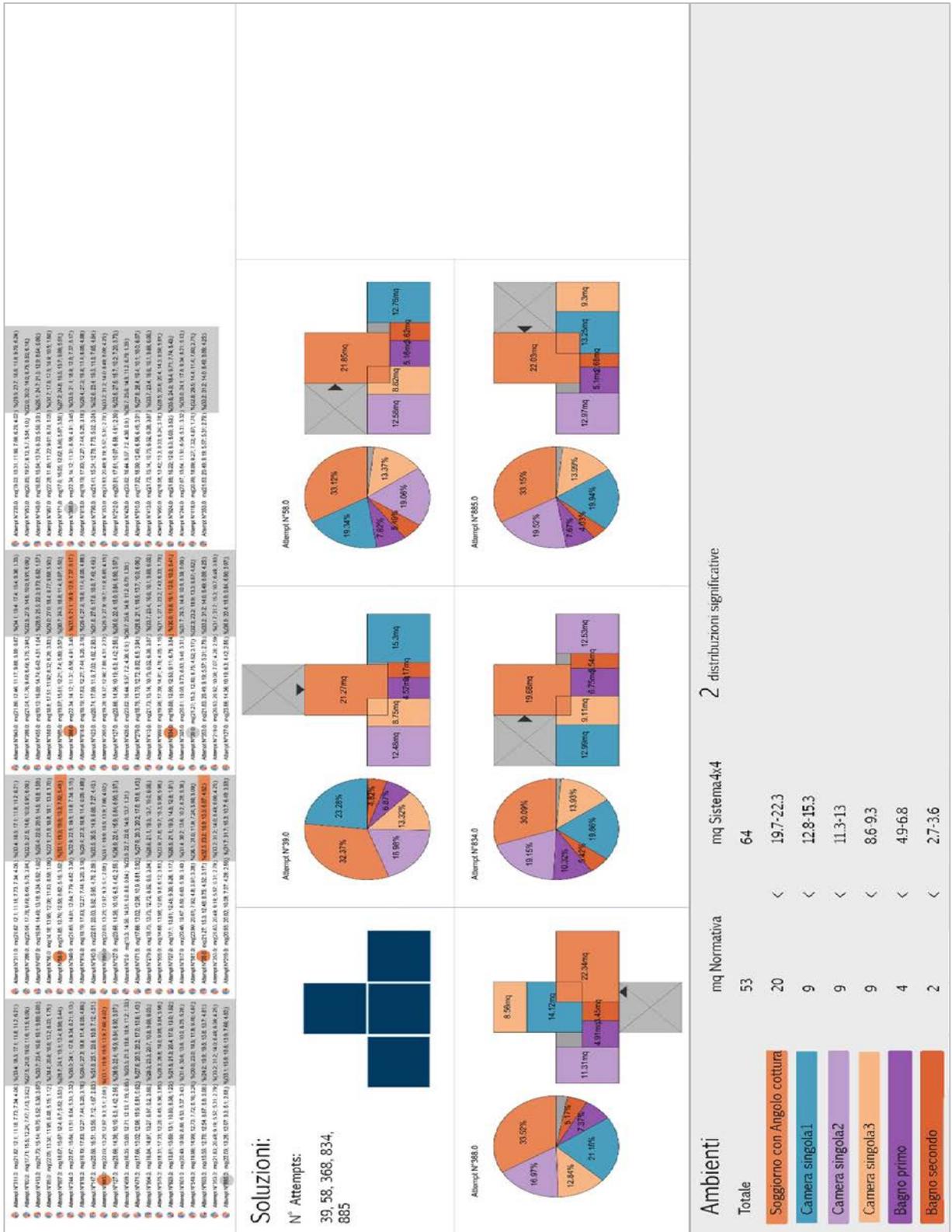


Figura A-29 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 3

- Soluzione 4: 4 blocchi - 64 mq

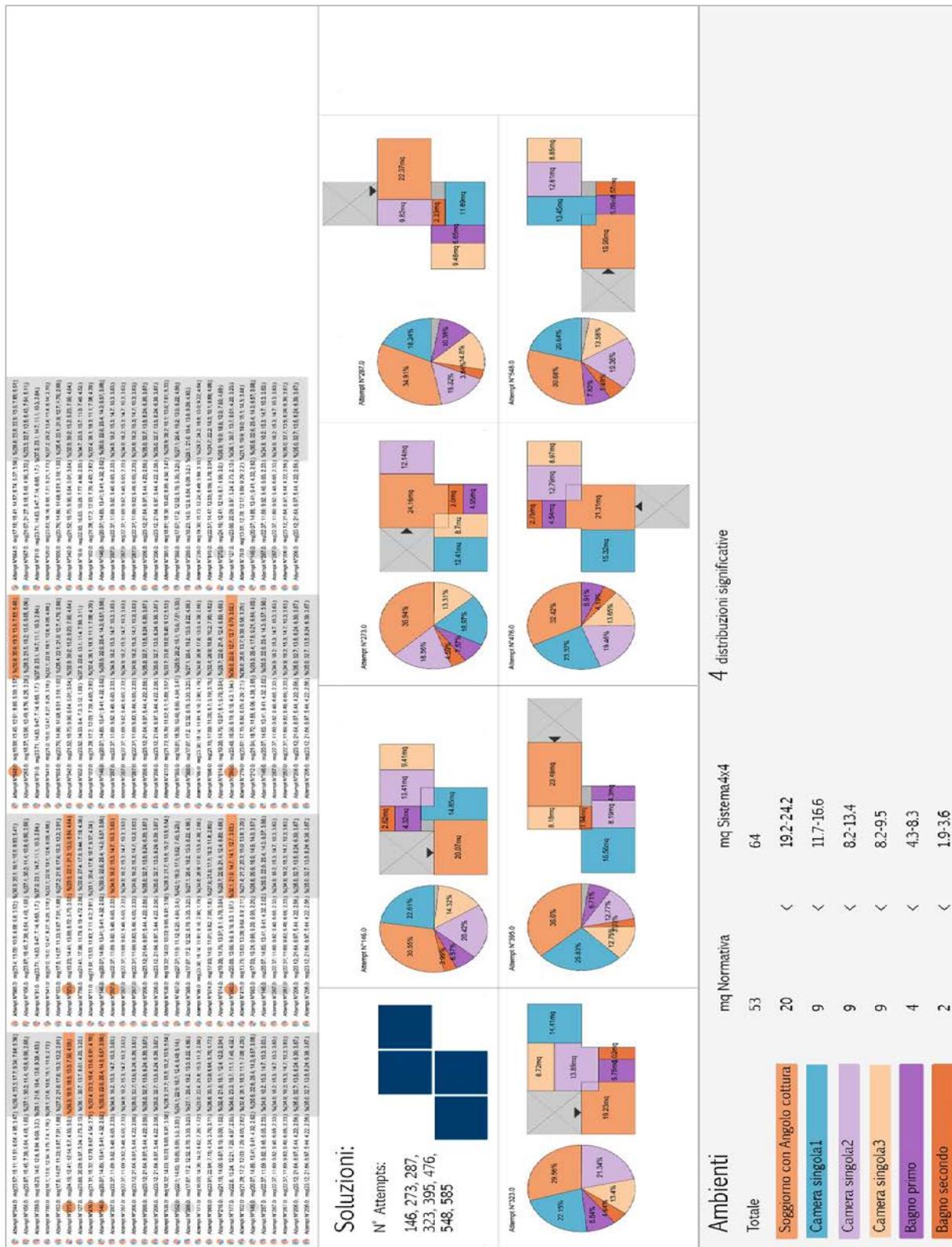


Figura A-30 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 4

- Soluzione 4: 4 blocchi - 64 mq

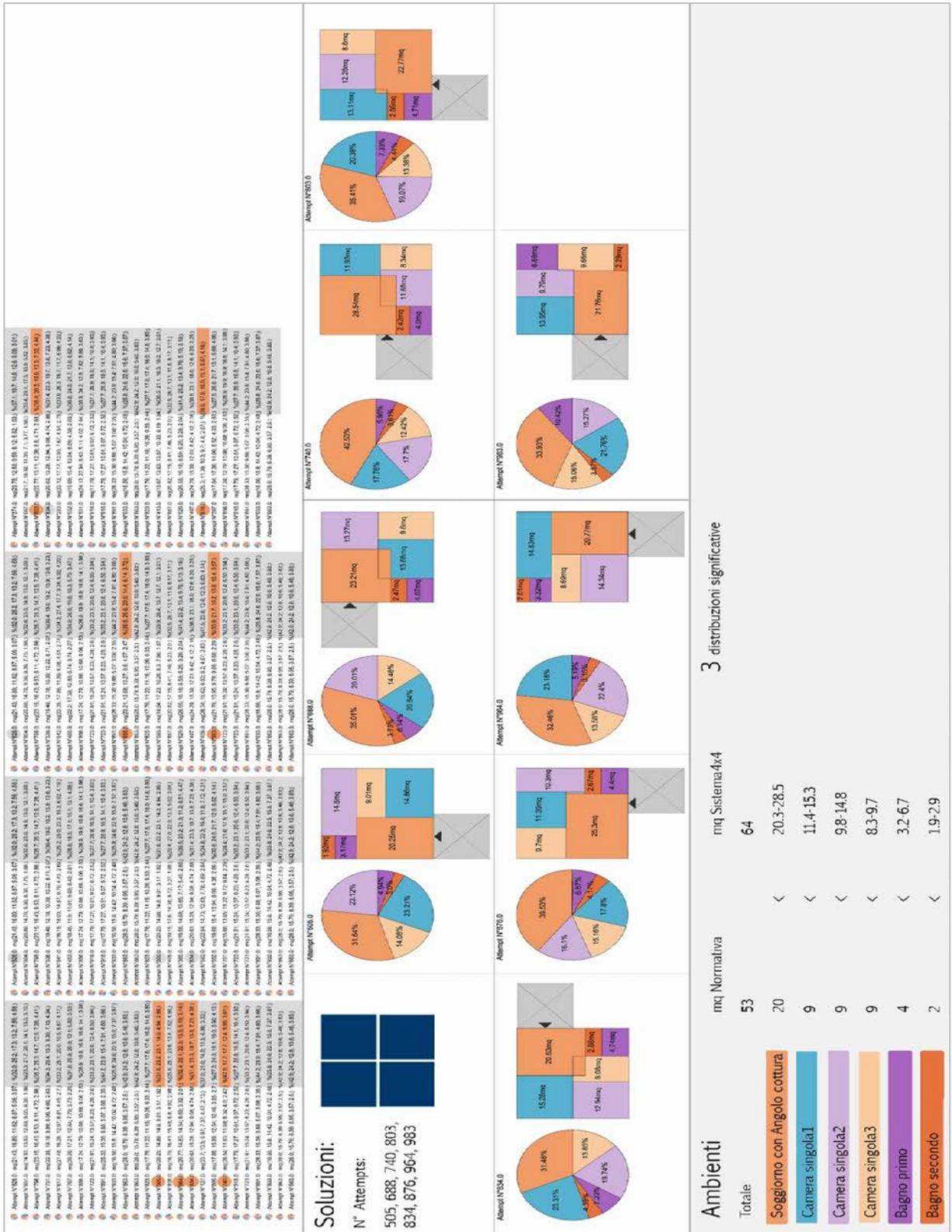


Figura A-31 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 5

A.2.5 PLURILOCALE AABB - 1 SOLUZIONE

- Soluzione 1: 5 blocchi - 90 mq

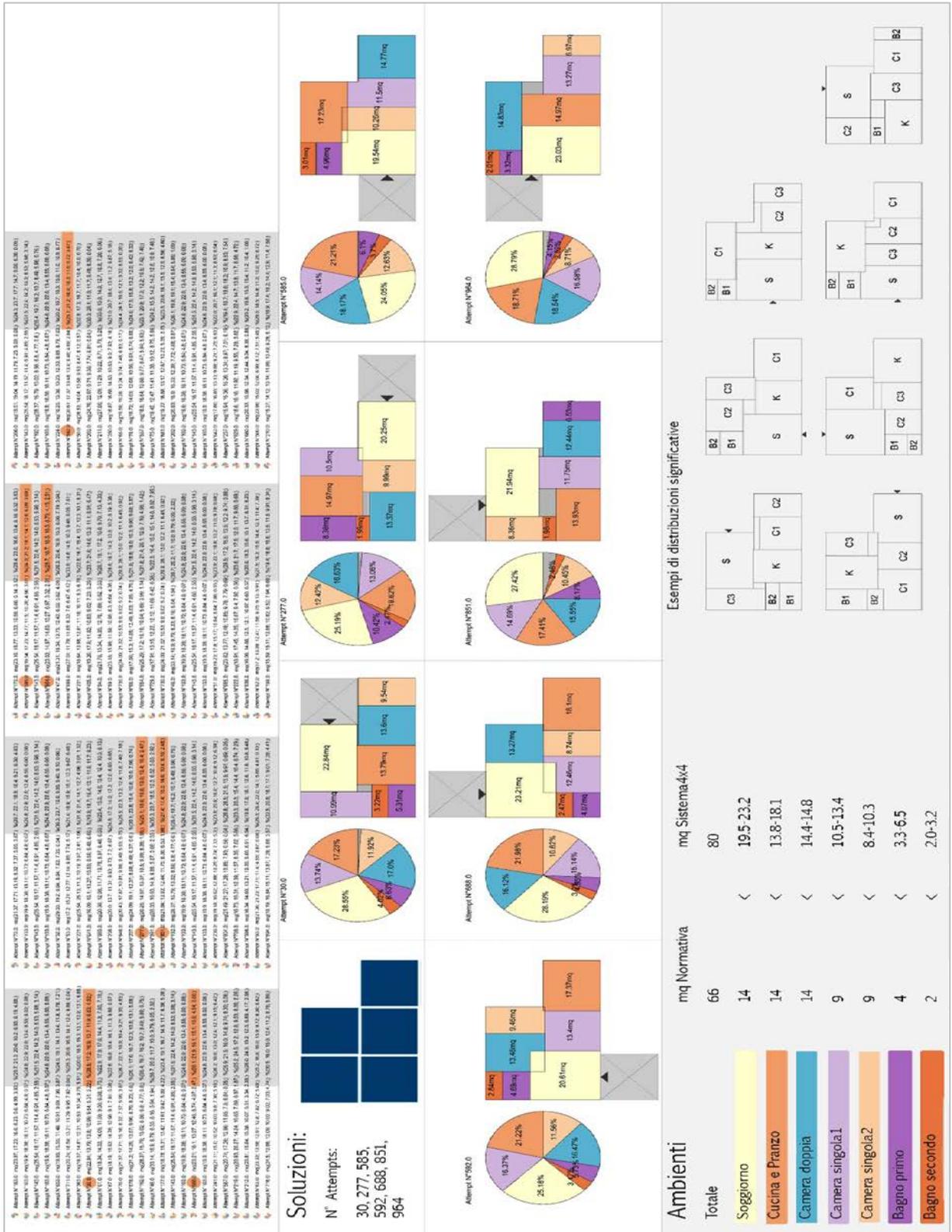


Figura A-32 - Plurilocale AAbb - 5 moduli - soluzione 1

A.2.6 PLURILOCALE AAAA - 1 SOLUZIONE

- Soluzione 1: 6 blocchi - 96 mq

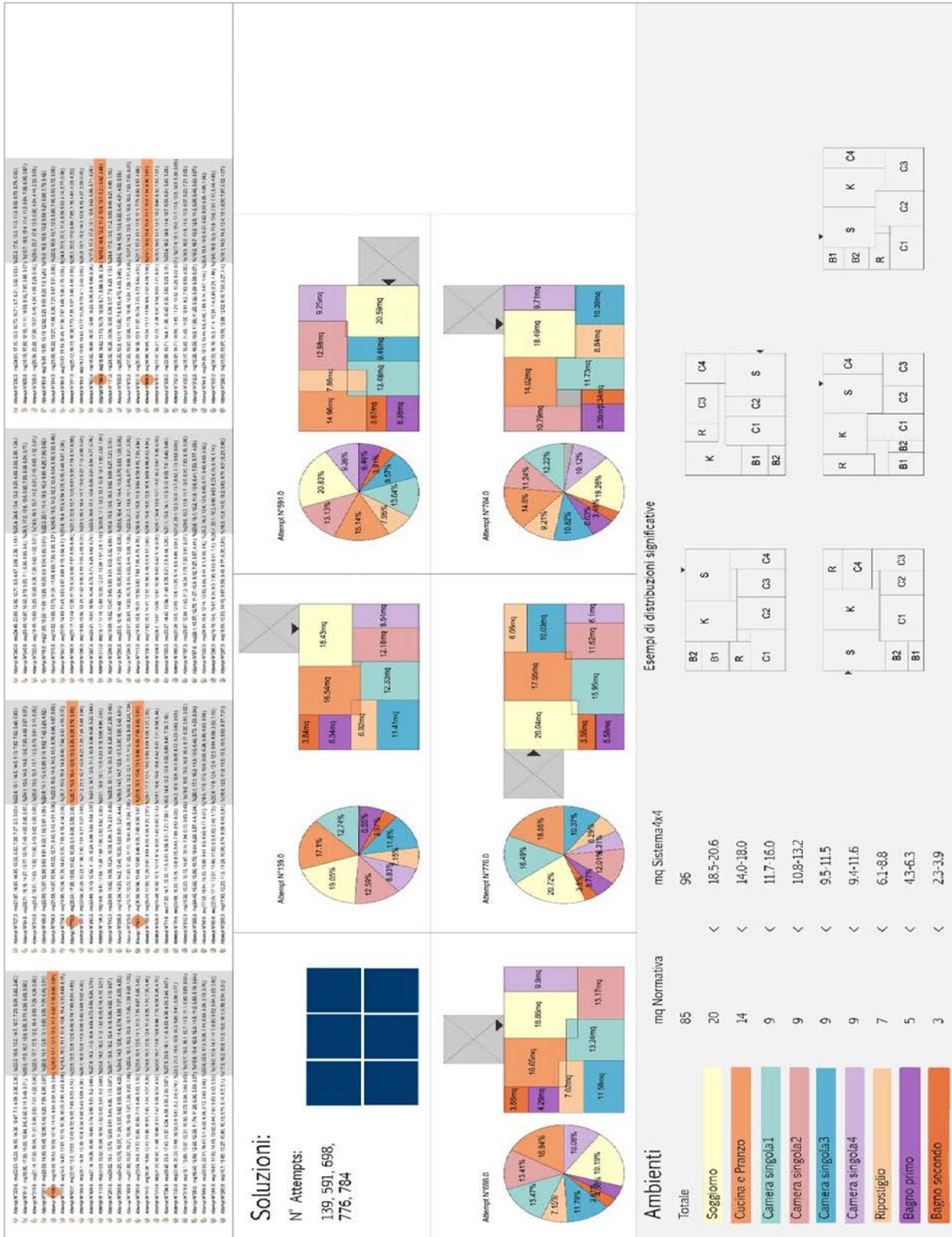


Figura A-33 - Plurilocale AAAA - 6 moduli - soluzione 1

A.2.7 PLURILOCALE AABBB - 4 SOLUZIONI

- Soluzione 1: 7 blocchi - 112 mq

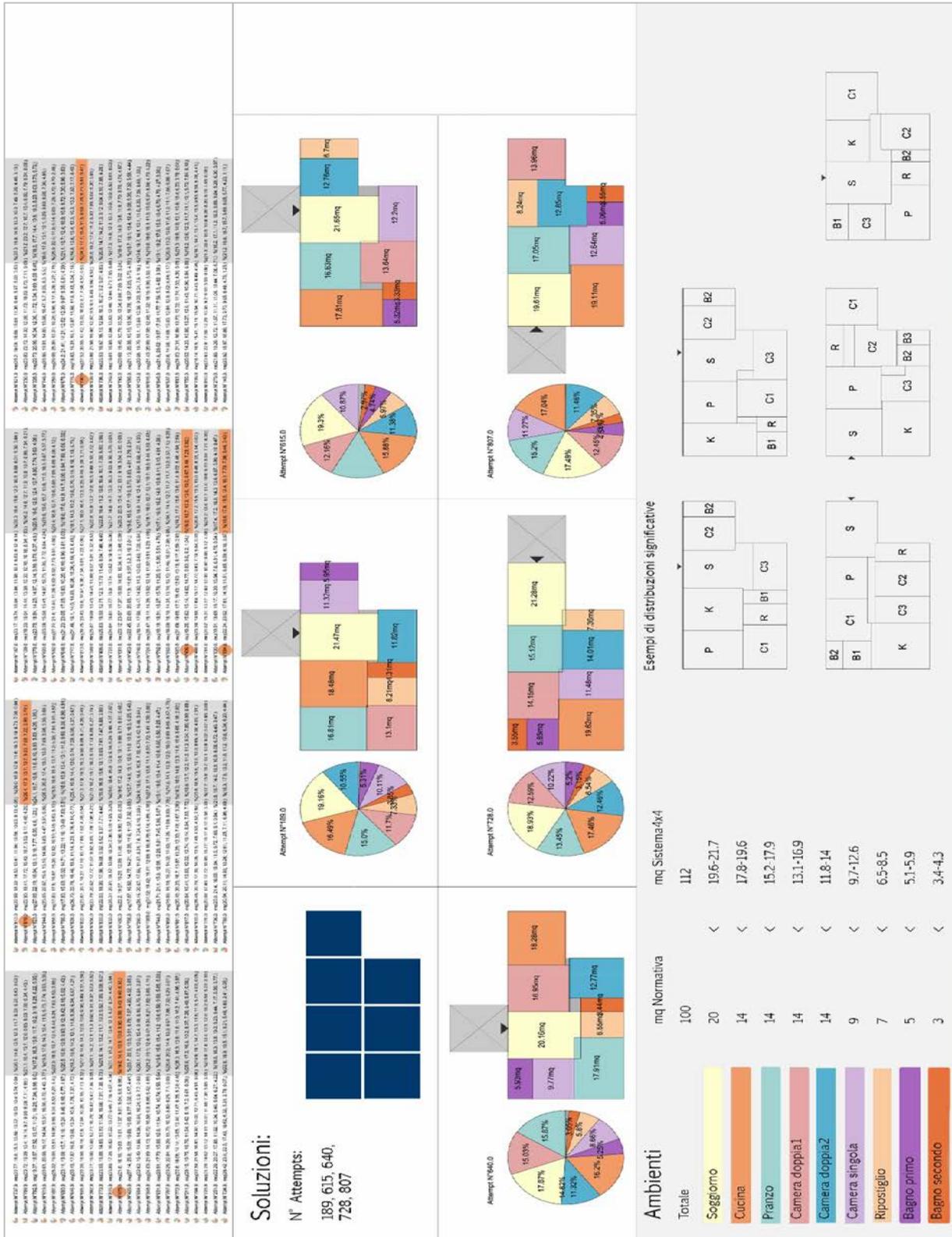


Figura A-34 - Plurilocale AABbb - 7 moduli - soluzione 1

- Soluzione 2: 7 blocchi - 112 mq

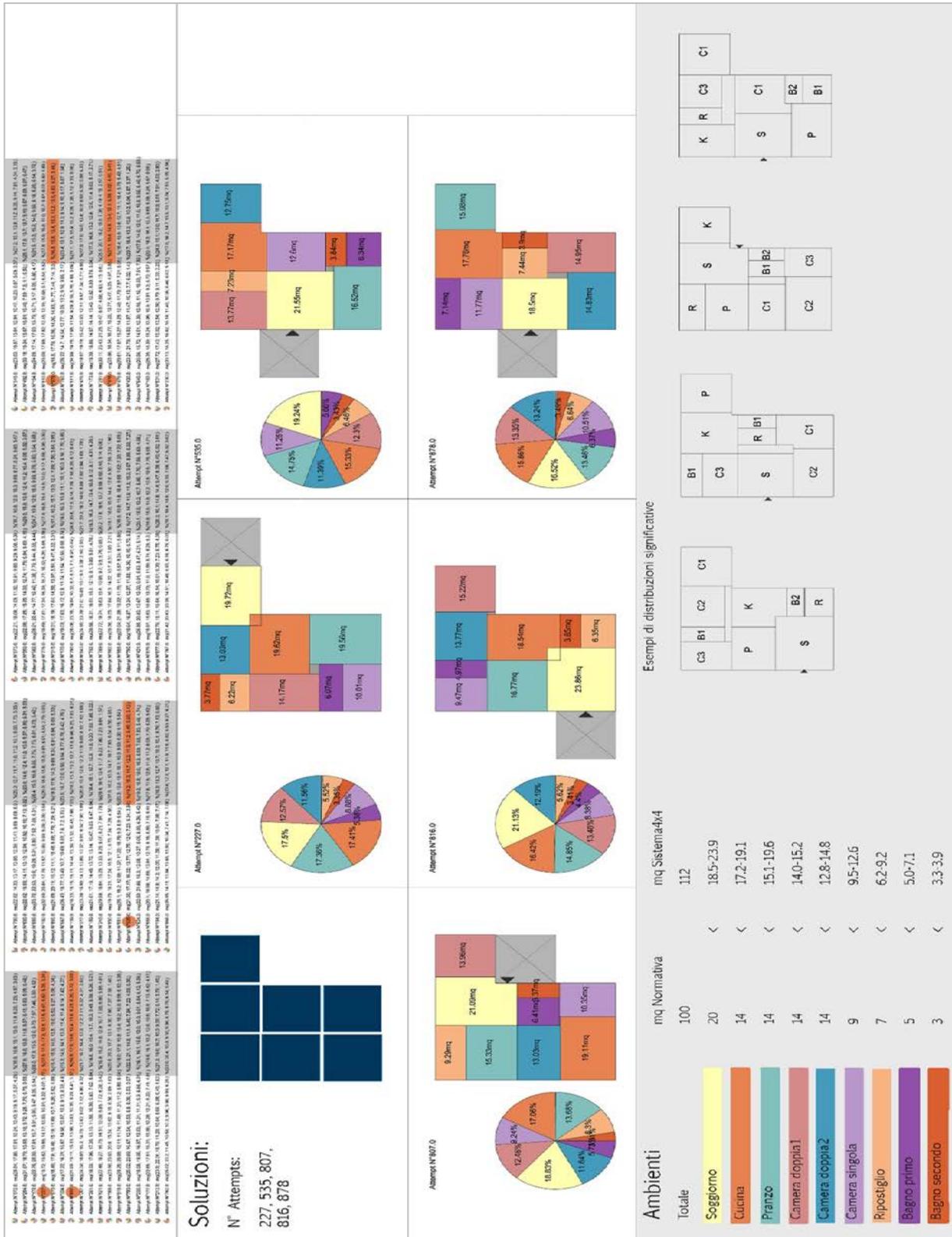


Figura A-35 - Plurilocale AAbbb - 7 moduli - soluzione 2





## B.TEST DI LABORATORIO

### B.1 PRIMA FASE DI SPERIMENTAZIONE

#### B.1.1 SCHEDA PROVINO I.1

Il provino I.1 presenta la seguente configurazione: due pannelli di multistrato in legno accoppiati al grigliato senza discontinuità in nessuno dei tre strati. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con l'adesivo a base di acqua IPN con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro in modo da garantire l'aggrappaggio del collante.

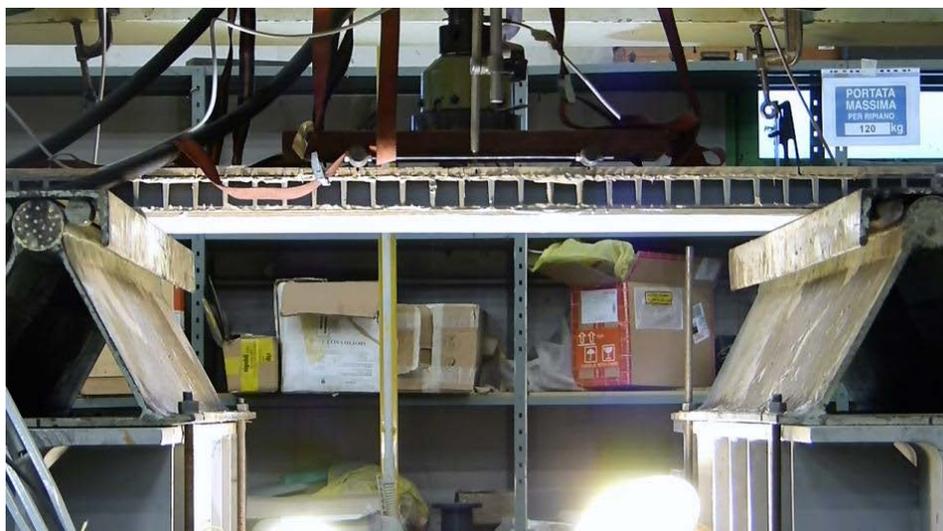


Figura B-1 Installazione del provino I.1 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova monotona. Il campione è stato quindi caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 43,07 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{43,07}{2} = 21,53 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il grigliato, con caratteristiche più performanti del legno, avrebbe raggiunto la rottura a carichi nettamente superiori.



*Figura B-2 Rottura del provino I.1*

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

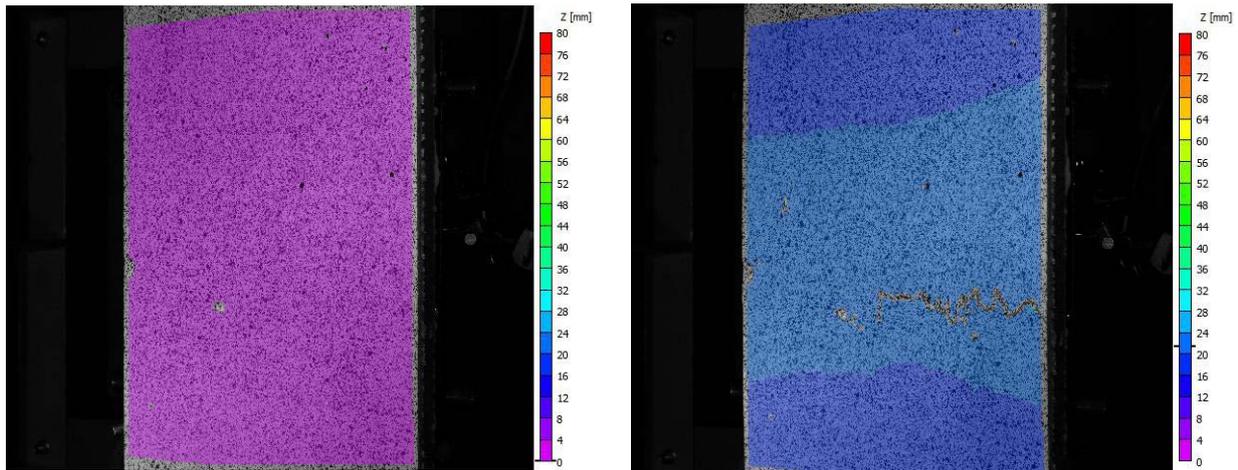


Figura B-3 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-4 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico-spostamento per compararne l'abbassamento nel corso della prova. Tale confronto è risultato estremamente utile in termini di definizione del comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all'applicazione del carico di rottura.

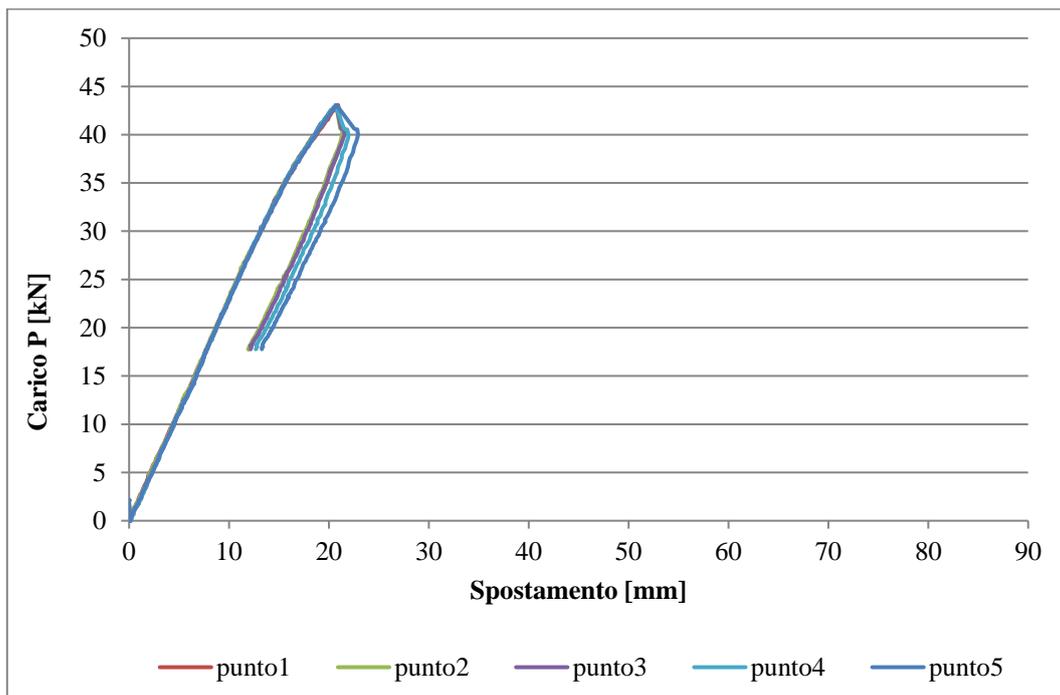


Figura B-5 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

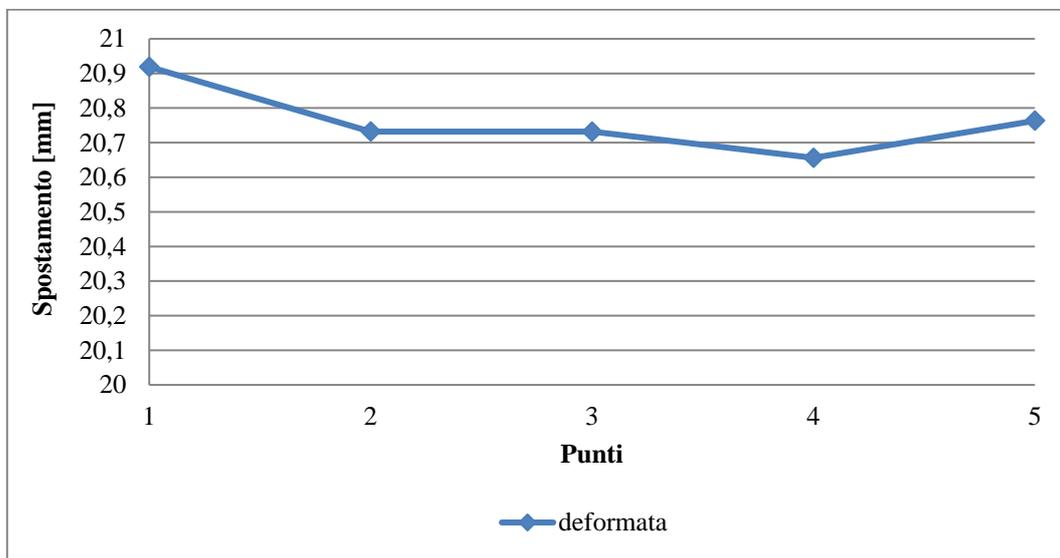


Figura B-6 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di mezzo millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette quindi di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino, risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

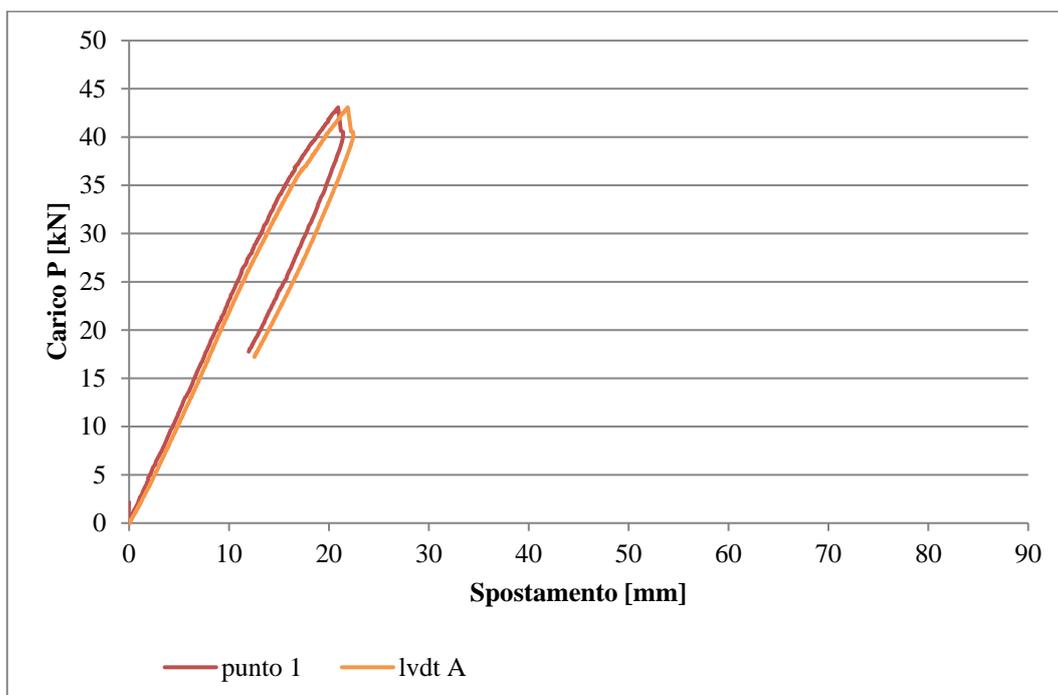


Figura B-7 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

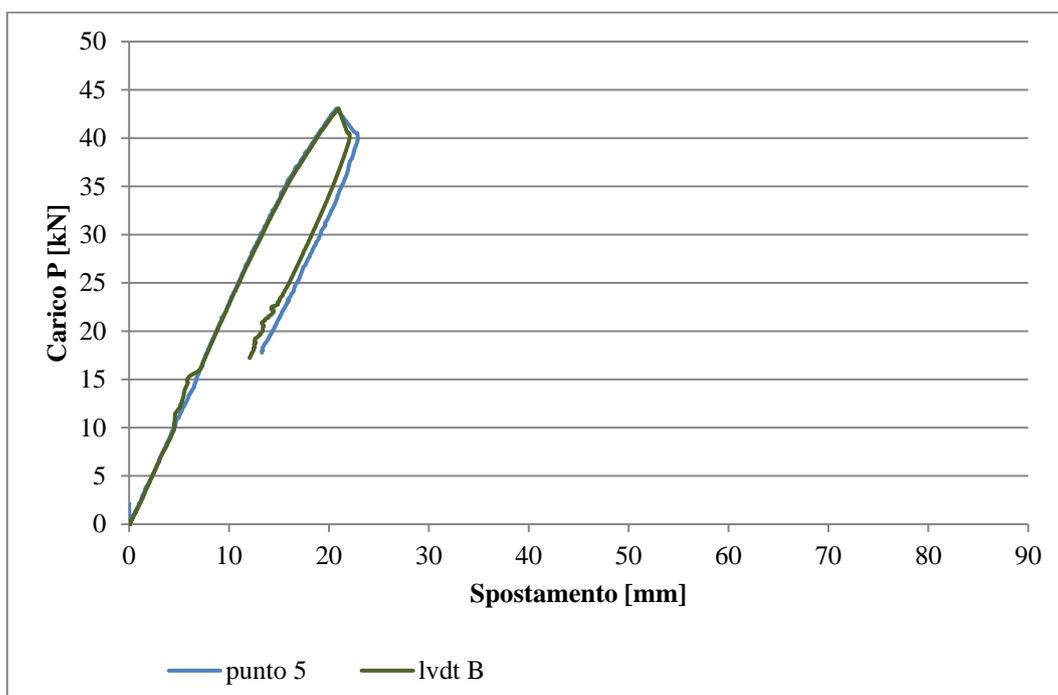


Figura B-8 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

Dai due grafici riportati si nota che nel primo caso potrebbe esserci un piccolo scollamento tra le superfici, situazione non presente invece nel secondo caso dove le due curve risultano essere perfettamente coincidenti almeno fino a rottura.

### B.1.2 SCHEDE PROVINO I.2

Il provino I.2 presenta la seguente configurazione: due pannelli di multistrato in legno accoppiati al grigliato senza discontinuità in nessuno dei tre strati. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con la resina epossidica RC02 con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro, in questo caso la rete è stata aggiunta per rendere confrontabili i due tipi di incollaggio anche se con la resina non è fondamentale in quanto l'aggrappaggio è garantito dal primer.



Figura B-9 Installazione del provino I.2 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzera.

Anche in questo caso si tratta di una prova monotona. Il campione è stato caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 39,22 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{39,22}{2} = 19,61 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno è stata considerata coincidente con la crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il grigliato, avendo caratteristiche più performanti del legno, avrebbe raggiunto la rottura a carichi nettamente superiori.



Figura B-10 Rottura del provino I.2

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

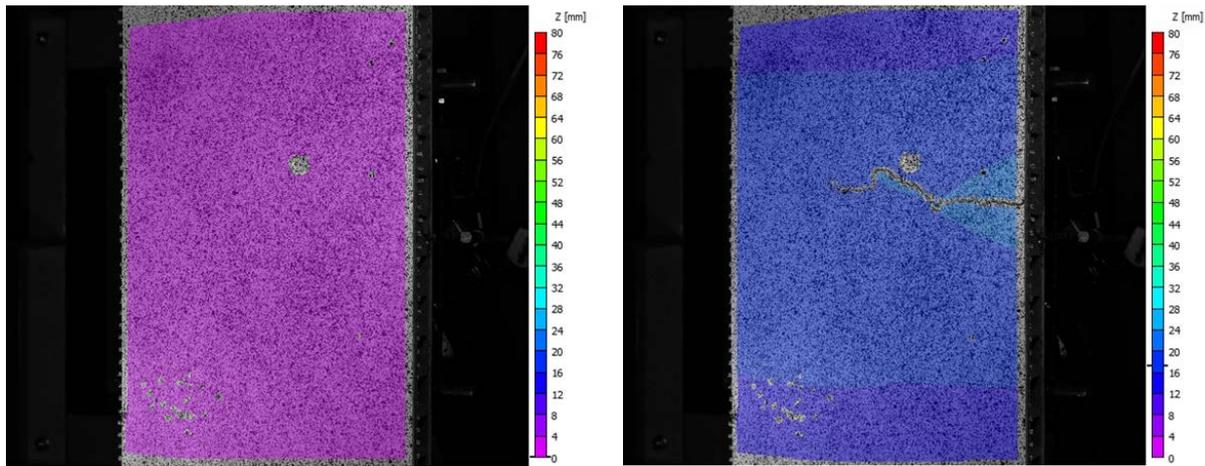


Figura B-11 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-12 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l'abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione.

Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all'applicazione del carico di rottura.

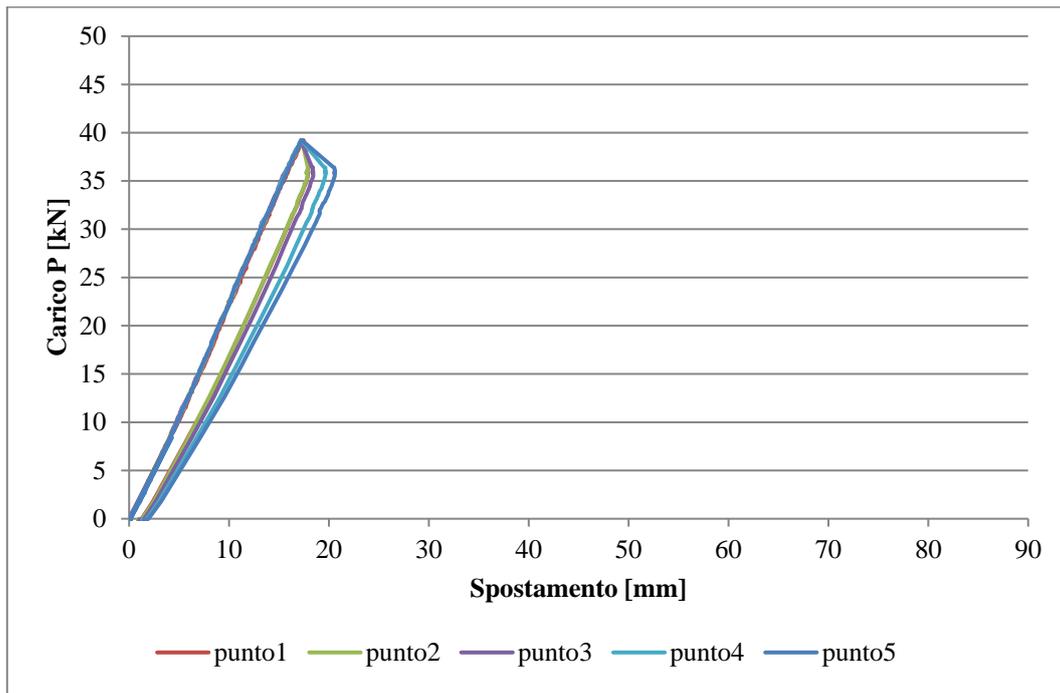


Figura B-13 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

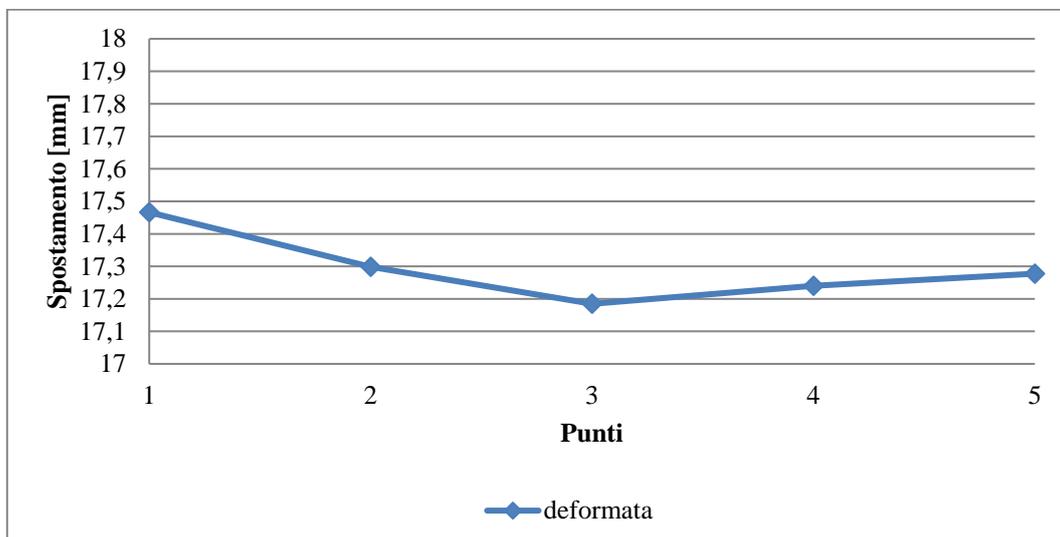


Figura B-14 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di mezzo millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette quindi di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

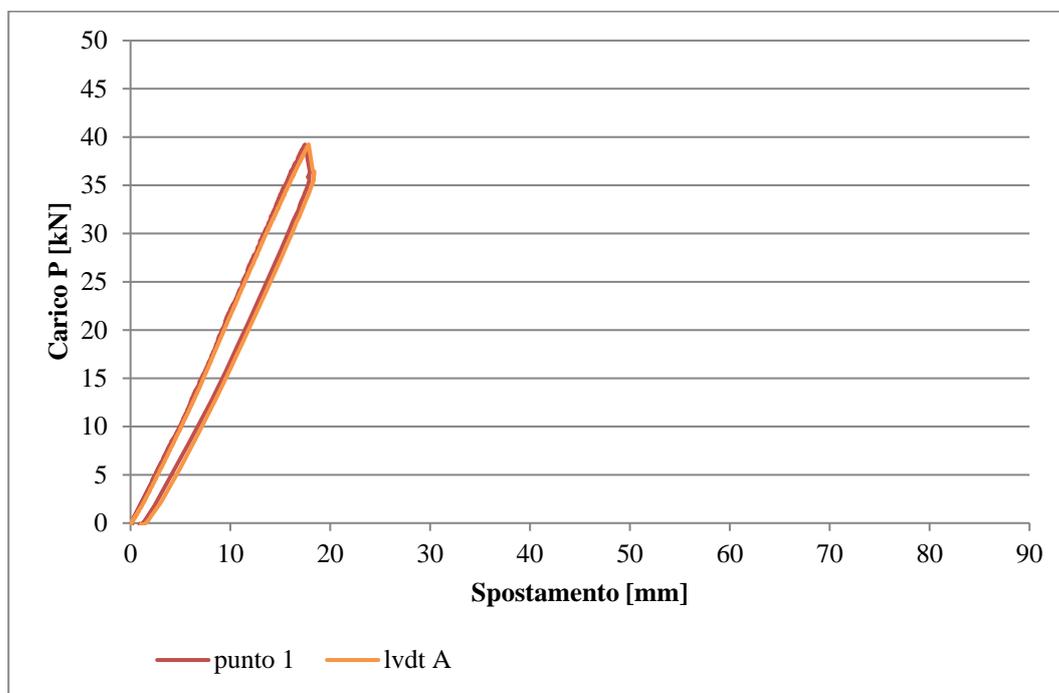


Figura B-15 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

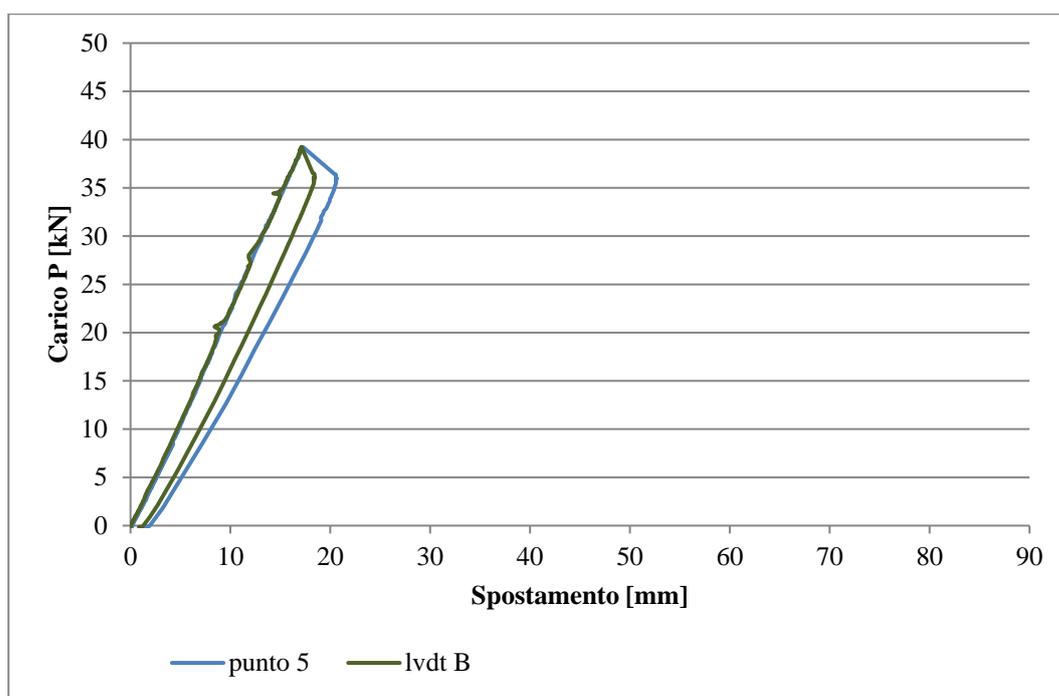


Figura B-16 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

Dai due grafici riportati si nota che le curve risultano essere perfettamente coincidenti almeno fino a rottura, garantendo così che non vi siano scollamenti tra le interfacce dei materiali.

### B.1.3 SCHEDE PROVINO I.3

Il provino 3 presenta la seguente configurazione: grigliato singolo, privo di accoppiamento con pannelli di legno sia all'intradosso che all'estradosso.



Figura B-17 Installazione del provino I.3 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

Anche in questo caso si tratta di una prova monotona. Il campione è stato caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. In particolare, si è assistito alla rottura del grigliato quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 48,89 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{48,89}{2} = 24,45 \text{ kN}$$

A tale carico puntuale coincide la rottura del grigliato e in particolare della chiusura inferiore dello stesso.



Figura B-18 Rottura del provino I.3

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

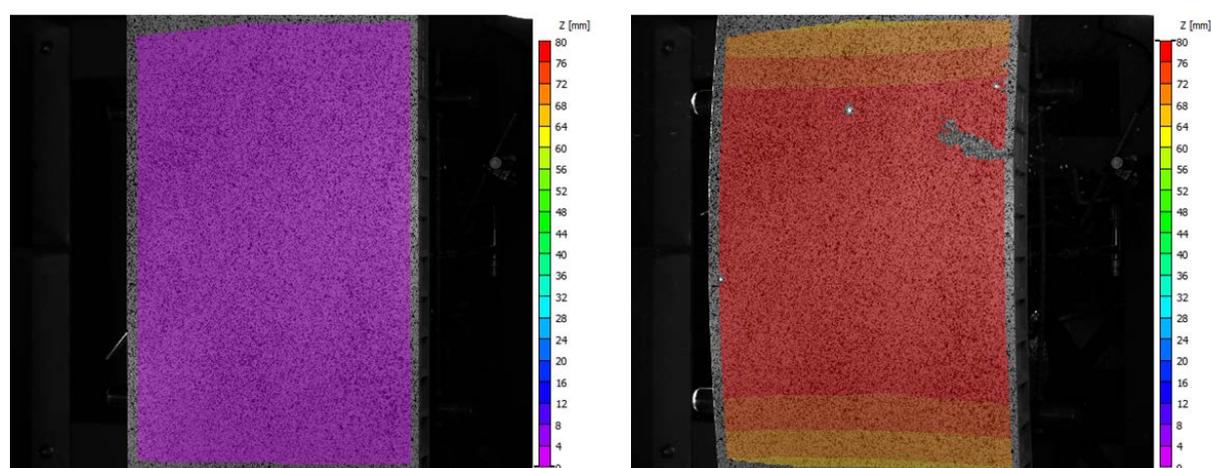


Figura B-19 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema.



Figura B-20 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico-spostamento in modo da compararne l'abbassamento nel corso della prova. Tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all'applicazione del carico di rottura.

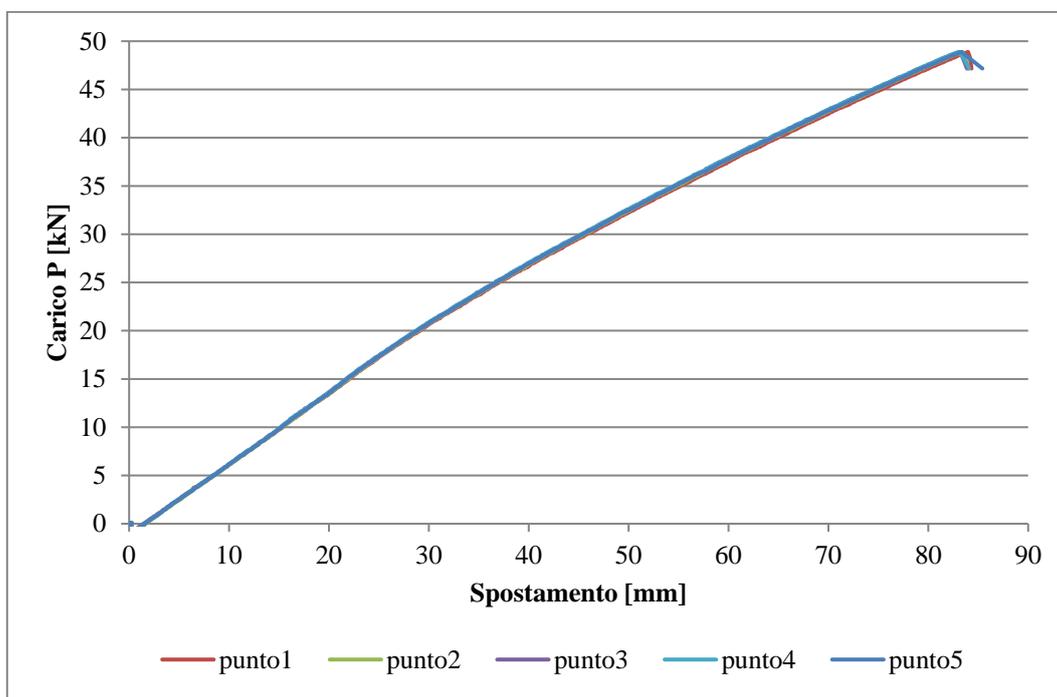


Figura B-21 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

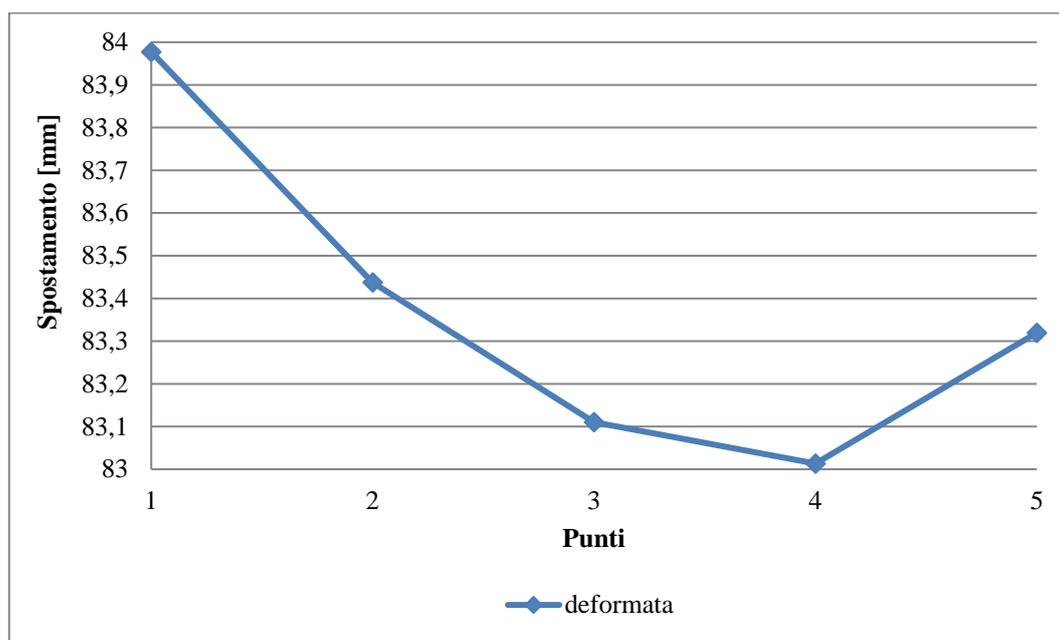


Figura B-22 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale e si mantiene nell'ordine di un millimetro di differenza, anche se rispetto alle prove precedenti risulta essere meno uniforme.

Questo risultato ci permette di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

In questo caso il confronto tra i due metodi di acquisizione dati non è stato necessario in quanto, essendo una prova a flessione sul singolo grigliato, non vi era pericolo di scollamenti e disomogeneità tra il comportamento dell'estradosso e dell'intradosso.

#### B.1.4 SCHEDE PROVINO I.4

Il provino I.4 presenta la medesima configurazione del provino I.1: due pannelli di multistrato in legno accoppiati al grigliato senza discontinuità in nessuno dei tre strati. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con l'adesivo ad acqua IPN con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro in modo da garantire l'aggrappaggio del collante.



Figura B-23 Installazione del provino I.4 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 15 kN, 30 kN, 40 kN. Superato l'ultimo il campione è stato caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 44,13 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{44,13}{2} = 22,06 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il grigliato, con caratteristiche più performanti del legno, avrebbe raggiunto la rottura a carichi nettamente superiori.

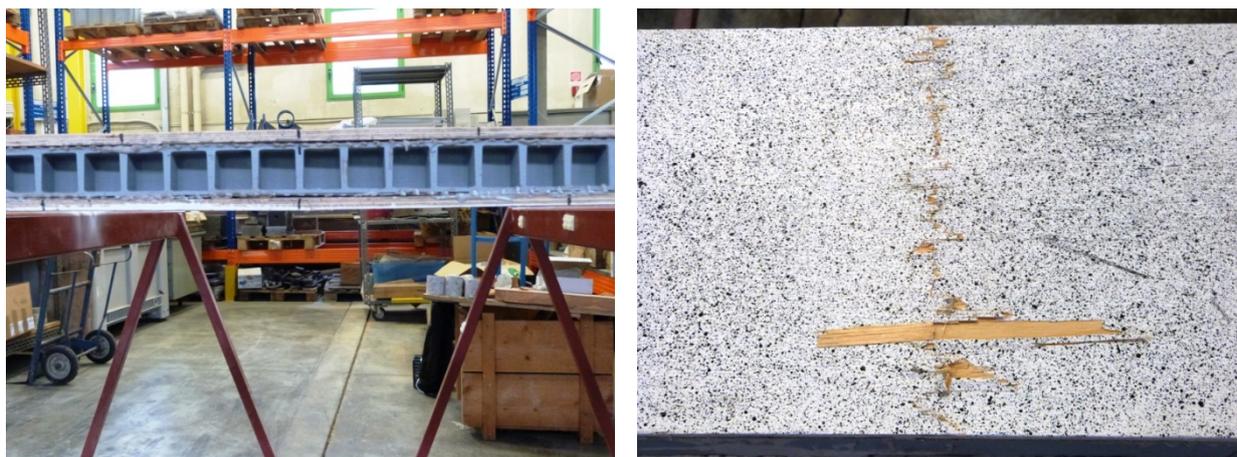


Figura B-24 Rottura del provino I.4

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

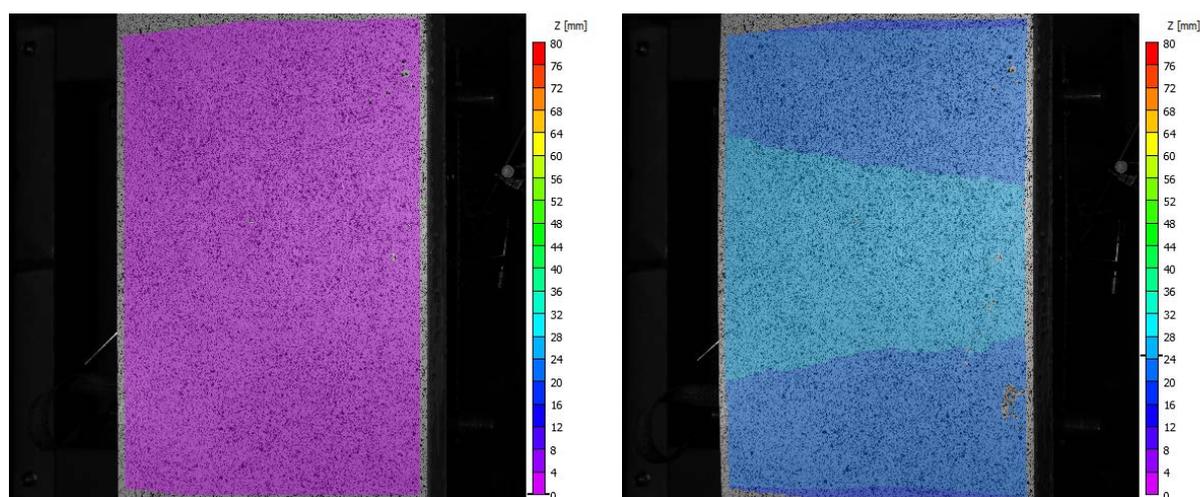


Figura B-25 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-26 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico-spostamento in modo da compararne l’abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all’applicazione del carico di rottura.

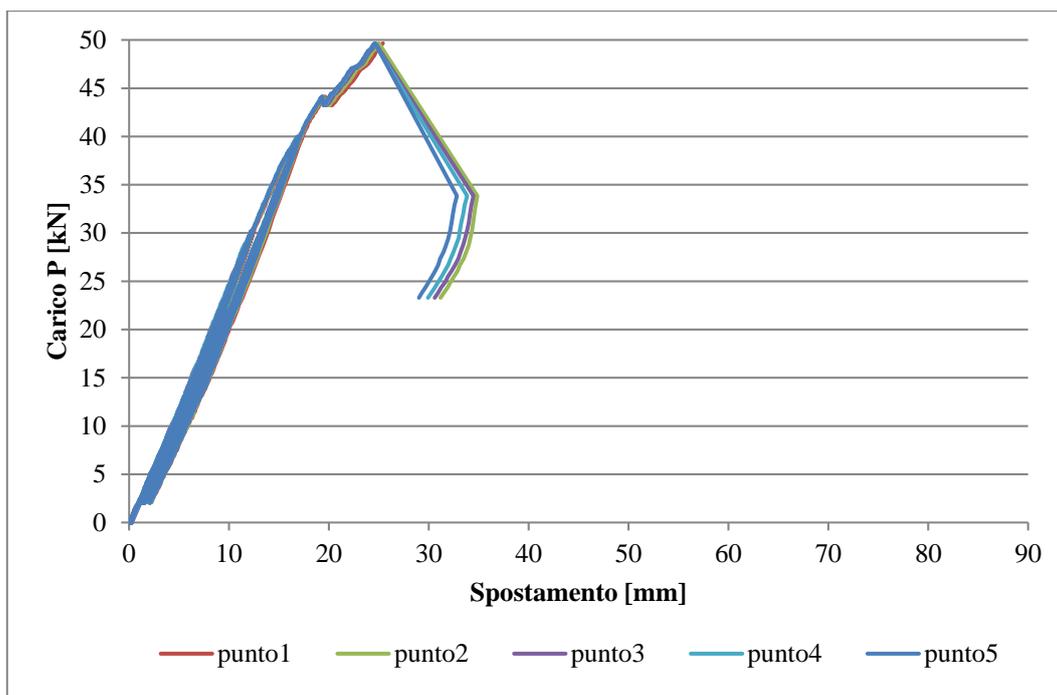


Figura B-27 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

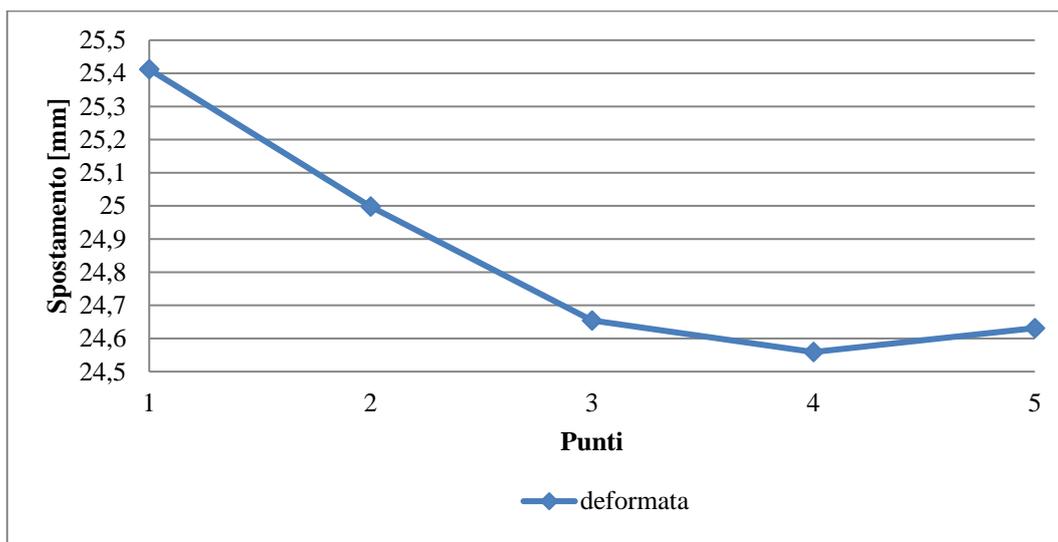


Figura B-28 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di un millimetro di differenza. Si può notare come le deformazioni lungo la mezzeria risultino maggiormente disomogenee rispetto alla prova monotona, questo può essere ricondotto alle diverse fasi di carico e scarico.

Questo risultato ci permette comunque di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

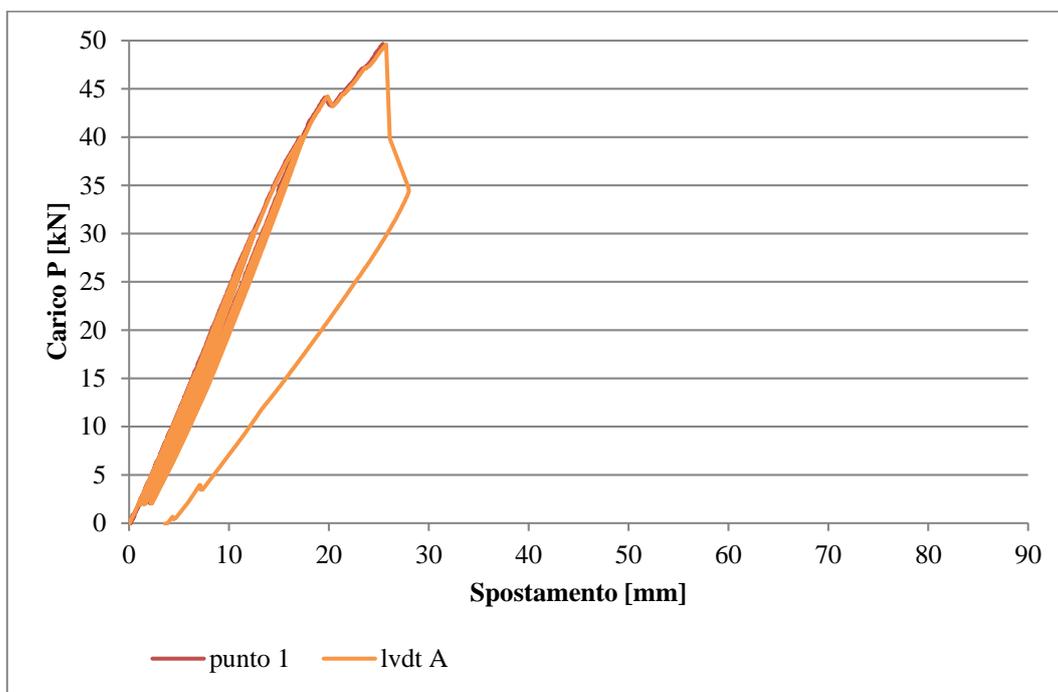


Figura B-29 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

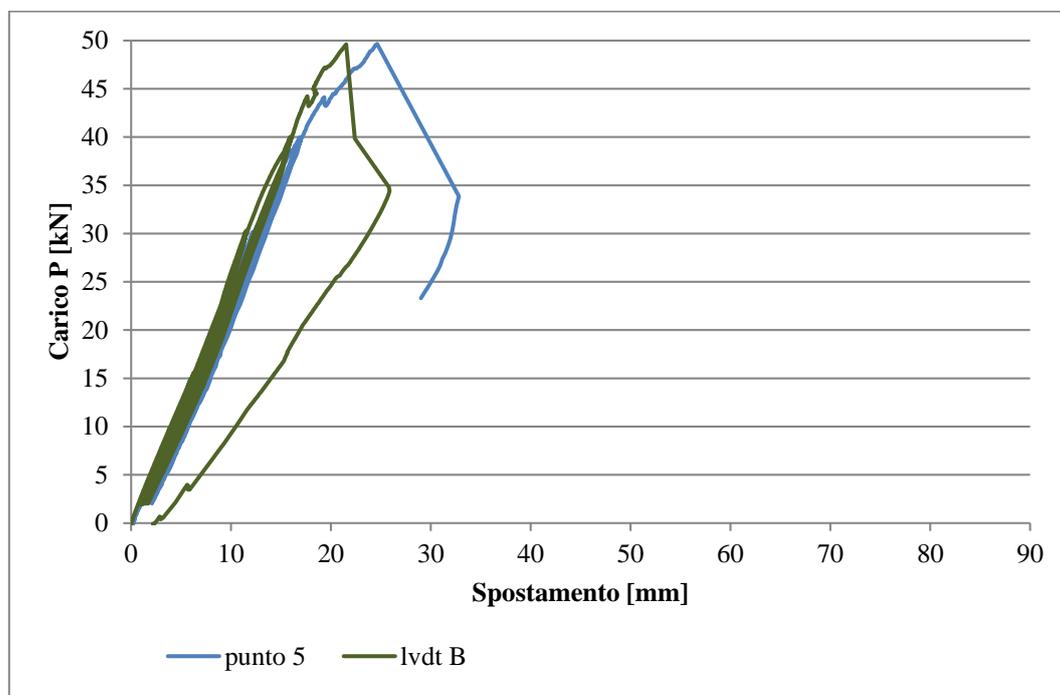


Figura B-30 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

Dai due grafici riportati si nota che nel primo caso non dovrebbe esserci scollamento tra le superfici in quanto le curve risultano essere perfettamente coincidenti almeno fino a rottura. Invece, nel secondo caso, si può ipotizzare uno scollamento dell'interfaccia in quanto a partire da un carico che si aggira attorno ai 30 kN le due curve non sono più sovrapposte.

### B.1.5 SCHEDE PROVINO I.5

Il provino I.5 presenta la medesima configurazione del provino I.2: due pannelli di multistrato in legno accoppiati al grigliato senza discontinuità in nessuno dei tre strati. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con la resina epossidica RC02 con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro, in questo caso la rete è stata aggiunta per rendere confrontabili i due tipi di incollaggio anche se con la resina non è fondamentale in quanto l'aggrappaggio è garantito dal primer.



Figura B-31 Installazione del provino I.5 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 15 kN, 30 kN, 40 kN. Superato l'ultimo il campione è stato caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 47,17 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{47,17}{2} = 23,58 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il grigliato, con caratteristiche più performanti del legno, avrebbe raggiunto la rottura a carichi nettamente superiori.



Figura B-32 Rottura del provino I.4

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

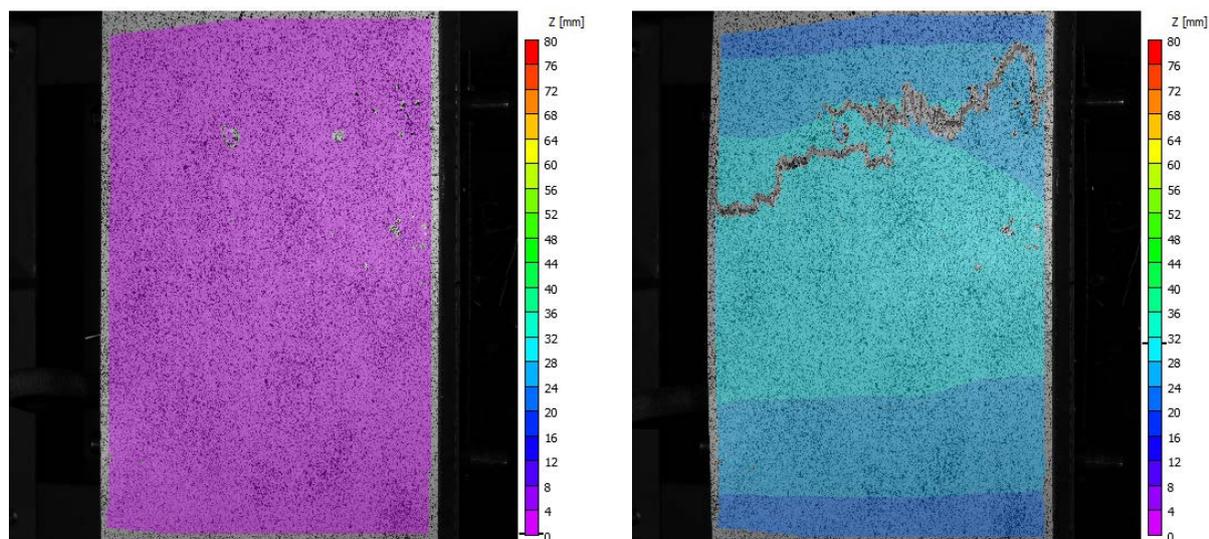


Figura B-33 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-34 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l'abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all'applicazione del carico di rottura.

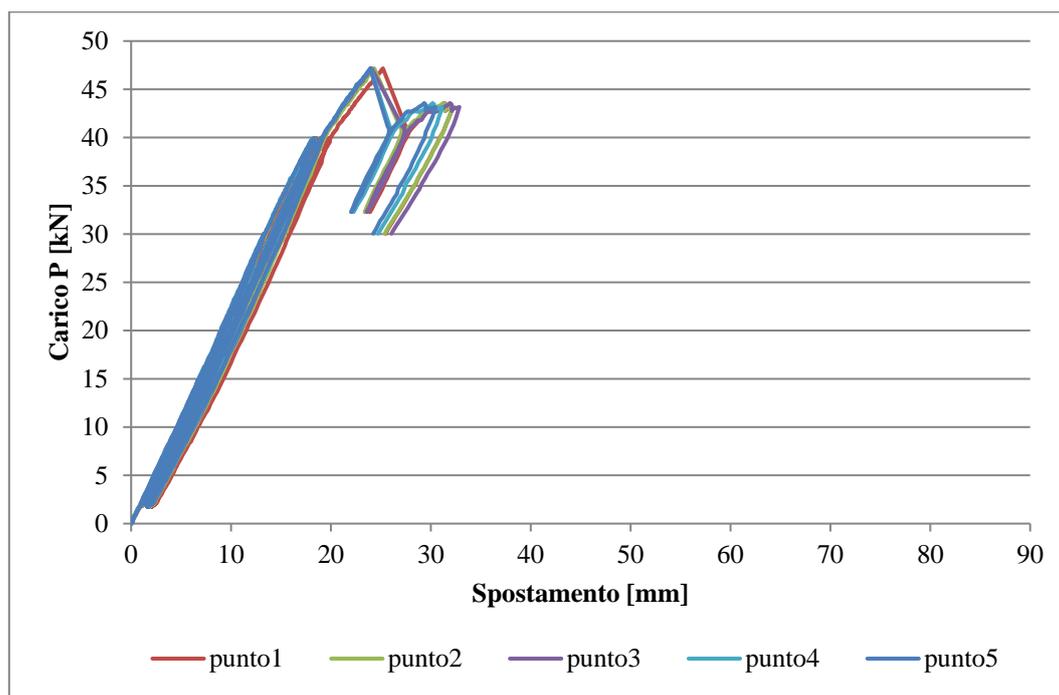


Figura B-35 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

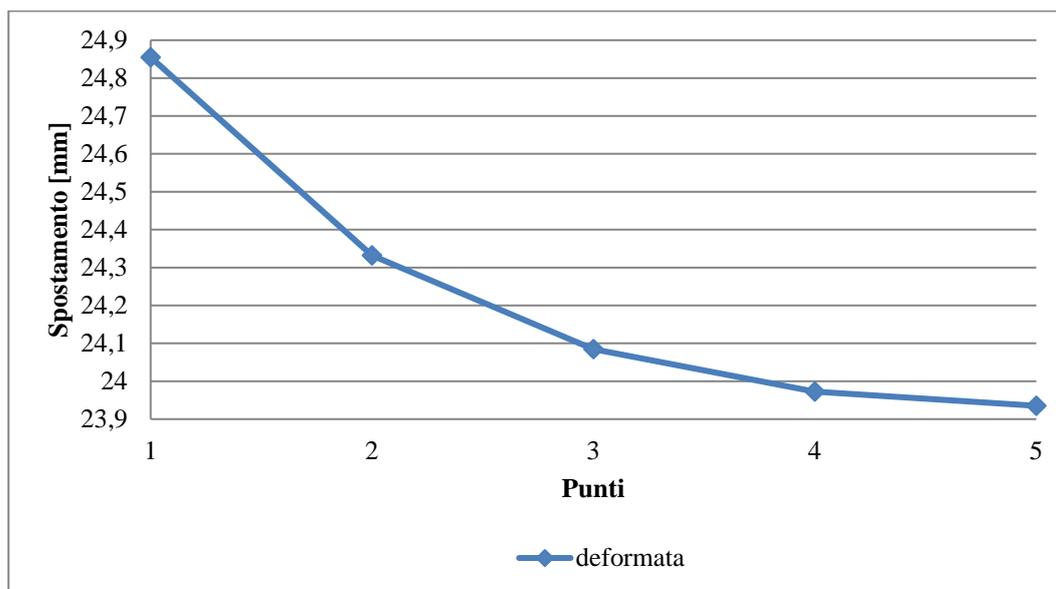


Figura B-36 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di un millimetro di differenza. Si può notare come le deformazioni lungo la mezzeria risultino maggiormente disomogenee rispetto alla prova monotona, questo può essere ricondotto alle diverse fasi di carico e scarico.

Questo risultato ci permette comunque di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

Dai due grafici riportati si nota che nel primo caso non dovrebbe esserci scollamento tra le superfici in quanto le curve risultano essere perfettamente coincidenti almeno fino a rottura. Invece, nel secondo caso, si può ipotizzare uno scollamento dell'interfaccia in quanto a partire da un carico che si aggira attorno ai 30 kN le due curve non sono più sovrapposte.

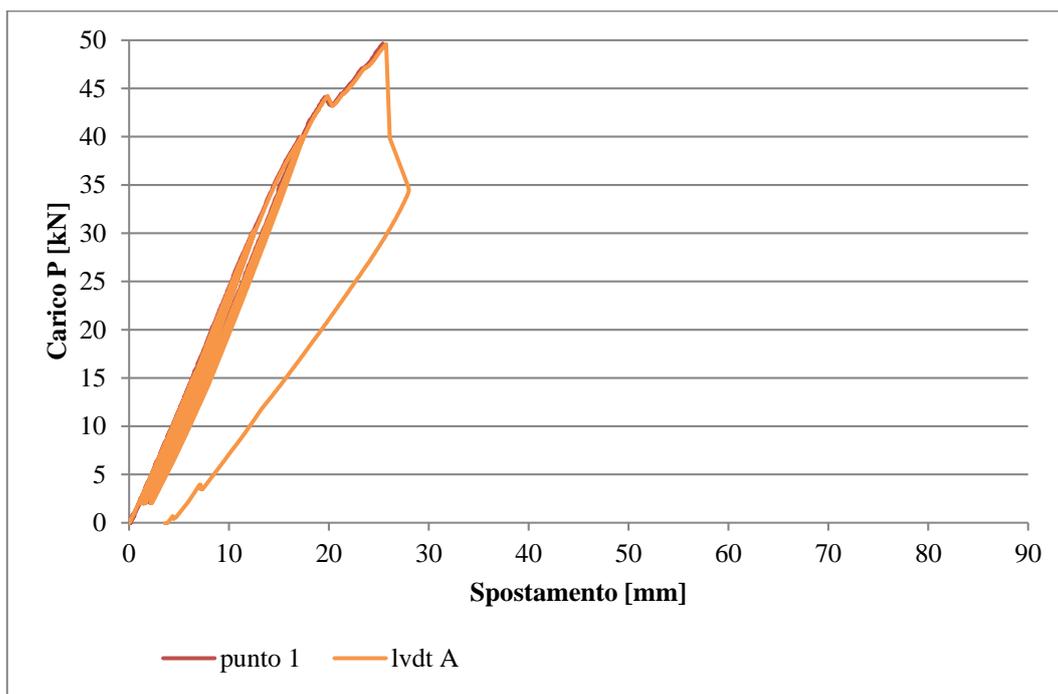


Figura B-37 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

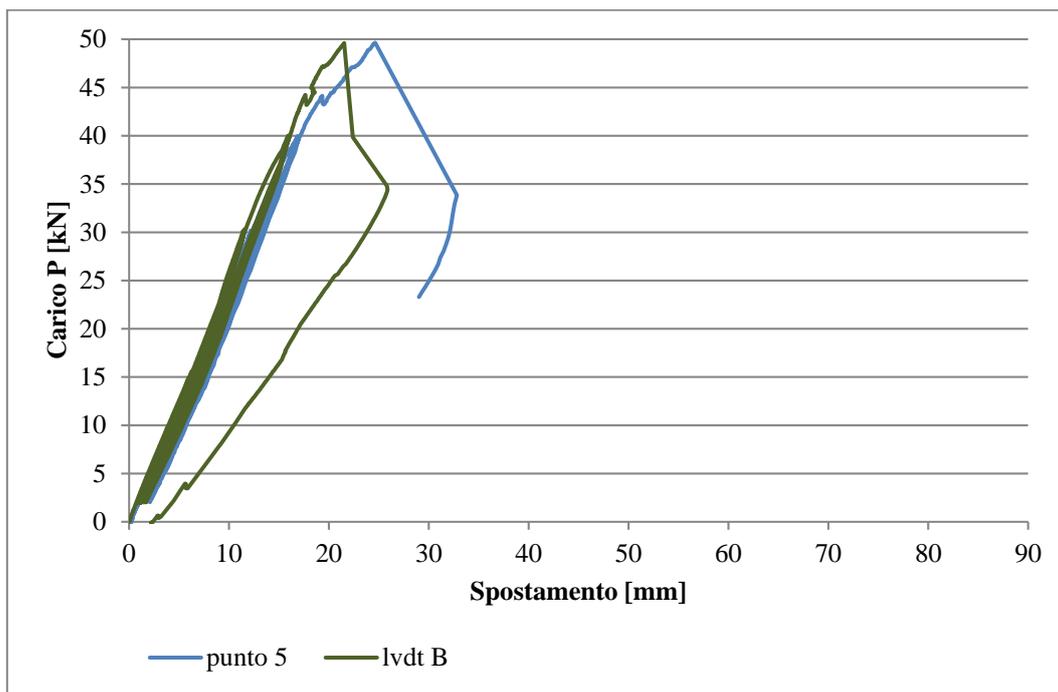


Figura B-38 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

### B.1.6 SCHEDE PROVINO I.6

Il provino I.6 presenta la medesima configurazione del provino I.3: grigliato singolo, privo di accoppiamento con pannelli di legno sia superiormente che inferiormente.



Figura B-39 Installazione del provino I.6 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzera.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 15 kN, 30 kN, 40 kN. Superato l'ultimo il campione è stato caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del grigliato quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 46,66 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{46,66}{2} = 23,33 \text{ kN}$$

A tale carico puntuale coincide la rottura del grigliato e in particolare della chiusura inferiore dello stesso.



Figura B-40 Rottura del provino I.6

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

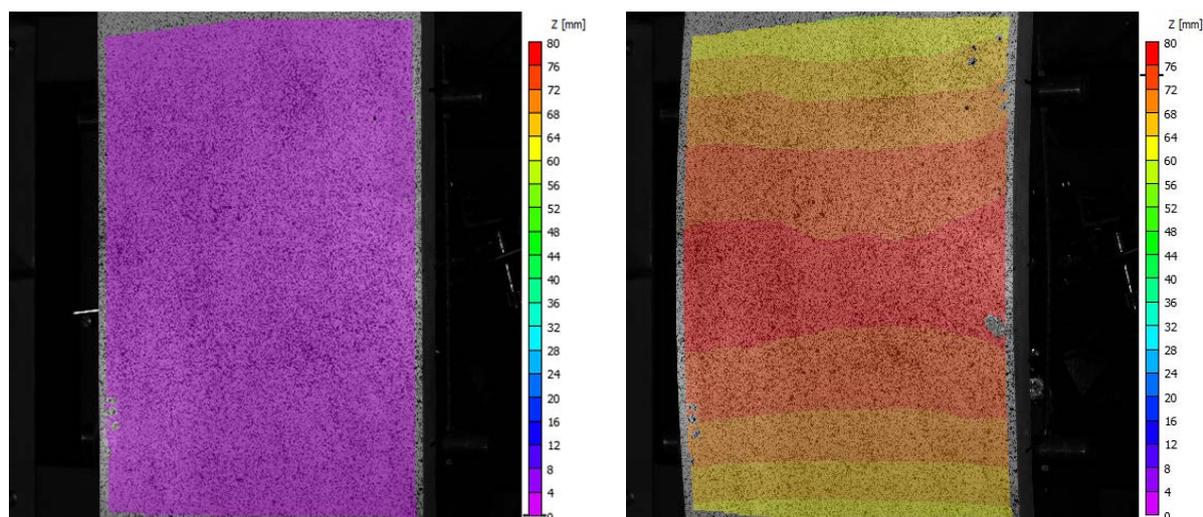


Figura B-41 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-42 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l'abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all'applicazione del carico di rottura.

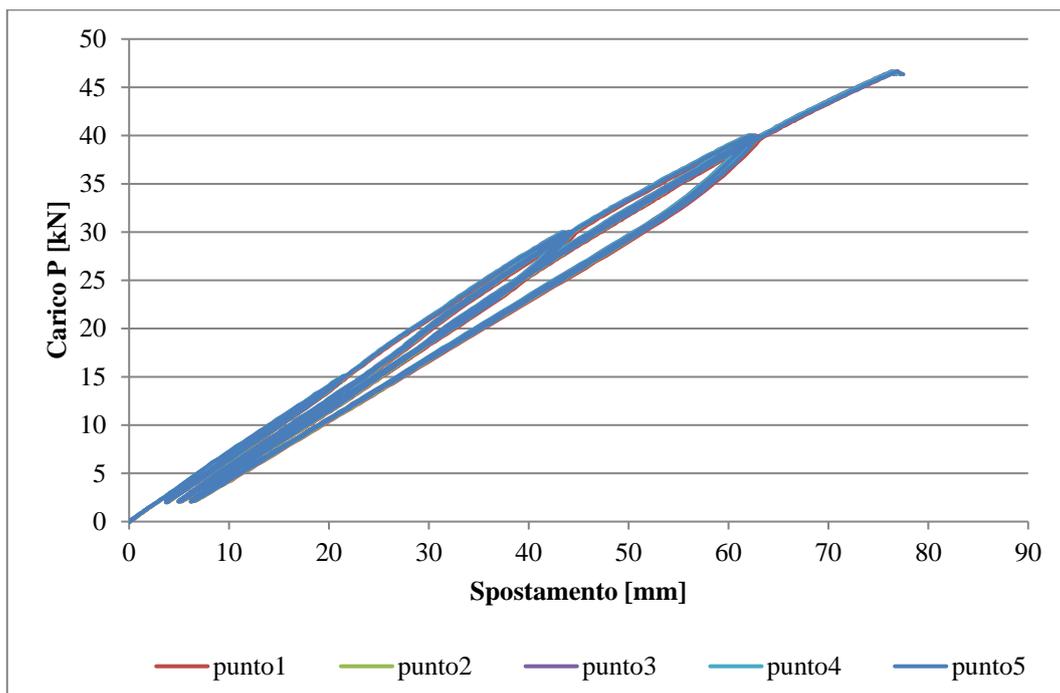


Figura B-43 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

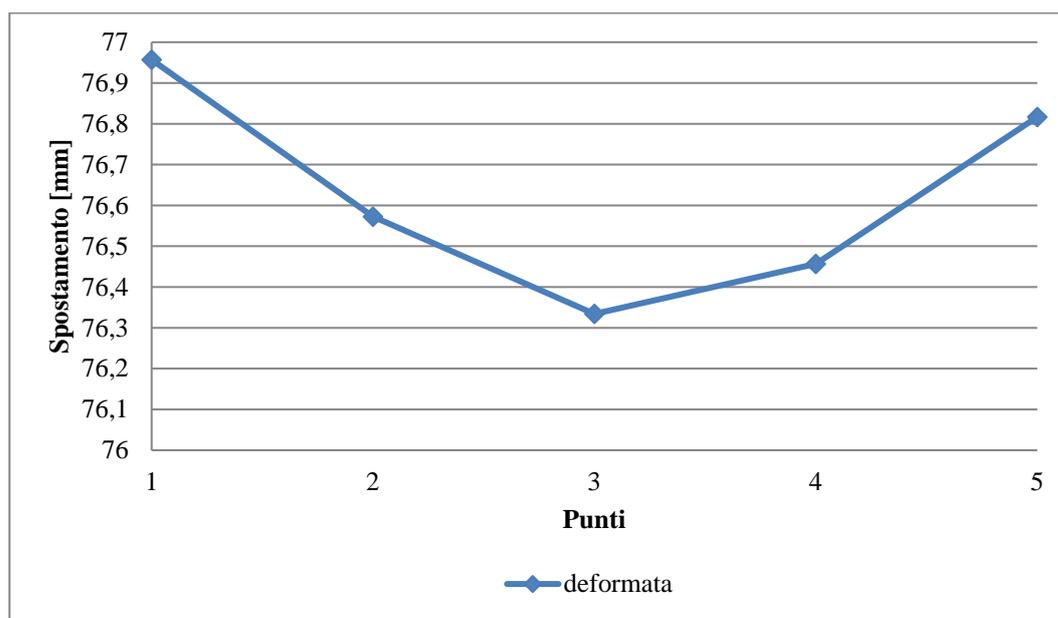


Figura B-44 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di un millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette comunque di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

In questo caso il confronto tra i due metodi di acquisizione dati non è stato necessario in quanto, essendo una prova a flessione sul singolo grigliato, non vi era pericolo di scollamenti e disomogeneità tra il comportamento dell'estradosso e dell'intradosso.

### B.1.7 SCHEDE PROVINO I.7

Il provino I.7 presenta la seguente configurazione: due pannelli di multistrato in legno accoppiati a due grigliati con giunto in corrispondenza della mezzeria del provino. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con l'adesivo ad acqua IPN con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro in modo da garantire l'aggrappaggio del collante.

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

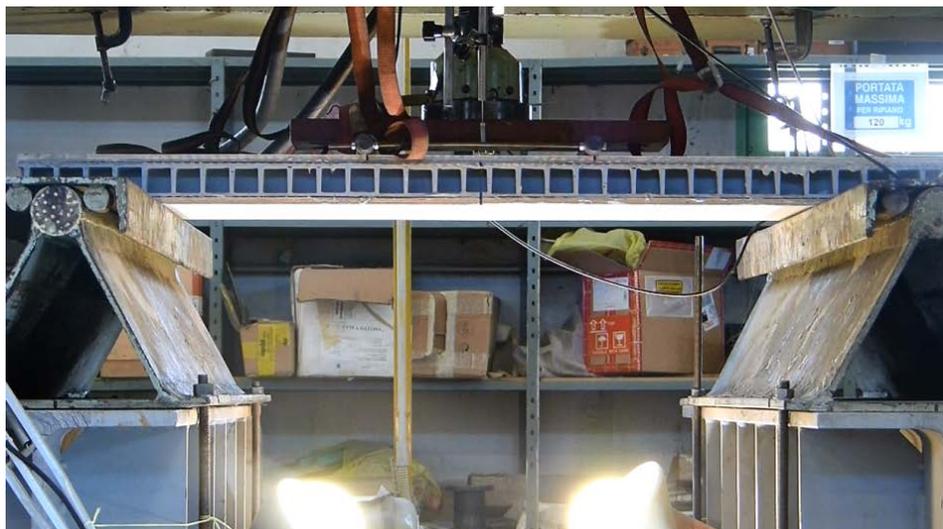


Figura B-45 Installazione del provino I.7 sul banco prova

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 15 kN, 30 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione dell'ultimo ciclo di carico che prevedeva il raggiungimento dei 40 kN. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 36,11 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{36,11}{2} = 18,05 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il grigliato, con caratteristiche più performanti del legno, avrebbe raggiunto la rottura a carichi nettamente superiori.



Figura B-46 Rottura del provino I.7

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

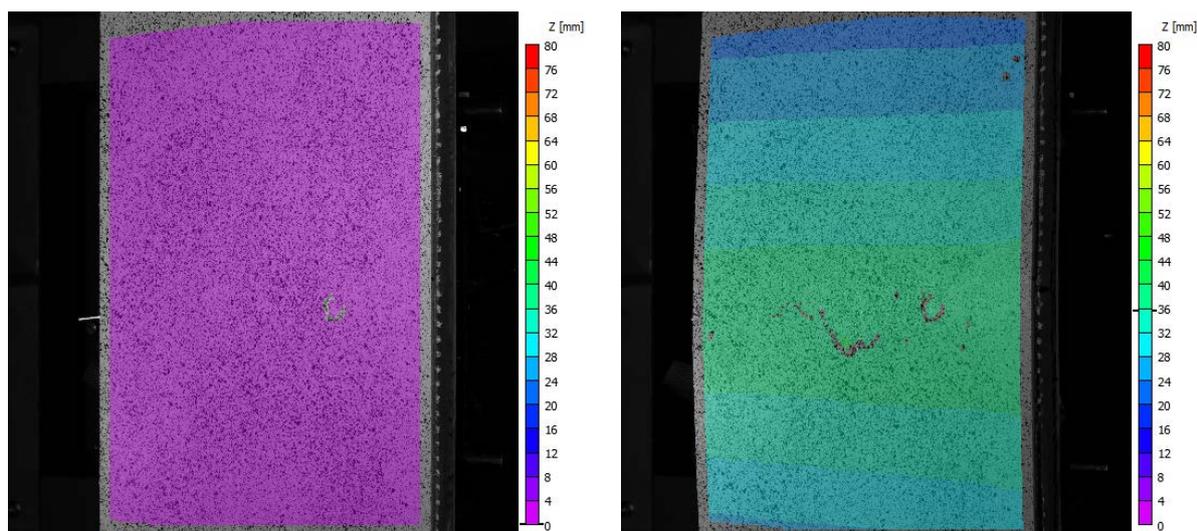


Figura B-47 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-48 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l’abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all’applicazione del carico di rottura.

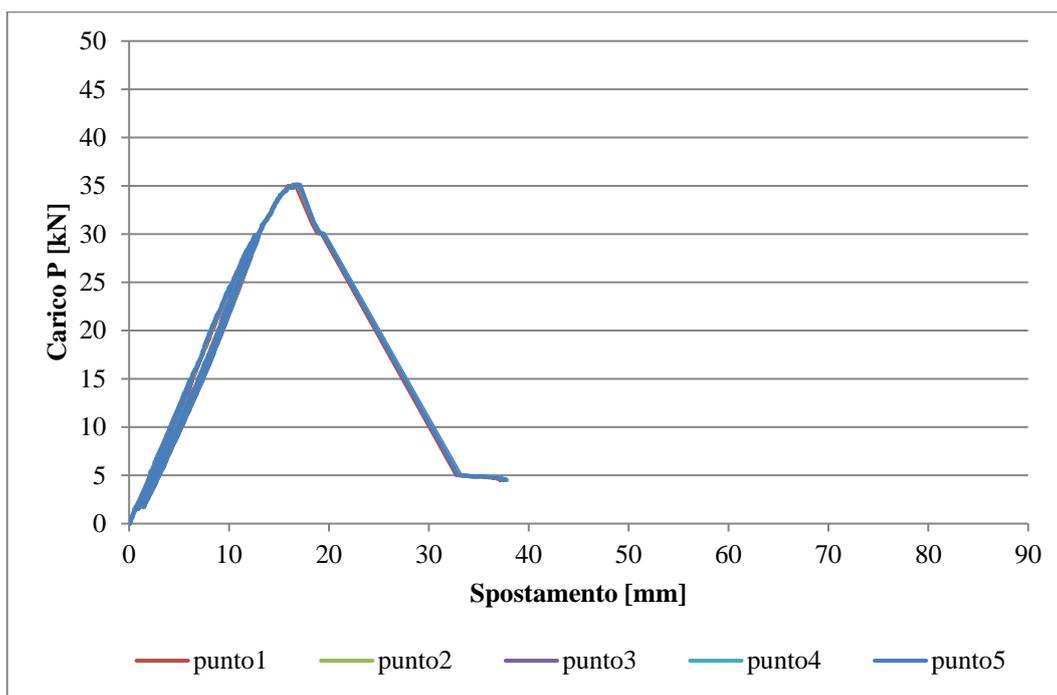


Figura B-49 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

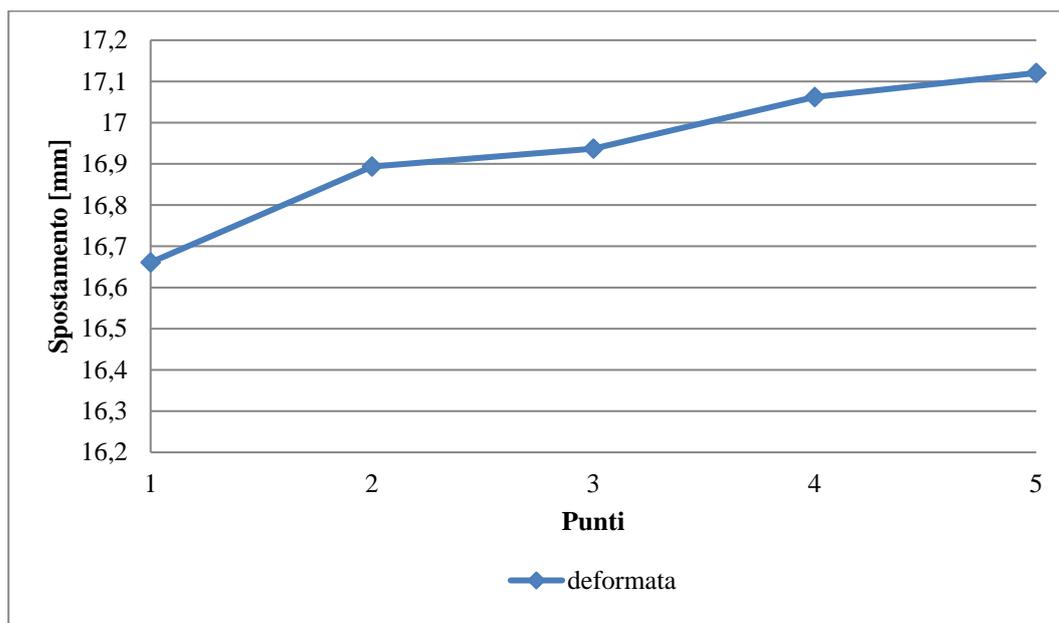


Figura B-50 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di mezzo millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

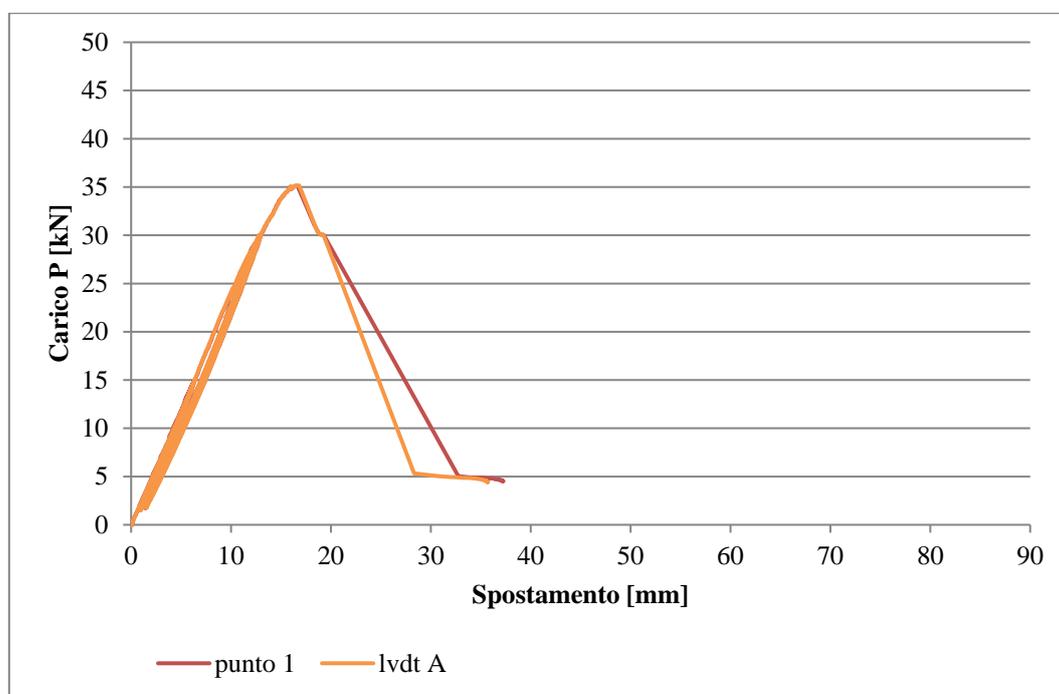


Figura B-51 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

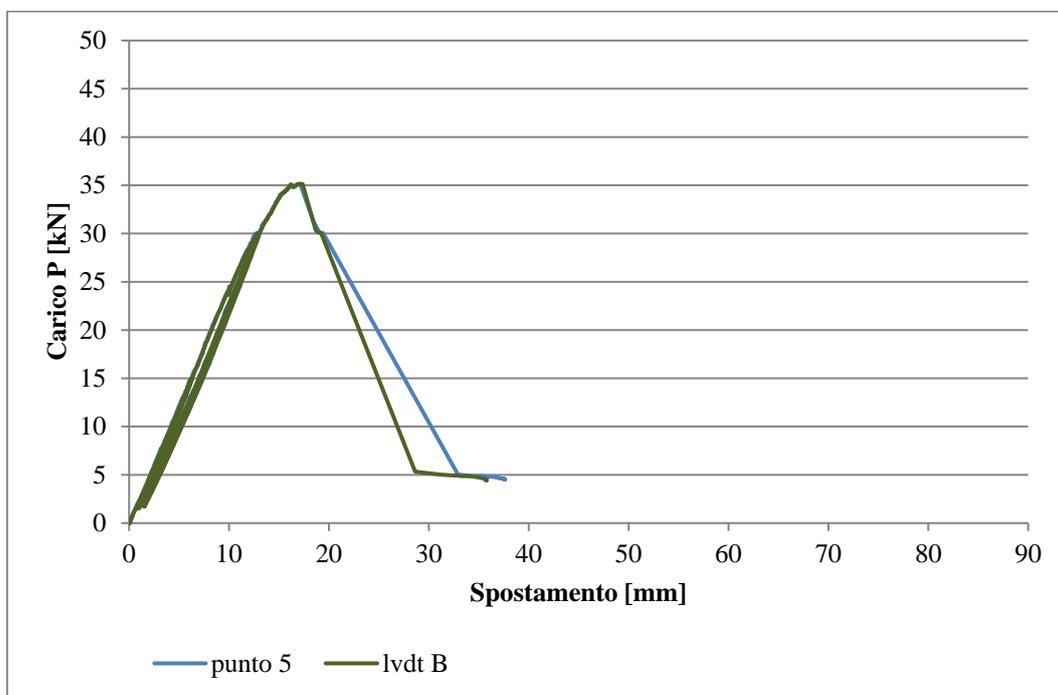


Figura B-52 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

Dai due grafici riportati si nota in entrambi i casi non dovrebbero esserci scollamenti tra le superfici in quanto le curve risultano essere perfettamente coincidenti almeno fino a rottura.

### B.1.8 SCHEDE PROVINO I.8

Il provino I.8 presenta la seguente configurazione: due pannelli di multistrato in legno accoppiati a due grigliati con giunto in corrispondenza della mezzeria del provino. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con la resina epossidica RC02 con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro, in questo caso la rete è stata aggiunta per rendere confrontabili i due tipi di incollaggio anche se con la resina non è fondamentale in quanto l'aggrappaggio è garantito dal primer.



Figura B-53 Installazione del provino I.8 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 15 kN, 30 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione dell'ultimo ciclo di carico che prevedeva il raggiungimento dei 40 kN. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 36,59 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{36,59}{2} = 18,29 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il grigliato, con caratteristiche più performanti del legno, avrebbe raggiunto la rottura a carichi nettamente superiori.

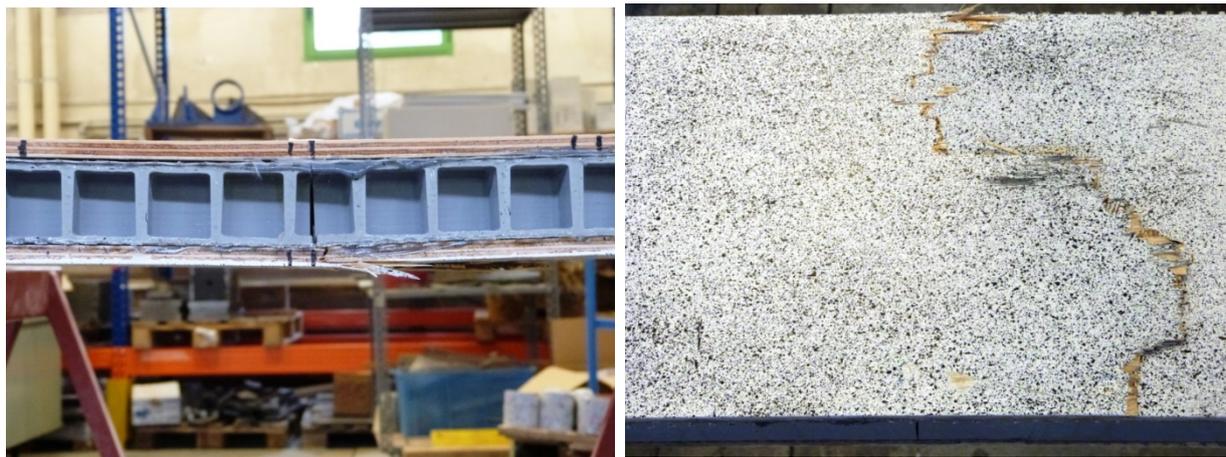


Figura B-54 Rottura del provino I.8

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

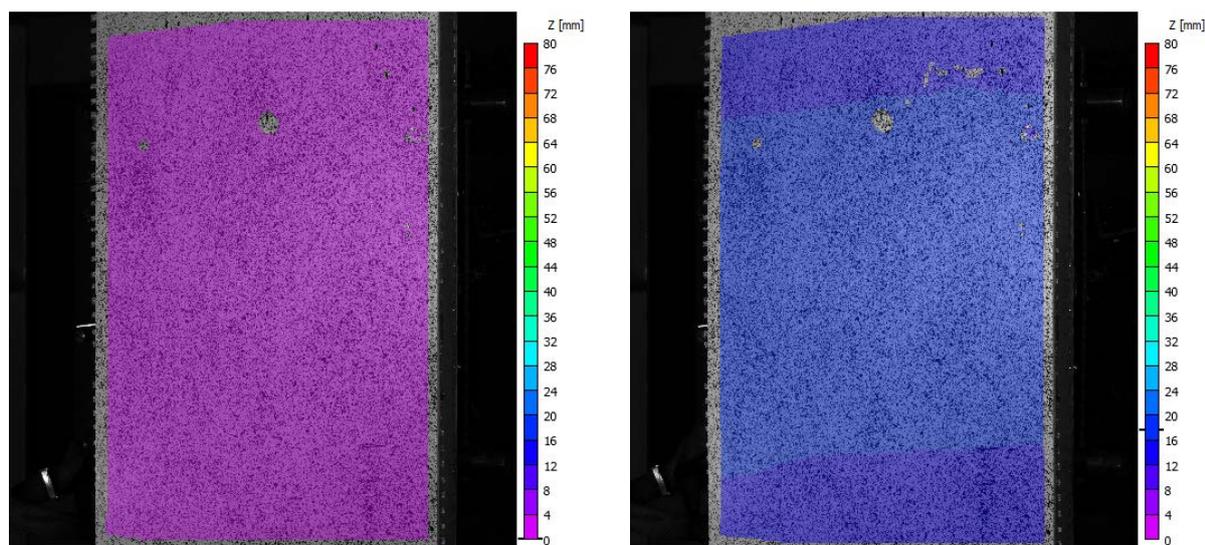


Figura B-55 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-56 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l’abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all’applicazione del carico di rottura.

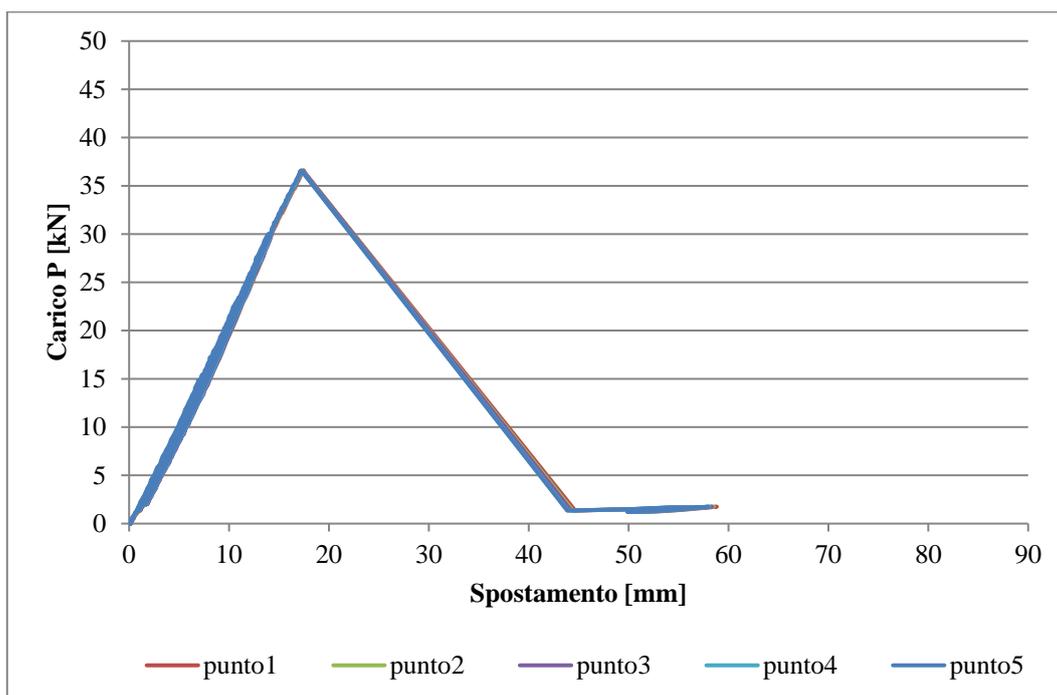


Figura B-57 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

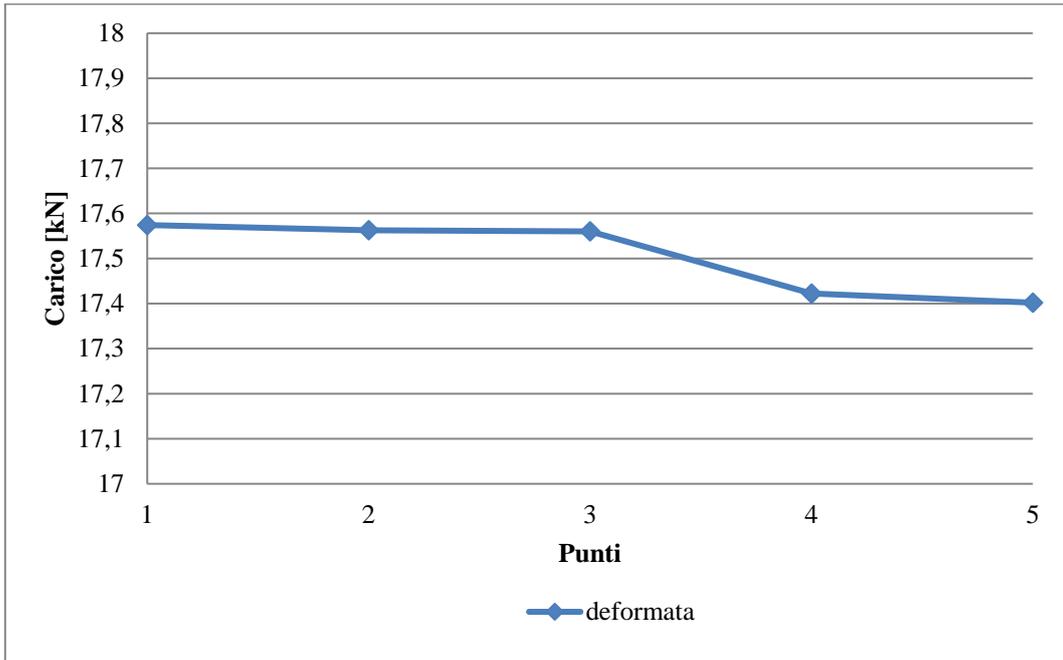


Figura B-58 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di mezzo millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

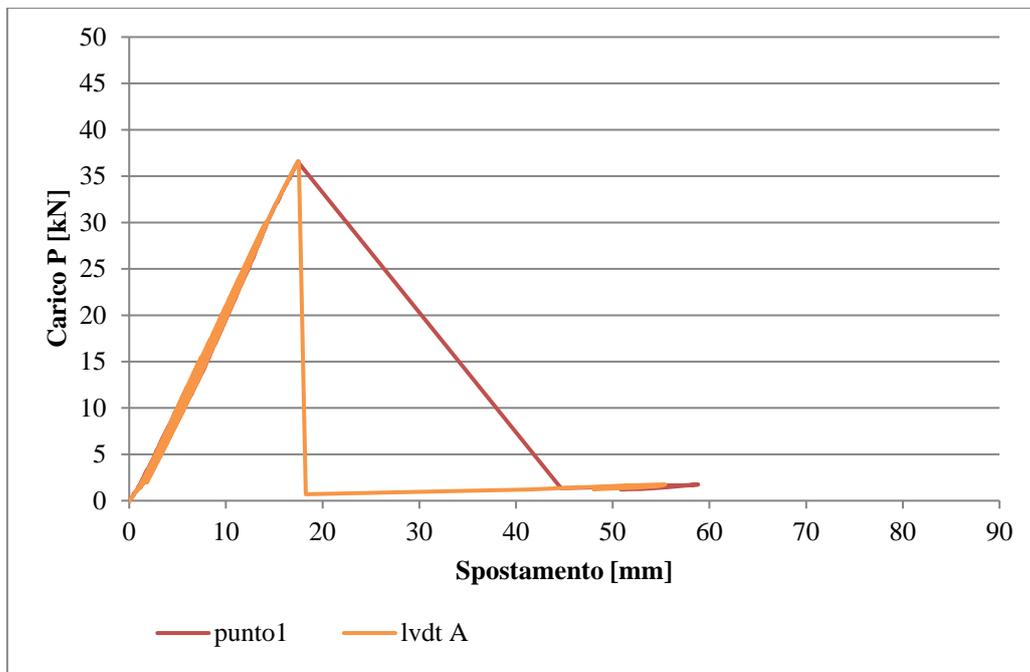


Figura B-59 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

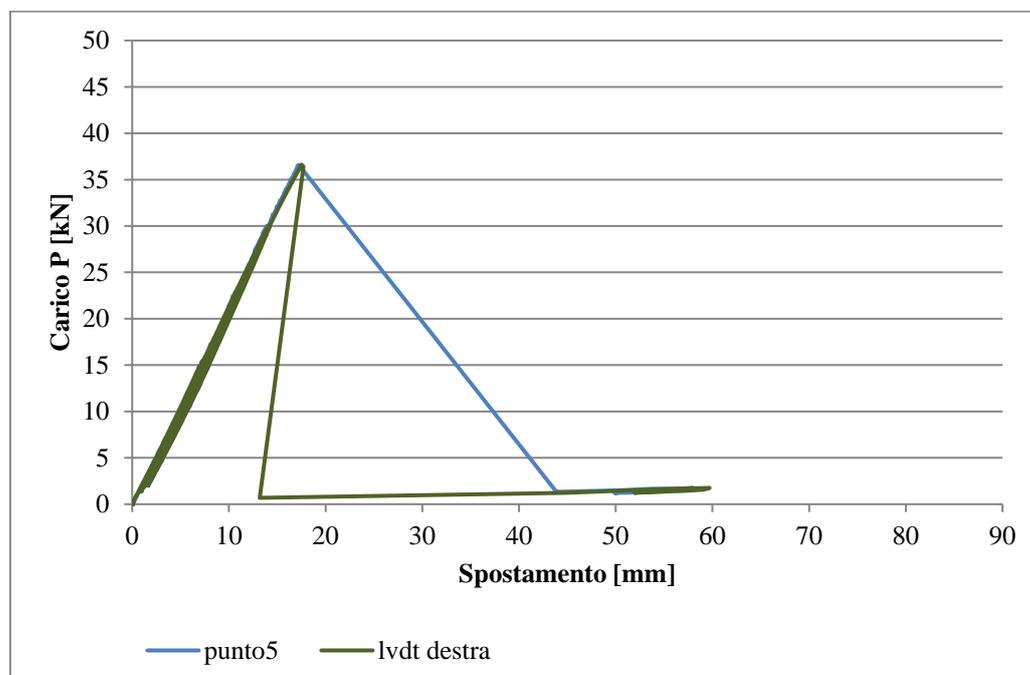


Figura B-60 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

Dai due grafici riportati si nota in entrambi i casi non dovrebbero esserci scollamenti tra le superfici in quanto le curve risultano essere perfettamente coincidenti almeno fino a rottura.

### B.1.9 SCHEDE PROVINO I.9

Il provino 9 presenta la seguente configurazione: due pannelli di multistrato in legno accoppiati a due grigliati con giunto posto a 100 mm dall'appoggio. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con l'adesivo ad acqua IPN con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro in modo da garantire l'aggrappaggio del collante.

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.



Figura B-61 Installazione del provino I.9 sul banco prova

È stata effettuata una prova ciclica. Il ciclo di carico ha raggiunto il seguente valore: 15 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione degli altri cicli di carico che prevedevano il raggiungimento dei 30 kN e 40 kN. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito al distacco del pannello multistrato ligneo inferiore in corrispondenza del giunto dei grigliati, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 29,30 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{29,30}{2} = 14,65 \text{ kN}$$

La particolare configurazione ha mostrato una scarsa efficienza dell'incollaggio in quanto l'impalcato è andato in crisi senza generare rotture degli elementi che lo compongono, bensì si è assistito a un vero e proprio distacco dei materiali in prossimità della discontinuità. In questo caso, al contrario dei precedenti, è la presenza di taglio elevato in corrispondenza del giunto che ha indebolito il sistema.



Figura B-62 Rottura del provino I.9

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

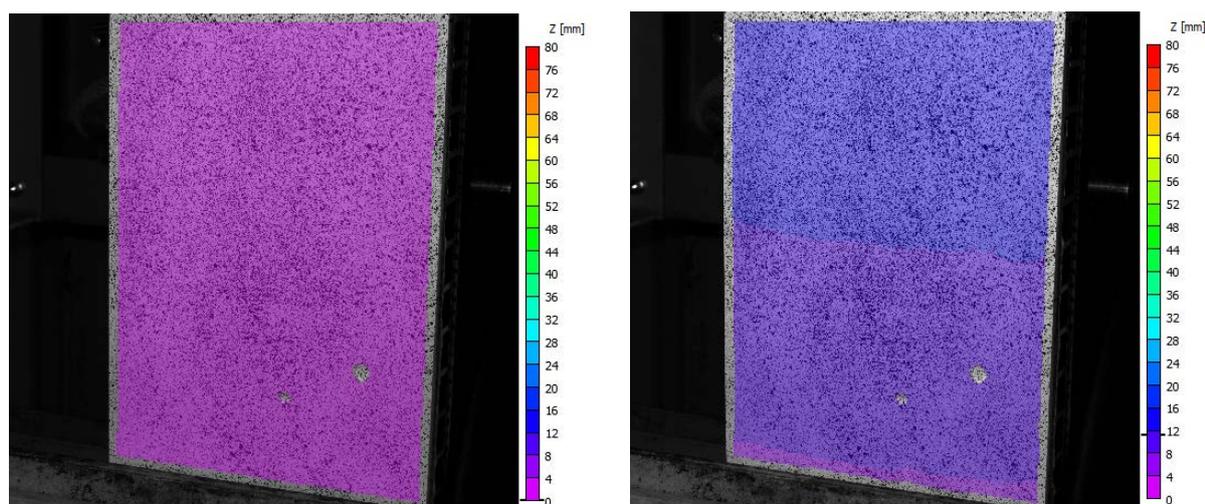


Figura B-63 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-64 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l'abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all'applicazione del carico di rottura.

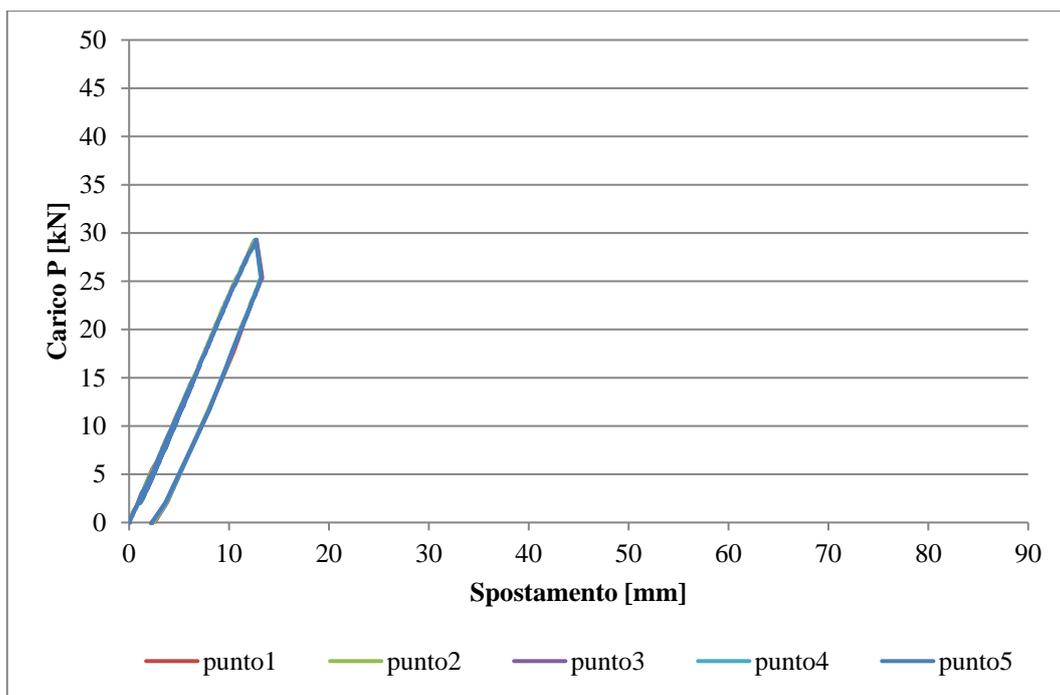


Figura B-65 Grafico carico-spollamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spollamento si elabora uno schema delle deformazioni verticali lungo la sezione di mezzeria:

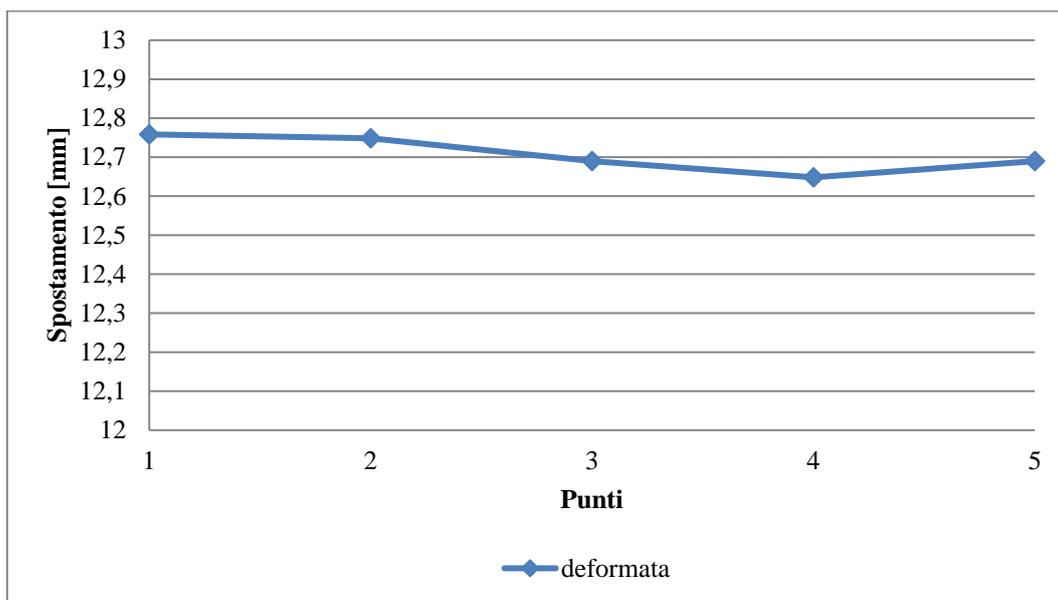


Figura B-66 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l'asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell'ordine di mezzo millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette comunque di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

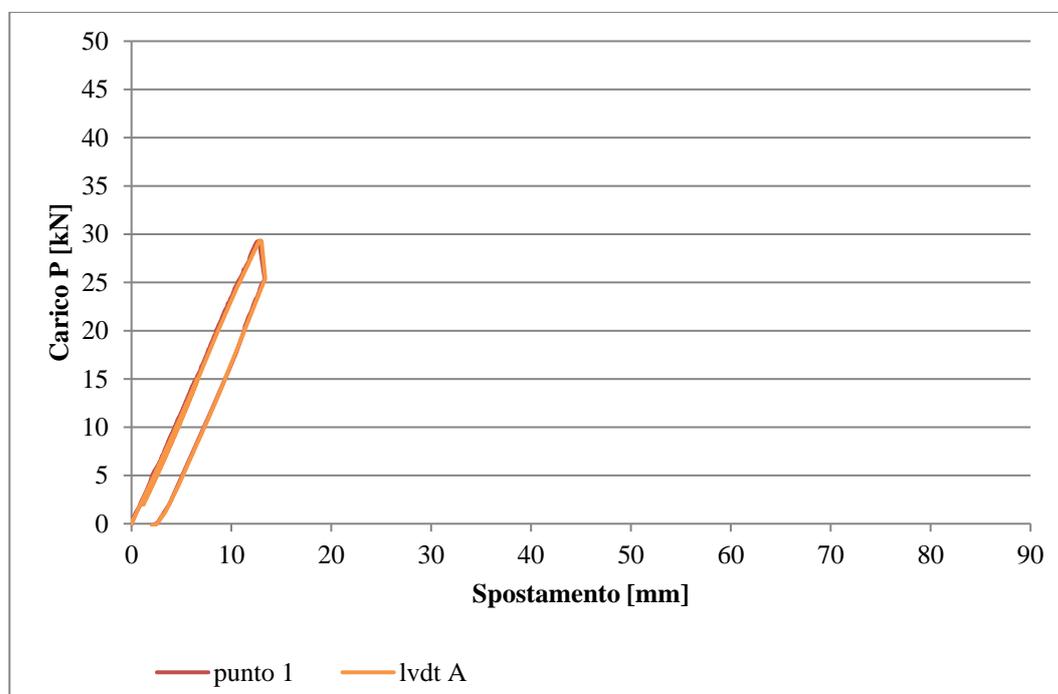


Figura B-67 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all'estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie

a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

Dai due grafici riportati si nota che, in entrambi i casi, in mezzeria, le curve ottenute tramite DIC e LVDT combaciano perfettamente garantendo l'inesistenza di distaccamenti nei punti in questione.

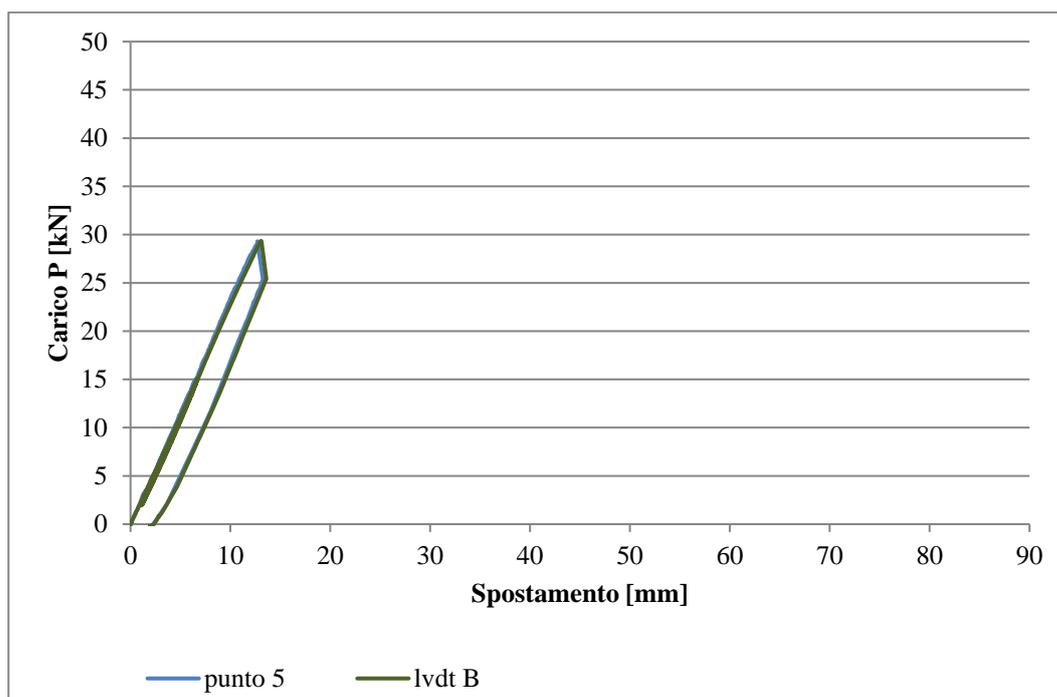


Figura B-68 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

## B.1.10 SCHEDE PROVINO I.10

Il provino I.10 presenta la seguente configurazione: due pannelli di multistrato in legno accoppiati a due grigliati con giunto posto a 100 mm dall'appoggio. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con la resina epossidica RC02 con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro, in questo caso la rete è stata aggiunta per rendere confrontabili i due tipi di incollaggio anche se con la resina non è fondamentale in quanto l'aggrappaggio è garantito dal primer.

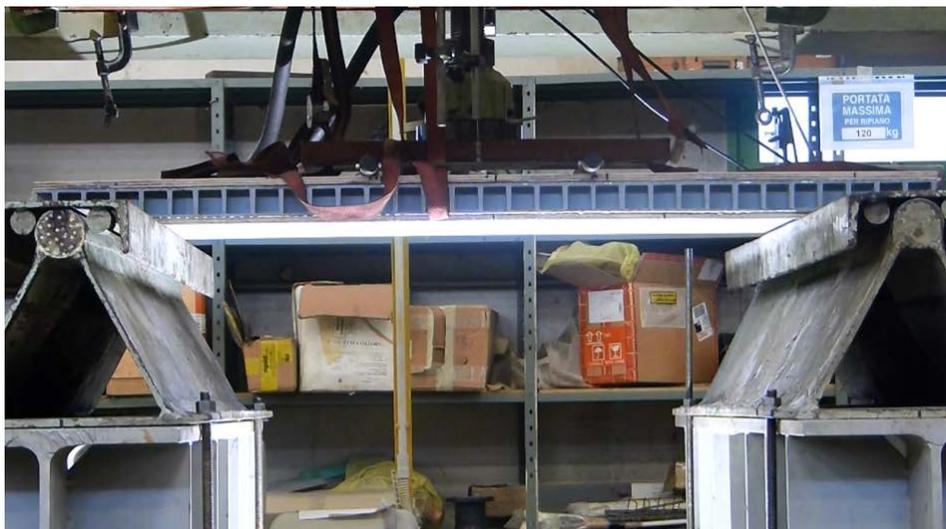


Figura B-69 Installazione del provino I.10 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 15 kN, 30 kN, 40 kN. Superato l'ultimo il campione è stato caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura in prossimità della mezzeria del pannello ligneo inferiore, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 40,66 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{40,66}{2} = 20,33 \text{ kN}$$

La configurazione che prevedeva la presenza della resina epossidica al posto dell'IPN ha garantito un migliore incollaggio in quanto non si ha assistito ad alcuna mancanza di adesione tra i due materiali, nemmeno in corrispondenza del giunto tra i grigliati, anzi, il pannello multistrato inferiore è arrivato a rottura come negli altri casi in mezzeria.



Figura B-70 Rottura del provino I.10

Una volta effettuata la prova è stato possibile estrapolare i risultati dall'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, attraverso il software VIC-3D 2010 Correlated Solutions. Lo stesso dà la possibilità di applicare degli estensimetri virtuali, dai quali si determinano gli spostamenti e le deformazioni di specifici punti della superficie da analizzare.

Attraverso il programma sopra citato si è proceduto all'individuazione degli spostamenti verticali della superficie del provino in modo da definire le aree maggiormente sollecitate. Il sistema di acquisizione dati ottico e la successiva elaborazione degli stessi permette di generare dei filmati dell'intradosso del provino in cui, con l'utilizzo di una scala cromatica, sono mostrati gli abbassamenti raggiunti dall'intera superficie durante la prova.

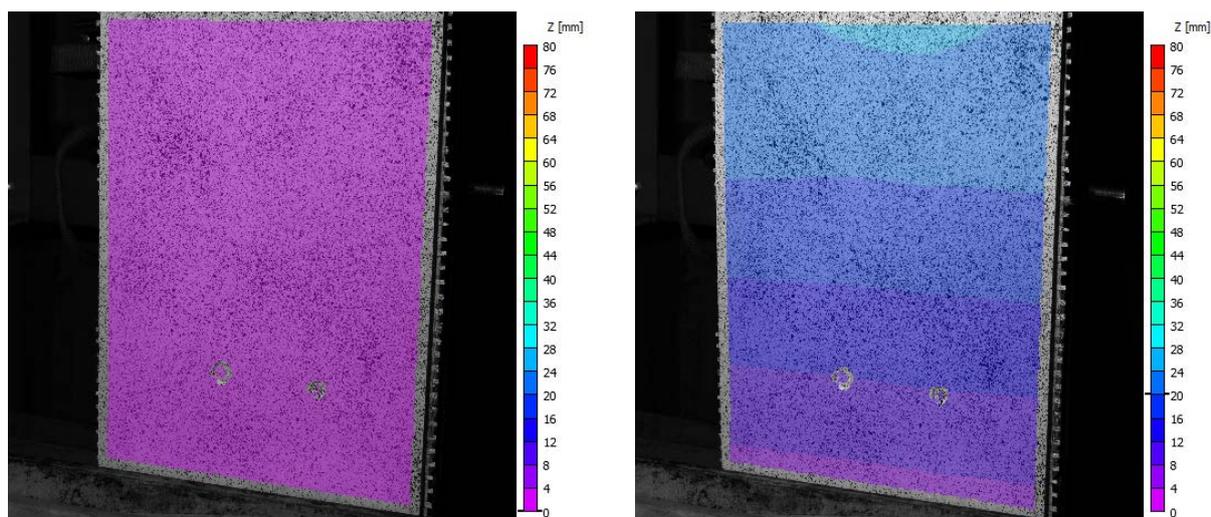


Figura B-71 Deformazione iniziale e finale

Successivamente sono stati presi a campione cinque punti sulla mezzeria, parte maggiormente sollecitata del provino, di cui si riporta uno schema:



Figura B-72 Punti di controllo sulla mezzeria del provino

Di tali punti è stato possibile determinare i grafici carico spostamento in modo da compararne l’abbassamento nel corso della prova, tale confronto è risultato estremamente utile in termini di comportamento omogeneo della sezione. Dalla sovrapposizione dei grafici si può evidenziare che il comportamento dei cinque punti considerati risulta omogeneo, almeno fino all’applicazione del carico di rottura.

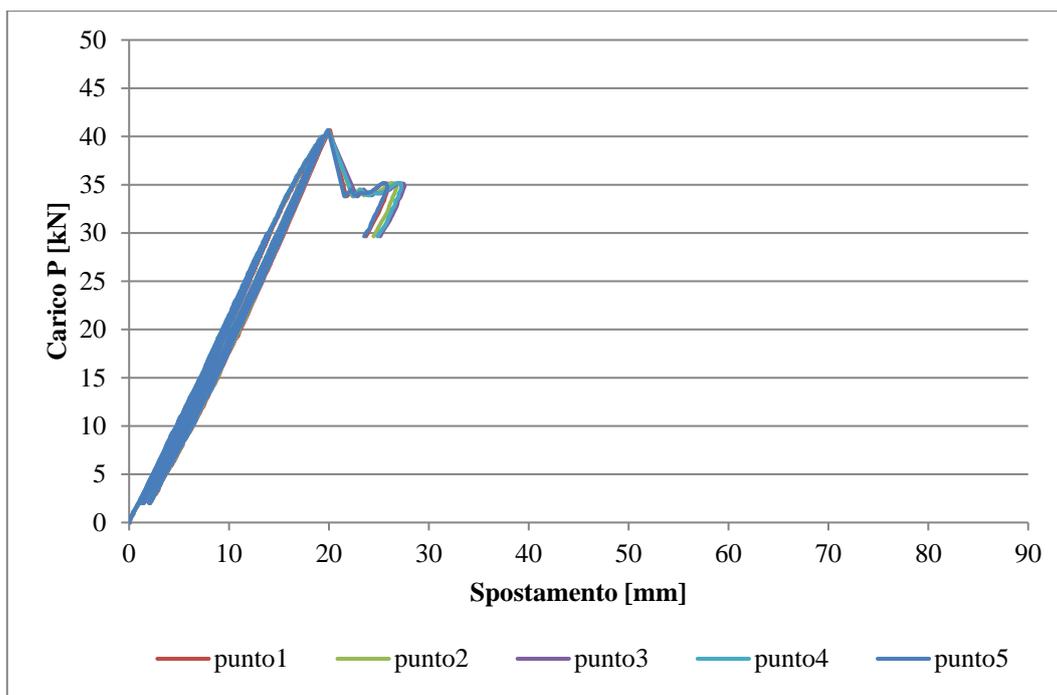


Figura B-73 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo

Per confermare quanto riportato nel confronto dei grafici carico-spostamento si elabora uno schema delle deformazioni lungo la sezione di mezzeria:

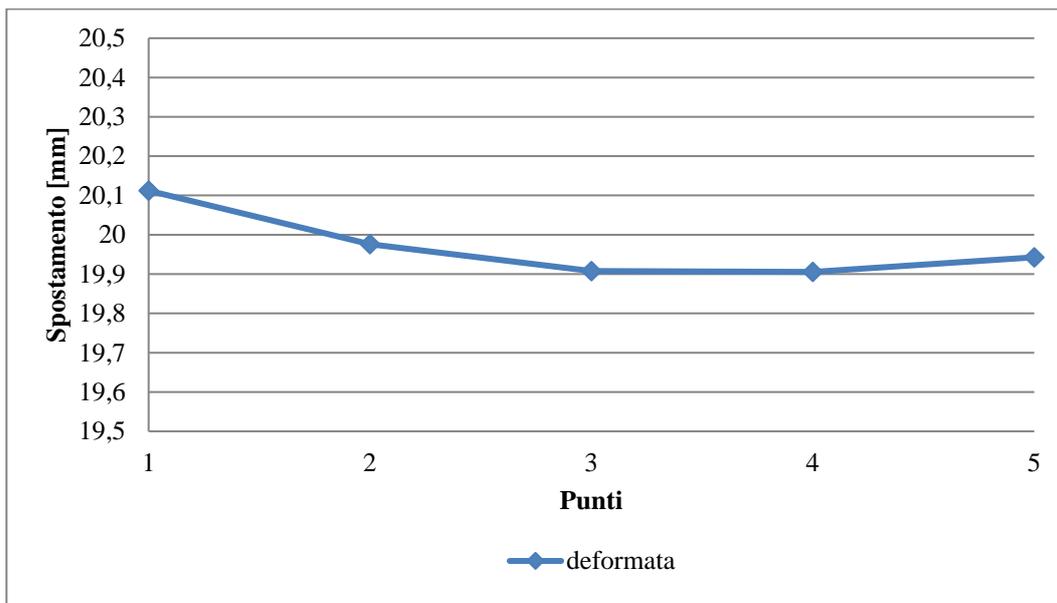


Figura B-74 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura

È visibile che lo spostamento lungo l’asse verticale dei cinque punti considerati non differisce in maniera sostanziale, anzi si mantiene nell’ordine di mezzo millimetro di differenza.

Questo risultato ci permette comunque di utilizzare il grafico carico-spostamento corrispondente al punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le prove effettuate.

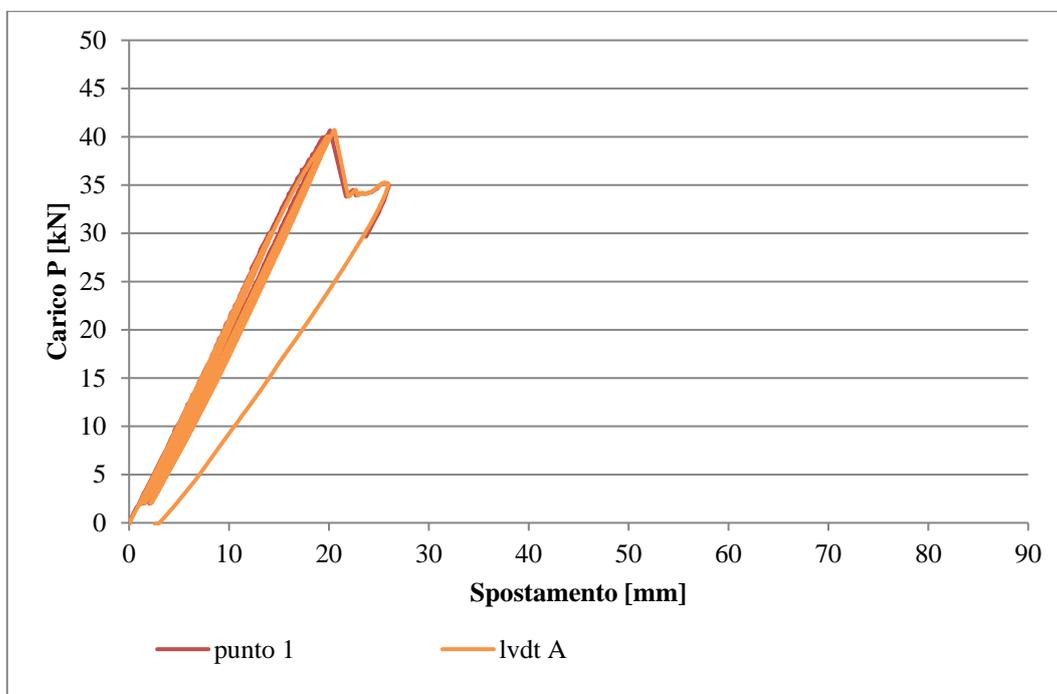


Figura B-75 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A

I trasduttori di spostamento, che erano stati posizionati all’estradosso del provino risultano essere utili nella determinazione di eventuali scollamenti nel corso della prova. Ciò è possibile grazie

a un confronto tra i dati ottenuti dagli LVDT e da quelli della DIC relativi ai punti più esterni che risultano combaciare con la posizione dei trasduttori.

Dai due grafici riportati si nota che, nel primo caso le curve combaciano perfettamente garantendo la mancanza di distacchi tra le superfici mentre nel secondo caso potrebbero essere avvenuti in parte, in quanto i due andamenti non sono perfettamente coincidenti.

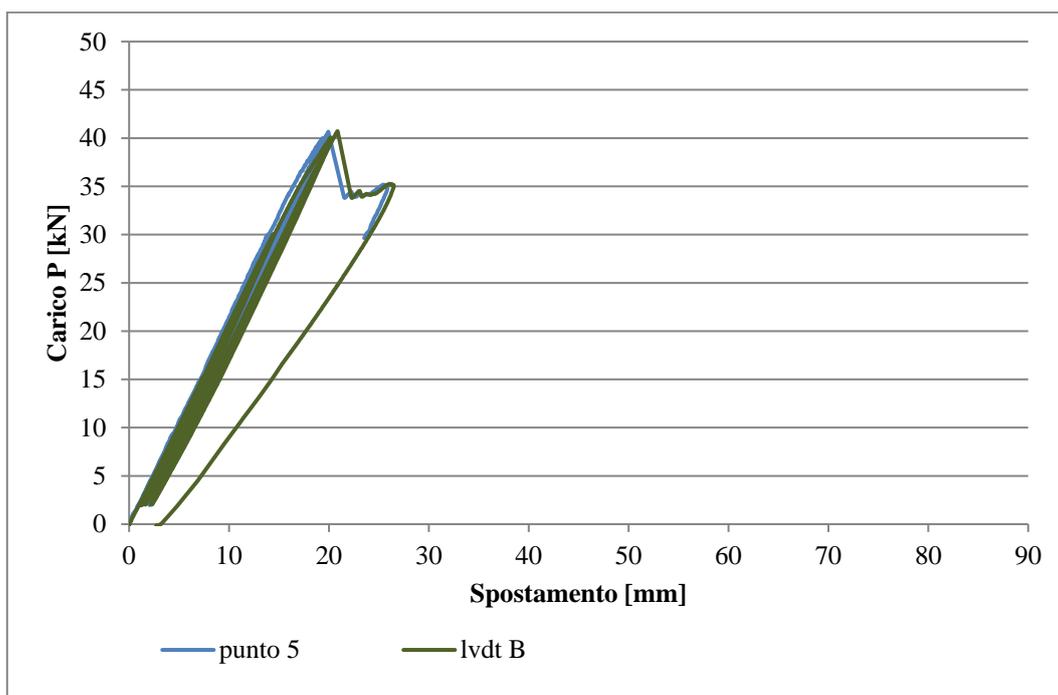


Figura B-76 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B

## B.2 SECONDA FASE DI SPERIMENTAZIONE

### B.2.1 SCHEDE PROVINO II.1

Il provino II.1 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 40 mm con all'intradosso e all'estradosso due pannelli multistrato di legno di spessore 9 mm entrambi. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-77 Installazione del provino II.1 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico hanno raggiunto i seguenti valori: 10 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo superiore a causa del fenomeno di punzonamento, vale a dire una rottura per taglio con traslazione nella direzione della forza, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 11,05 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{11,05}{2} = 5,52kN$$

La rottura del pannello di legno superiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il multistrato inferiore avrebbe raggiunto la rottura per trazione con carichi superiori.



*Figura B-78 Rottura del provino II.1*

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

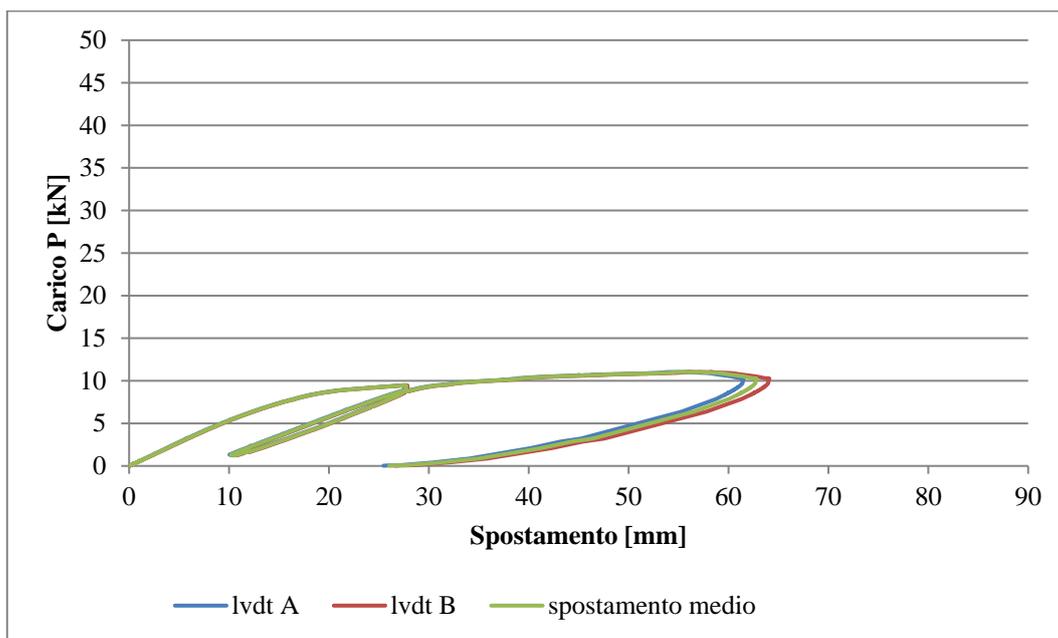


Figura B-79 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidità, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Raggiunti i 10 kN il residuo plastico è elevato e non permette al provino di ritornare alla configurazione iniziale.

## B.2.2 SCHEDE PROVINO II.2

Il provino II.2 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 60 mm con all'intradosso e all'estradosso due pannelli multistrato di legno di spessore 9 mm entrambi. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.

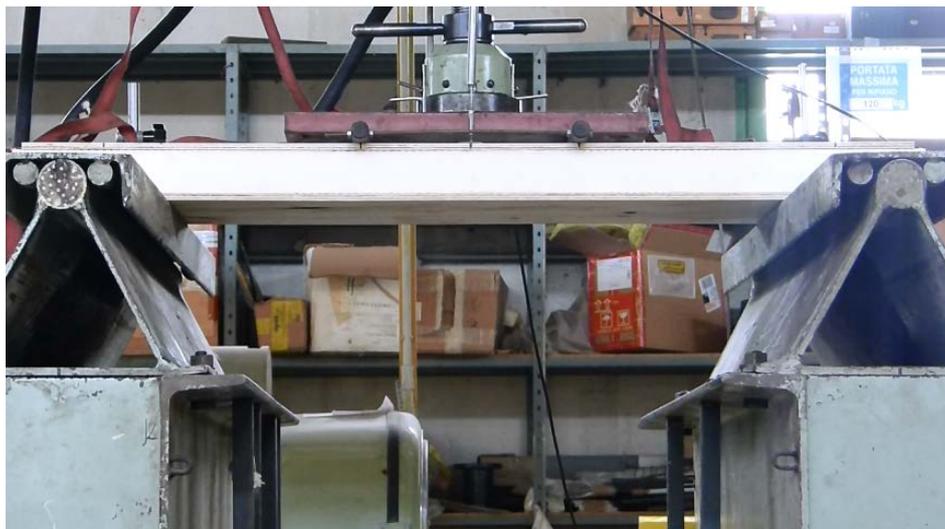


Figura B-80 Installazione del provino IL1 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. Si è deciso di realizzare degli step di carico più bassi rispetto alla prima prova in modo da determinare l'intervallo di valori che potessero garantire la ripresa elastica della conformazione iniziale. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo superiore a causa del fenomeno di punzonamento, vale a dire una rottura per taglio con traslazione nella direzione della forza, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 15,42 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{15,42}{2} = 7,71 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno superiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il multistrato inferiore avrebbe raggiunto la rottura per trazione con carichi superiori.



*Figura B-81 Rottura del provino II.2*

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

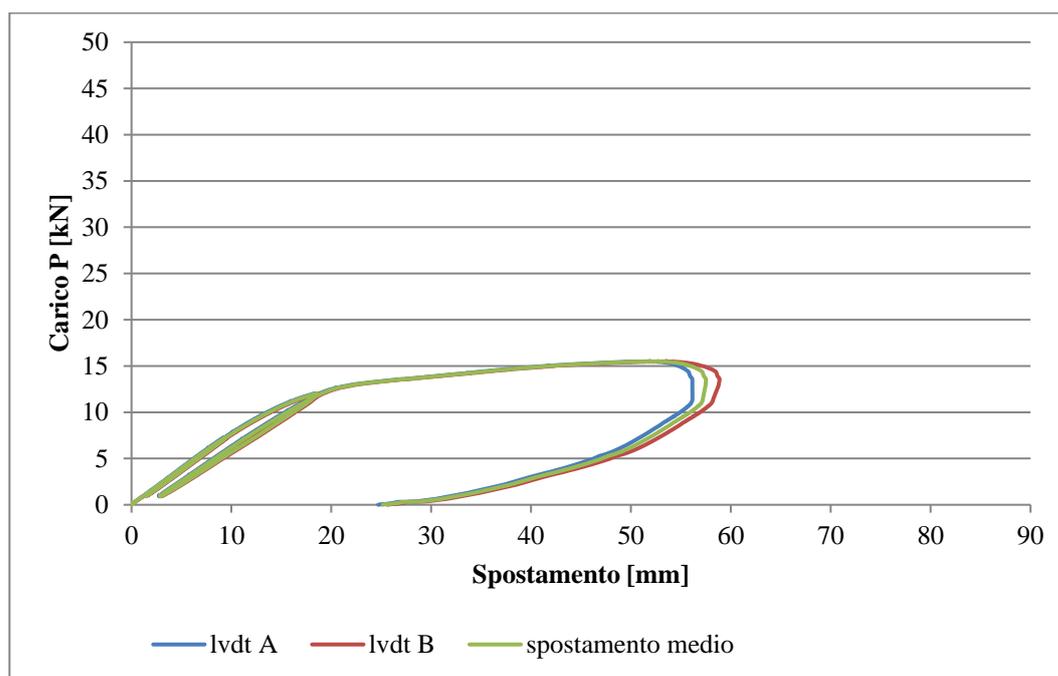


Figura B-82 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidità, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo ciclo di carico nell'intervallo 6 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario, a 12 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

### B.2.3 SCHEDE PROVINO II.3

Il provino II.3 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 80 mm con all'intradosso e all'estradosso due pannelli multistrato di legno di spessore 9 mm entrambi. L'incollaggio tra i differenti materiali, corrisponde a resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-83 Installazione del provino II.1 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo superiore a causa del fenomeno di punzonamento, vale a dire una rottura per taglio con traslazione nella direzione della forza, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 16,74 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{16,74}{2} = 8,37 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno superiore è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il multistrato inferiore avrebbe raggiunto la rottura per trazione con carichi superiori.

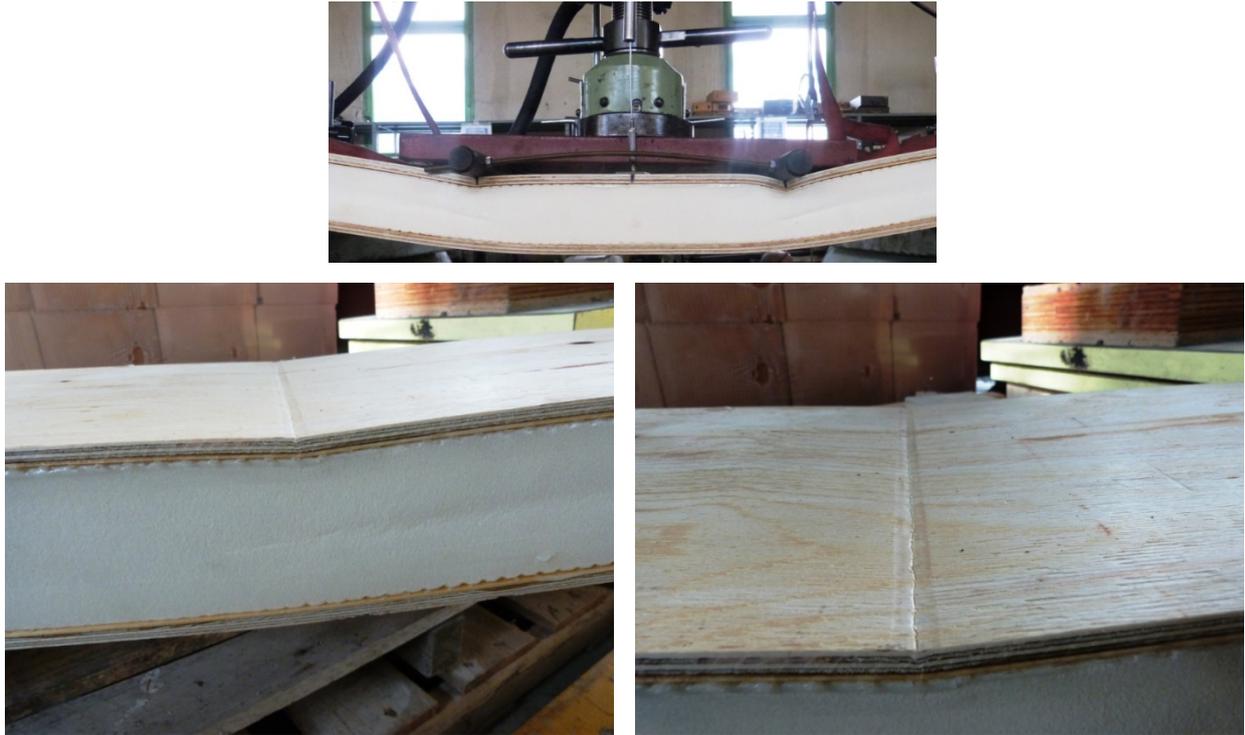


Figura B-84 Rottura del provino II.3

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

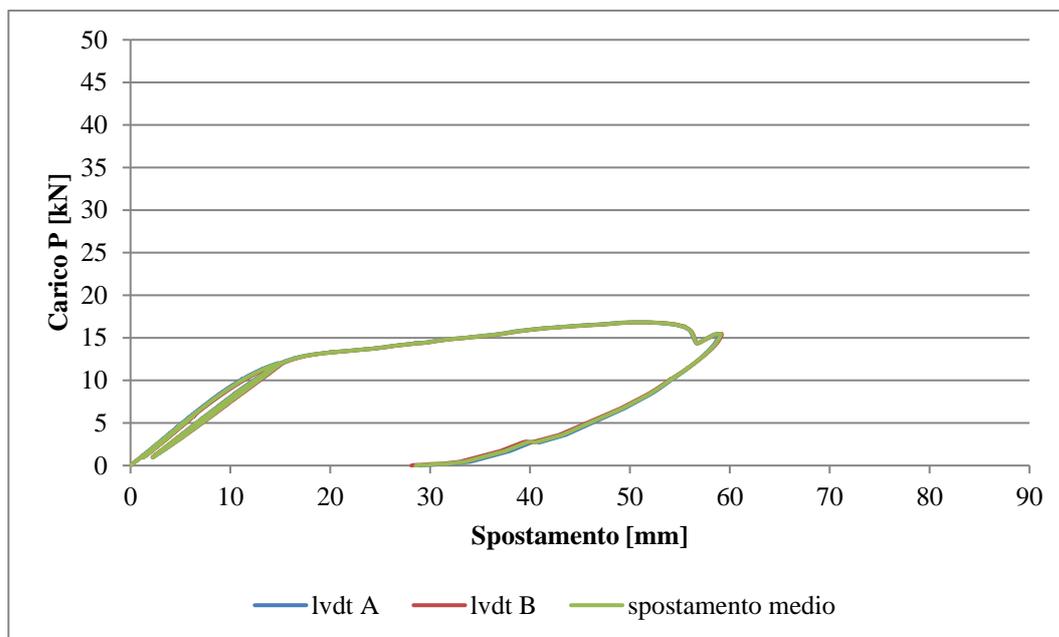


Figura B-85 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidezza, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo ciclo di carico nell'intervallo 6 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario, a 12 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

#### B.2.4 SCHEDE PROVINO II.4

Il provino II.4 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 40 mm con all'intradosso e all'estradosso due pannelli multistrato di legno di spessore 18 mm entrambi. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-86 Installazione del provino II.4 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore soggetto a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 16,73 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{16,73}{2} = 8,36 \text{ kN}$$



Figura B-87 Rottura del provino II.4

La rottura del pannello di legno inferiore è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di pannelli di legno di spessore più elevato.

Questi hanno permesso una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. La rottura del multistrato all'intradosso ha visto la formazione di lesioni solo nel foglio più esterno e non dell'intero pannello di compensato.

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

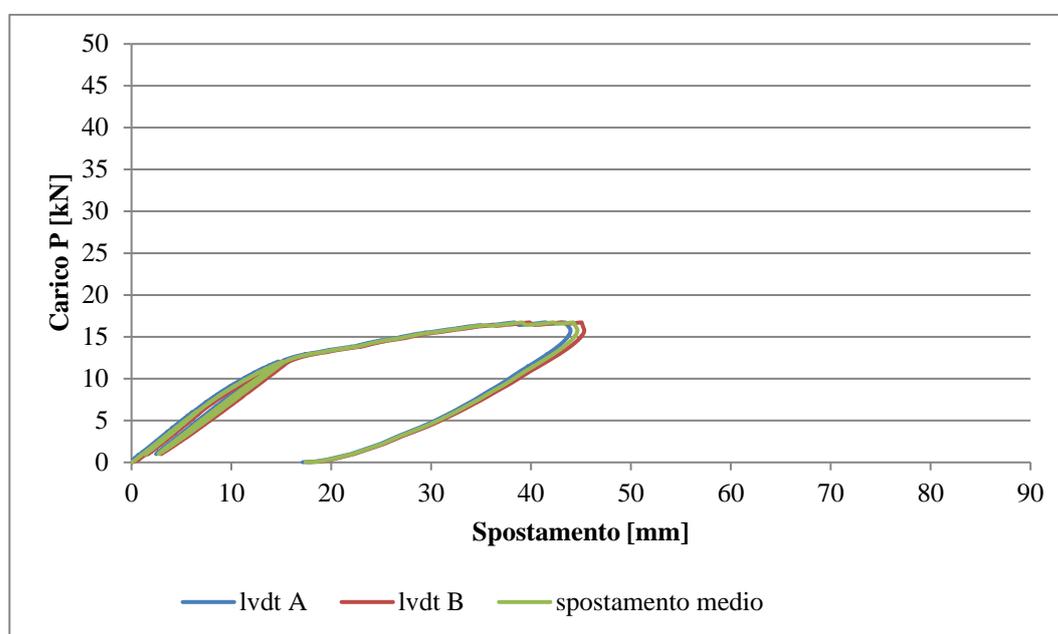


Figura B-88 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidità, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo ciclo di carico nell'intervallo 6 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario, a 12 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

---

**B.2.5 SCHEDE PROVINO II.5**

---

Il provino II.5 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 60 mm con all'intradosso e all'estradosso due pannelli multistrato di legno di spessore 18 mm entrambi. L'incollaggio tra i differenti materiali, corrisponde a è realizzato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



*Figura B-89 Installazione del provino II.5 sul banco prova*

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN, 18 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore soggetto a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 23,21 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{23,21}{2} = 11,60 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno inferiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di pannelli di legno di spessore più elevato. Questi permettevano una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. La rottura del multistrato all'intradosso ha visto la formazione di lesioni solo nel foglio più esterno e non dell'intero pannello di compensato.



*Figura B-90 Rottura del provino II.5*

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

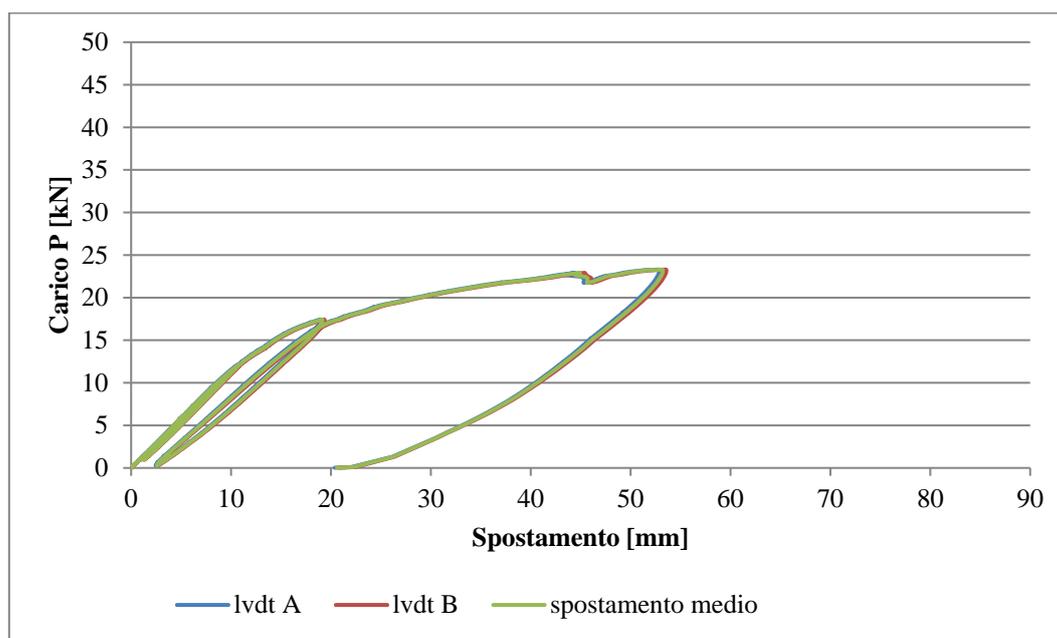


Figura B-91 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidezza, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario a 18 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

## B.2.6 SCHEDE PROVINO II.6

Il provino II.6 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 80 mm con all'intradosso e all'estradosso due pannelli multistrato di legno di spessore 18 mm entrambi. L'incollaggio tra i differenti materiali è realizzato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-92 Installazione del provino IL6 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN, 18 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore soggetto a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 23,55 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{23,55}{2} = 11,77 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno inferiore è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di pannelli di legno di spessore più elevato. Questi permettevano una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. La rottura del multistrato all'intradosso ha visto la formazione di lesioni solo nel foglio più esterno e non dell'intero pannello di compensato.



*Figura B-93 Rottura del provino II.6*

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidezza, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario a 18 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

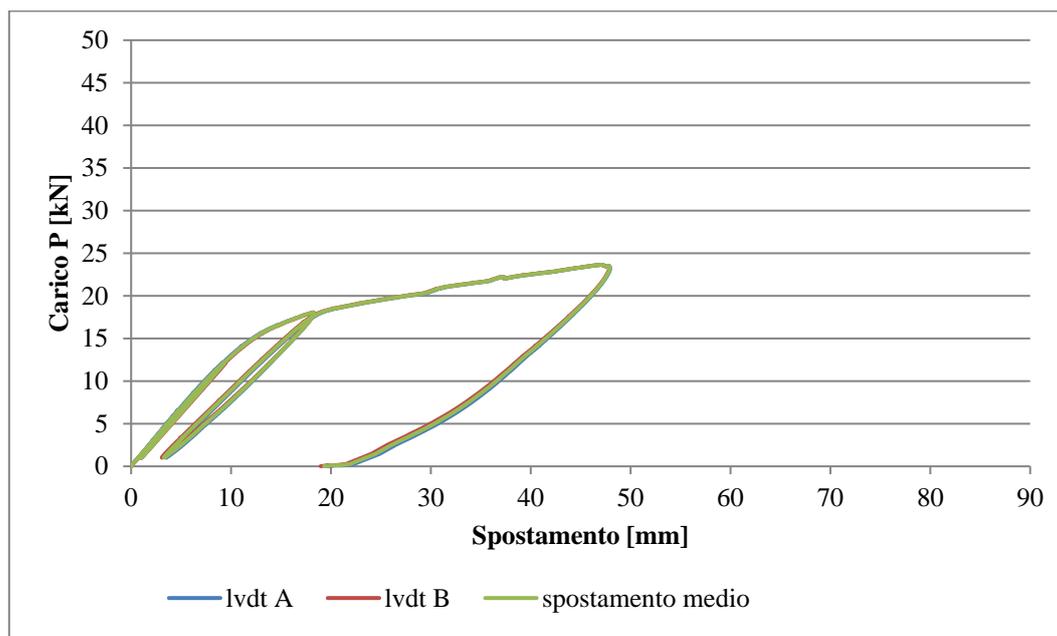


Figura B-94 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

### B.2.7 SCHEDE PROVINO II.7

Il provino II.7 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 40 mm con all'estradosso e all'intradosso due pannelli multistrato di legno di spessore rispettivamente 18 mm e 9 mm. L'incollaggio tra i differenti materiali è effettuato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzera.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.



Figura B-95 Installazione del provino II.7 sul banco prova

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore e dell'XPS soggetti a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 19,33 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{19,33}{2} = 9,66 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno inferiore e dell'XPS è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di un pannello di legno di spessore più elevato. Questo permetteva una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. Al contrario delle prove precedenti, dove il multistrato inferiore vedeva lesionarsi solo il foglio più esterno, in questo caso si è assistito alla rottura completa del pannello da 9 mm accompagnata da quella del polistirene. Questa spaccatura ha dimostrato che la parte più debole dell'impalcato corrisponde alla zona di mezzeria soggetta al momento flettente massimo. La crisi è stata raggiunta attraverso un meccanismo fragile, imprevedibile.



Figura B-96 Rottura del provino II.7

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidità, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria.

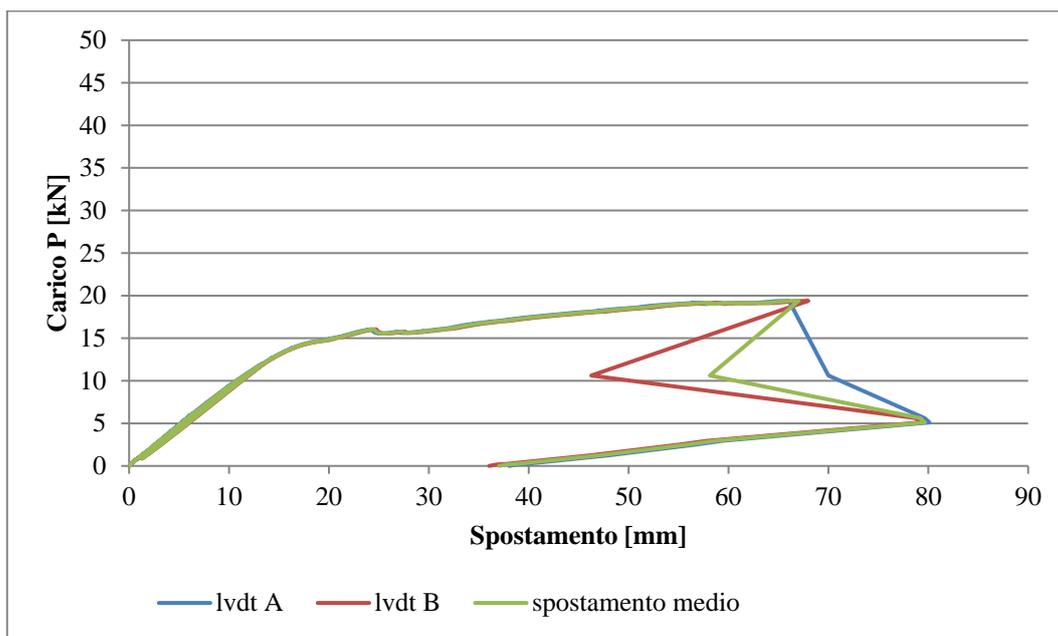


Figura B-97 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

## B.2.8 SCHEDE PROVINO II.8

Il provino II.8 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 60 mm con all'estradosso e all'intradosso due pannelli multistrato di legno di spessore rispettivamente 18 mm e 9 mm. L'incollaggio tra i differenti materiali è effettuato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-98 Installazione del provino II.8 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN, 18 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico. Successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore e dell'XPS soggetti a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 21,22 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{21,22}{2} = 10,61 \text{ kN}$$



Figura B-99 Rottura del provino II.8

La rottura del pannello di legno inferiore e dell'XPS è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di un pannello di legno di spessore più elevato. Questo permetteva una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. Al contrario delle prove precedenti, dove il multistrato inferiore vedeva lesionarsi solo il foglio più esterno, in questo caso si è assistito alla rottura completa del pannello da 9 mm accompagnata da quella del polistirene. Questa spaccatura ha dimostrato che la parte più debole dell'impalcato corrisponde alla zona di mezzeria soggetta al momento flettente massimo. La crisi è stata raggiunta attraverso un meccanismo fragile, imprevedibile.

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

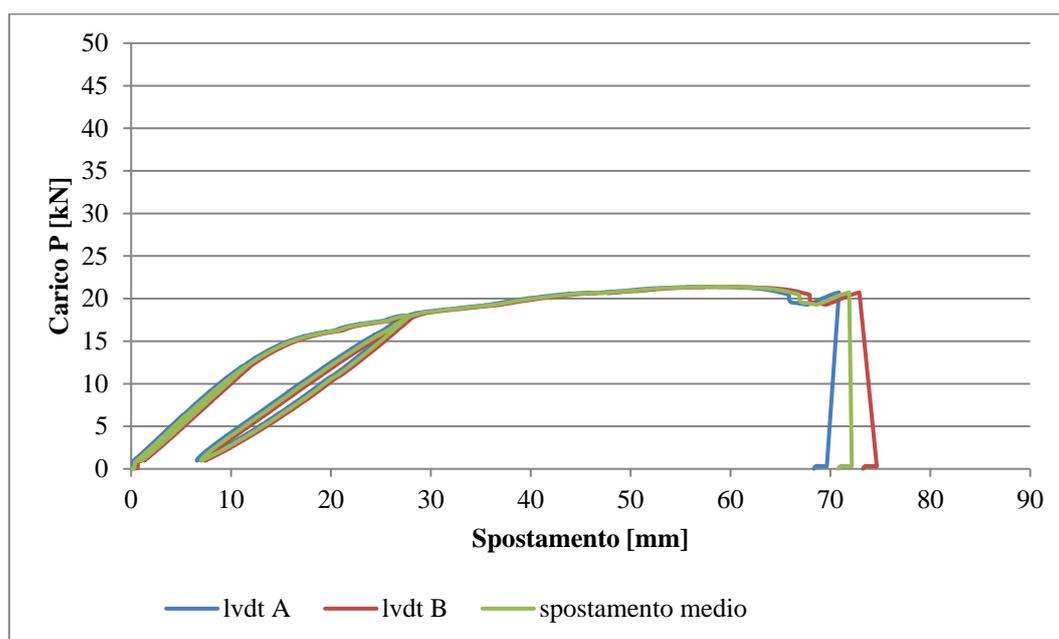


Figura B-100 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidezza, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario a 18 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

### B.2.9 SCHEDE PROVINO II.9

Il provino II.9 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 80 mm con all'estradosso e all'intradosso due pannelli multistrato di legno di spessore rispettivamente 18 mm e 9 mm. L'incollaggio tra i differenti materiali è effettuato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-101 Installazione del provino II.9 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN, 18 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In particolare, si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo superiore a causa del fenomeno di punzonamento, vale a dire una rottura per taglio con traslazione nella direzione della forza, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 24,91 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{24,91}{2} = 12,45 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno superiore è stata considerata come crisi dell'impalcato, ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il multistrato inferiore avrebbe raggiunto la rottura per trazione con carichi superiori.



*Figura B-102 Rottura del provino II.9*

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

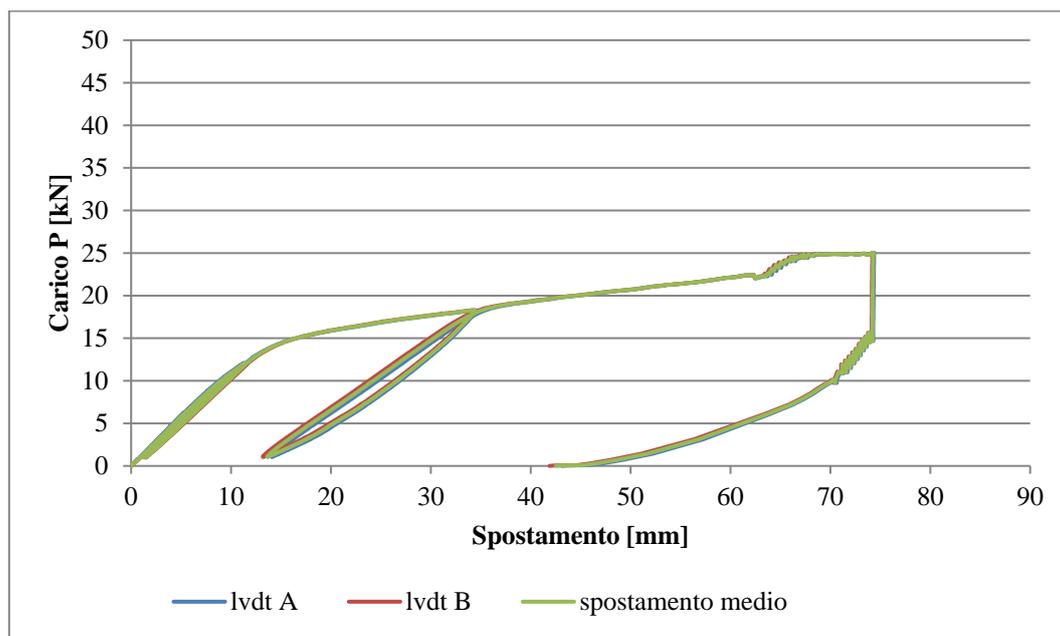


Figura B-103 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidezza, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario a 18 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

### B.2.10 SCHEDE PROVINO II.10

Il provino II.10 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 40 mm con all'estradosso e all'intradosso due pannelli multistrato di legno di spessore rispettivamente 9 mm e 18 mm. L'incollaggio tra i differenti materiali è effettuato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-104 Installazione del provino IL10 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN, 18 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore soggetto a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 18,01 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{18,01}{2} = 9,00 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno inferiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di un pannello di legno di spessore più elevato. Questo permetteva una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. Inoltre la rottura del multistrato

all'intradosso ha visto la formazione di lesioni solo nel foglio più esterno e non dell'intero pannello di compensato.



Figura B-105 Rottura del provino II.10

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidità, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario a 18 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

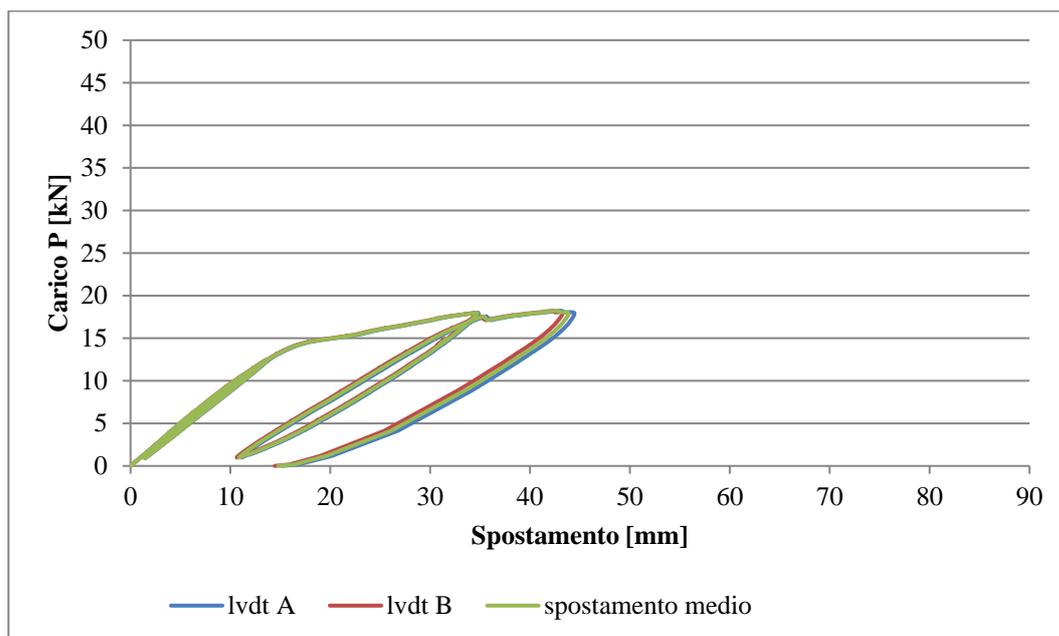


Figura B-106 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

## B.2.11 SCHEDE PROVINO II.11

Il provino II.11 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 60 mm con all'estradosso e all'intradosso due pannelli multistrato di legno di spessore rispettivamente 9 mm e 18 mm. L'incollaggio tra i differenti materiali è effettuato con la resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-107 Installazione del provino II.11 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN, 18 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore soggetto a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 19,28 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{19,28}{2} = 9,64 \text{ kN}$$



Figura B-108 Rottura del provino II.11

La rottura del pannello di legno inferiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di un pannello di legno di spessore più elevato. Questo permetteva una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. Inoltre la rottura del multistrato all'intradosso ha visto la formazione di lesioni solo nel foglio più esterno e non dell'intero pannello di compensato.

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

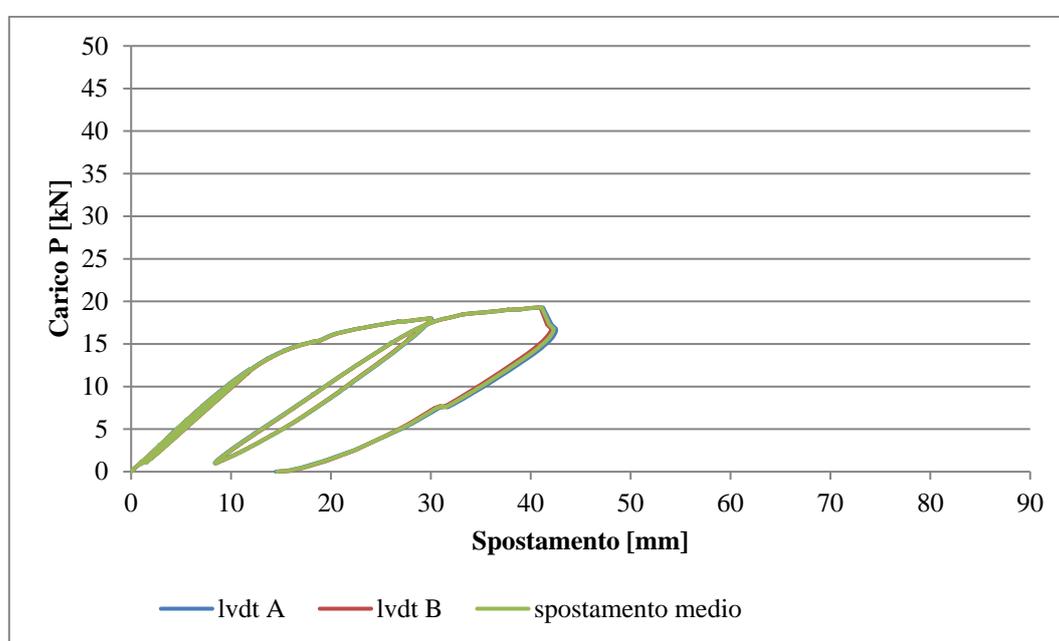


Figura B-109 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidità, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria. Al contrario a 18 kN il residuo plastico è maggiore e non permette al provino di riacquisire la configurazione iniziale.

Il provino 11 presenta la seguente configurazione: pannello di XPS di spessore 60 mm con all'estradosso e all'intradosso due pannelli multistrato di legno di spessore rispettivamente 9 mm e 18 mm. L'incollaggio tra i differenti materiali, corrisponde a resina epossidica con interposizione tra le interfacce di una rete in fibra di vetro.



Figura B-110 Installazione del provino II.12 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si è cominciato a caricare lo stesso attraverso una pressa, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria.

È stata effettuata una prova ciclica. I cicli di carico effettuati corrispondono ai seguenti: 6 kN, 12 kN. Superato questo valore il campione ha raggiunto la crisi, senza permettere l'applicazione di ulteriori cicli di carico, successivamente è stato scaricato. Tale modalità di prova risultava necessaria al fine di comprendere se l'impalcato fosse soggetto a un residuo plastico.

In questo caso si è assistito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore soggetto a trazione, quando il carico impartito dalla pressa coincideva con:

$$P = 18,06 \text{ kN}$$

Da questo valore si può risalire alla forza ripartita sui due coltelli:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{18,06}{2} = 9,03 \text{ kN}$$

La rottura del pannello di legno inferiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. In questo caso non si è assistito al fenomeno del punzonamento grazie alla presenza di un pannello di legno di spessore più elevato. Questo permetteva una distribuzione del carico più uniforme, allontanando il pericolo di creazione di aree di piccole dimensioni soggette a carichi concentrati elevati. La rottura del multistrato all'intradosso ha visto la formazione di lesioni solo nel foglio più esterno e non dell'intero pannello di compensato.



*Figura B-111 Rottura del provino II.12*

Terminata la prova è stato possibile elaborare i dati ottenuti attraverso i trasduttori di spostamento. Conoscendo le deformazioni verticali delle parti esterne del provino è stato determinato lo spostamento medio generato dal carico impartito.

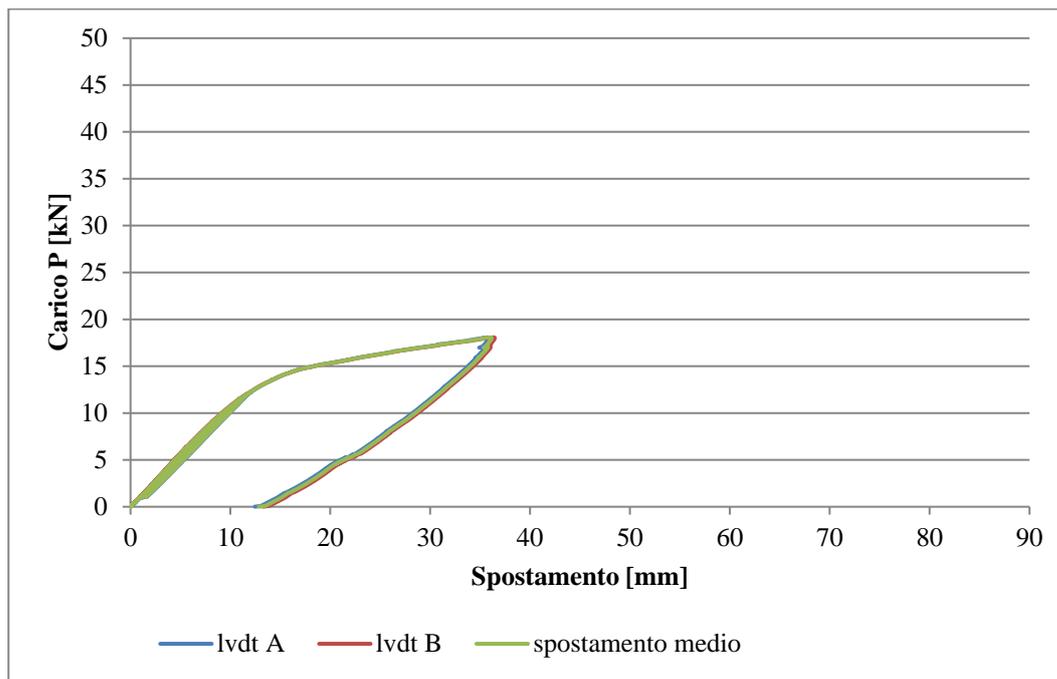


Figura B-112 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio

Il provino subisce delle deformazioni uniformi su tutta la sezione, ciò rende possibile nel momento dei confronti con gli altri test di utilizzare il grafico dello spostamento medio. La scala di misura raggiunge valori massimi maggiori rispetto a quelli delle curve. Tale scelta è stata effettuata per utilizzare la stessa impostazione grafica della precedente analisi sperimentale e rendere evidente che, in termini di resistenza e di rigidezza, l'impalcato con l'XPS raggiunge ordini di grandezza nettamente inferiori a quelli ottenuti con il grigliato, aspetto che verrà approfondito in seguito.

Dal risultato ottenuto è visibile che nel primo e nel secondo ciclo di carico negli intervalli 6 kN-1 kN e 12 kN-1 kN il residuo plastico non è elevato. Il provino si comporta elasticamente tornando nella conformazione originaria.

---

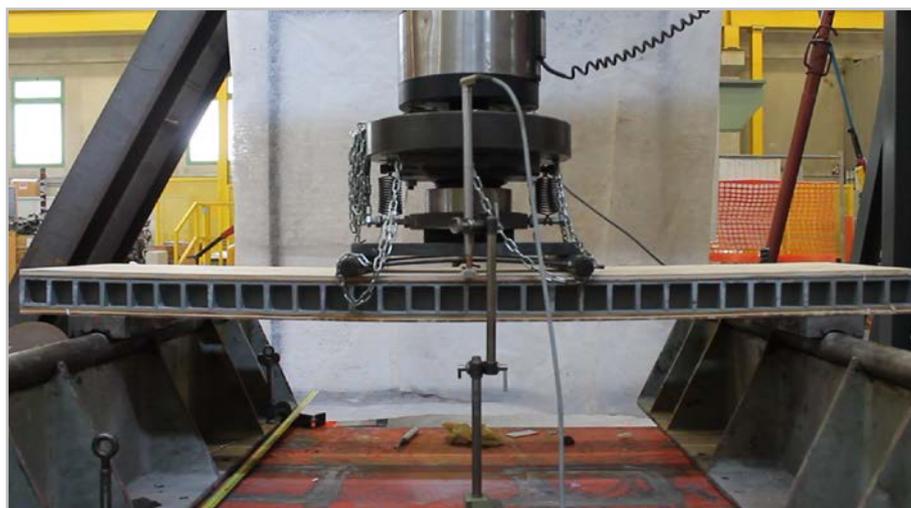
## B.3 TERZA FASE DI SPERIMENTAZIONE

---

### B.3.1 SCHEDE PROVINO III.1

---

Il provino in oggetto si compone di un grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno, senza discontinuità alcuna nei tre strati. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è la resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80.



*Figura B-113 Installazione del provino III.1 sul banco prova*

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

Si tratta di una prova monotona: il campione è stato caricato fino al raggiungimento della crisi del campione e successivamente scaricato. Tale crisi avviene con la rottura del pannello multistrato ligneo inferiore. Tuttavia la prova è stata portata avanti fino al raggiungimento di un significativo abbassamento di carico che avviene con la terza rottura, quella del grigliato.

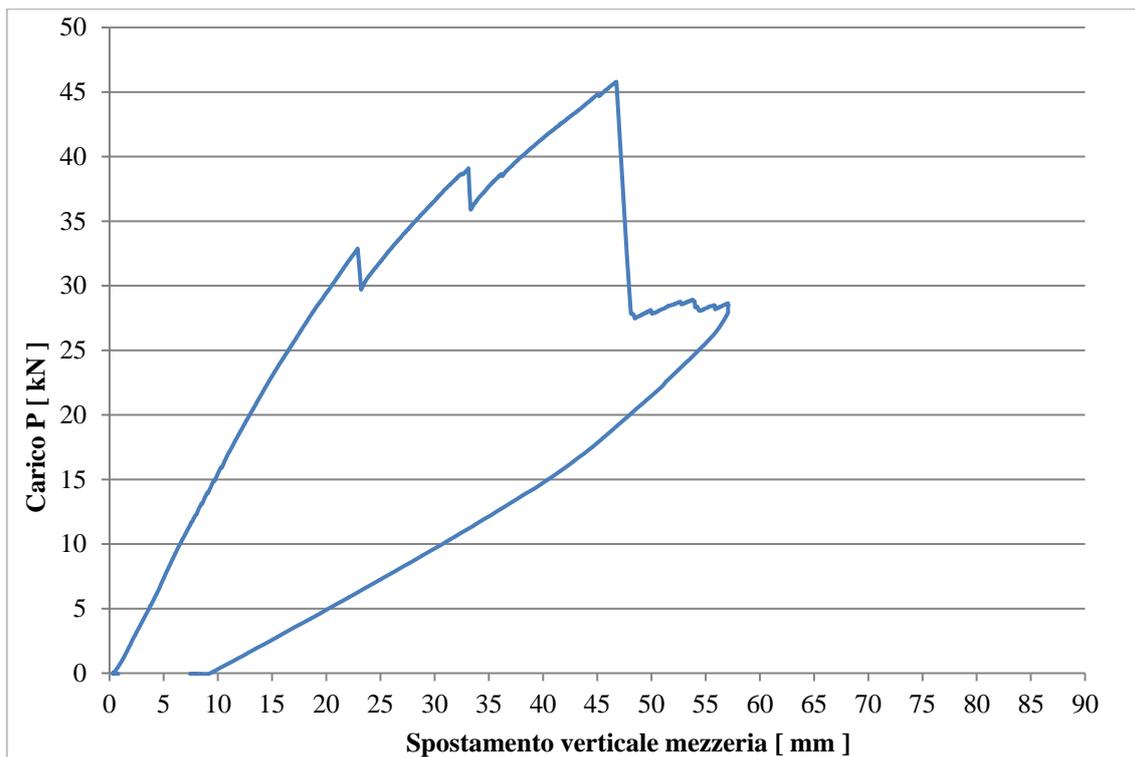


Figura B-114 Grafico carico-spostamento

Nel grafico sottostante si notano due punti di discontinuità coincidenti con la crisi del materiale i cui il carico subisce un decremento a spostamento costante. La rottura del tavolato ligneo, collocata all'intradosso, avviene in due punti simmetrici rispetto alla mezzeria mentre il grigliato si rompe secondo un piano parallelo al piano dell'impalcato.

Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 32,88 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{32,88}{2} = 16,44 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 22,9 \text{ mm}$$

In seguito a tale crisi, si nota una diminuzione percentuale del carico pari al 10% mantenendo il valore dello spostamento fisso. Continuando il processo di carico, il provino può raggiungere valori di carico molto più elevati fino alla rottura del grigliato, avvenuta a  $P = 45,5 \text{ kN}$ . Il decremento di carico in tal caso è pari al 40%.

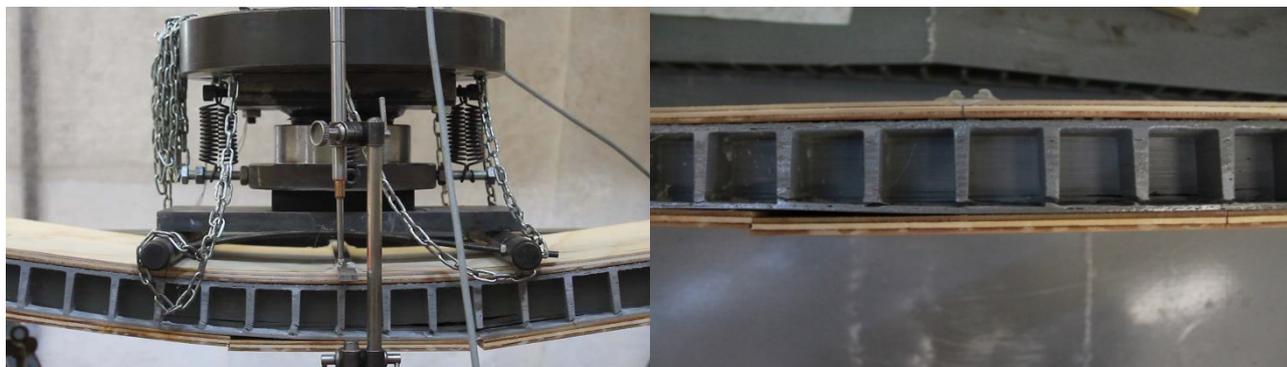


Figura B-115 Rottura dei provini

### B.3.2 SCHEDE PROVINO III.2

Il provino in oggetto si compone di un grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno, senza discontinuità alcuna nei tre strati. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è l'adesivo a base poliuretanica Sikaflex 298-FC.



Figura B-116 Installazione del provino III.2 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzera dell'impalcato.

Si tratta di una prova monotona: il campione è stato caricato fino al raggiungimento della crisi dell'impalcato e successivamente scaricato. Tale crisi avviene per rottura del grigliato nel punto di massima sollecitazione a momento, riguardando così la porzione centrale.

Nel grafico carico-spostamento si nota un punto di discontinuità coincidente con la crisi del materiale in questione, la vetroresina, in cui il carico subisce un decremento significativo a spostamento costante. Non si verifica alcuna rottura del tavolato ligneo, né all'intradosso né all'estradosso. Il motivo è riscontrabile nelle proprietà elastiche del collante utilizzato che permette uno scorrimento relativo grigliato-legno dell'ordine di qualche millimetro.

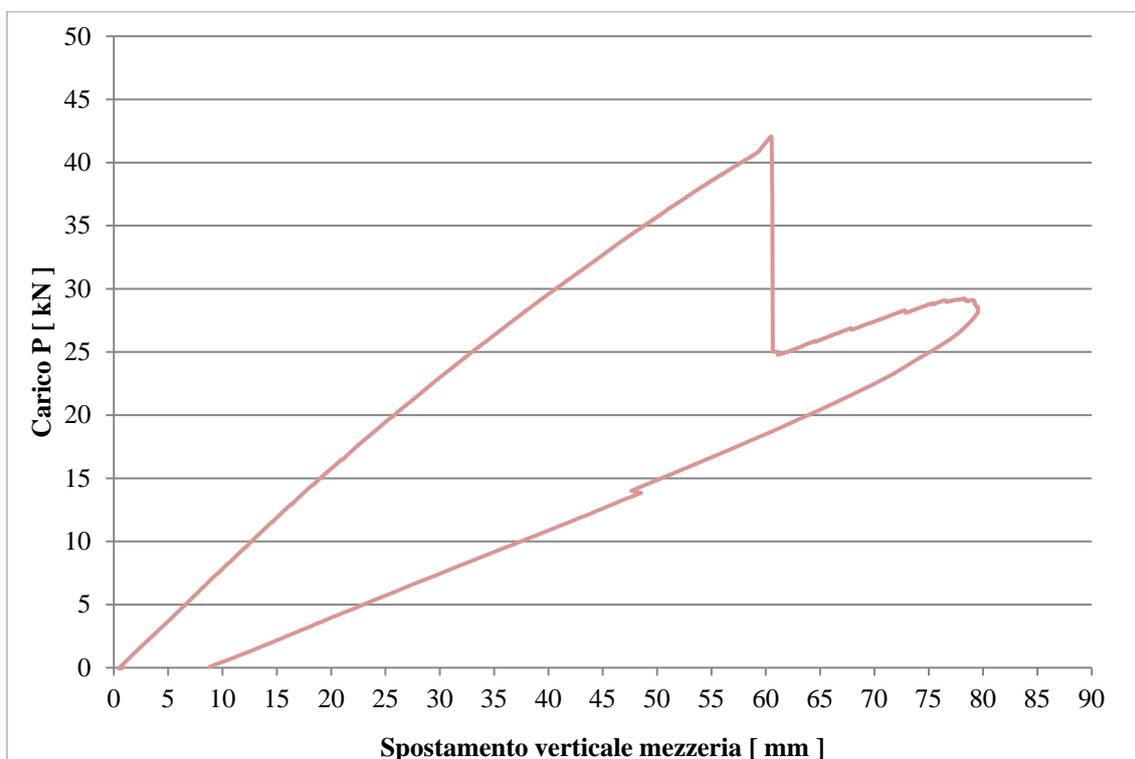


Figura B-117 Grafico carico-spostamento

Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 41,88 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{41,88}{2} = 20,94 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 60,54 \text{ mm}$$

In seguito a tale crisi, si nota una diminuzione percentuale del carico pari al 40% mantenendo il valore dello spostamento fisso.



Figura B-118 Rottura dei provini

### B.3.3 SCHEDE PROVINO III.3

Il provino in oggetto si compone di un singolo grigliato SCH 38/38\_DC intero.



Figura B-119 Installazione del provino III.3 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

Si tratta di una prova monotona: il campione è stato caricato fino al raggiungimento della crisi dell'impalcato e successivamente scaricato. Tale crisi avviene per rottura del grigliato nel punto di massima sollecitazione a momento, riguardando così la porzione centrale.

Nel grafico carico-spostamento si nota un punto di discontinuità coincidente con la crisi del pannello in cui il carico subisce un decremento significativo a spostamento costante.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 36,85 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{36,85}{2} = 18,42 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 59,60 \text{ mm}$$

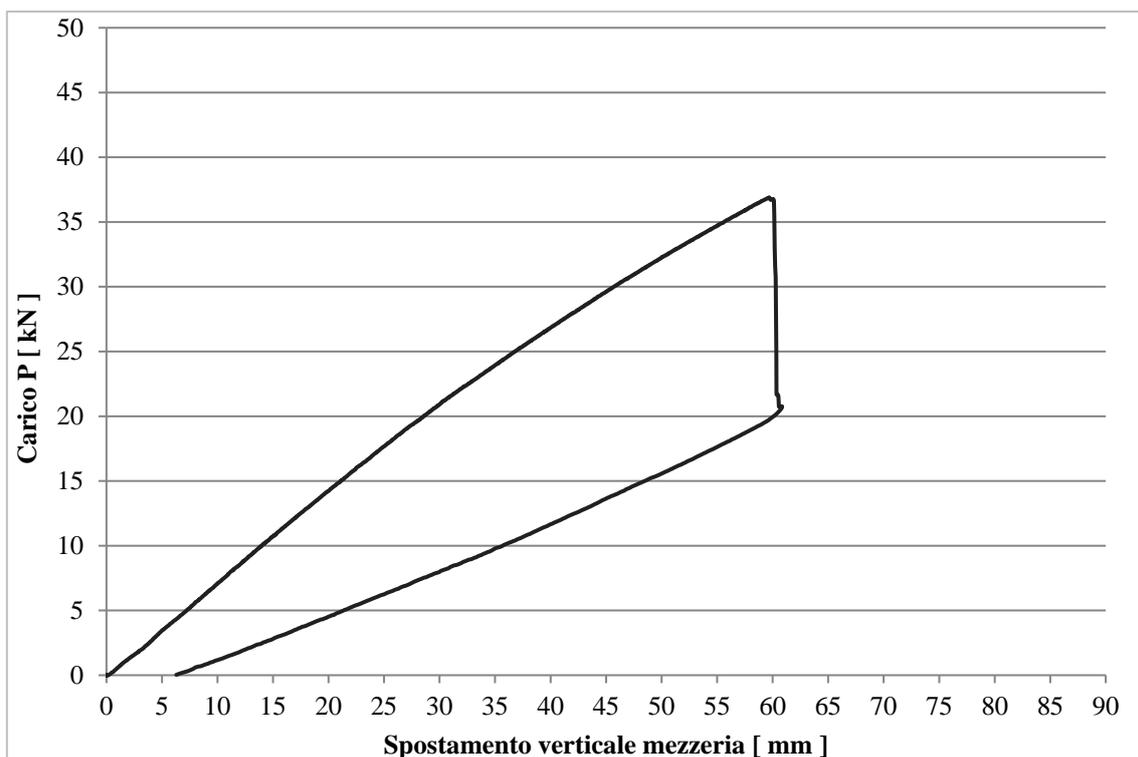
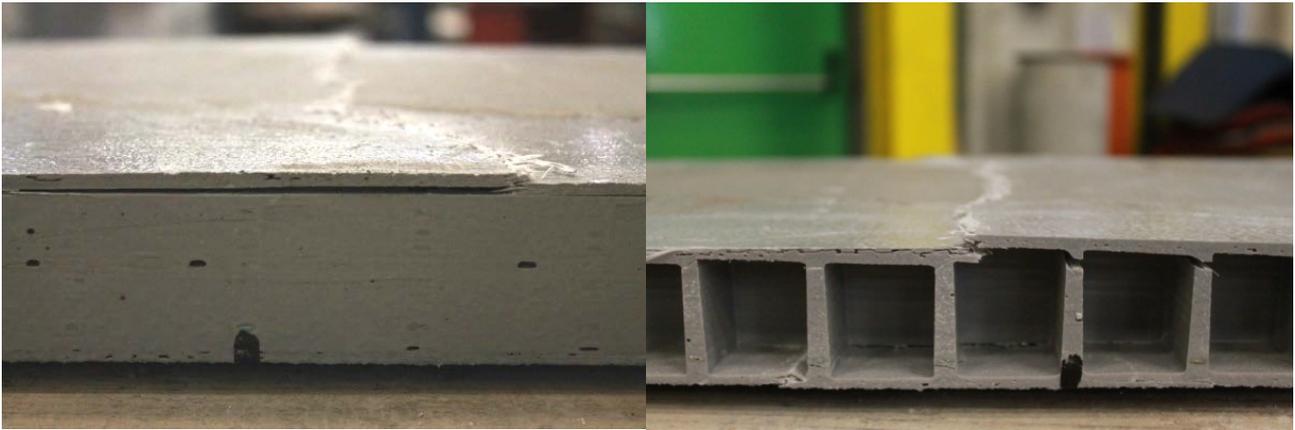


Figura B-120 Grafico carico-spostamento



*Figura I-121 Rottura dei provini*

### B.3.4 SCHEDE PROVINO III.4

Il provino in oggetto si compone di un singolo grigliato SCH 38/38 intero senza copertura.



*Figura B-122 Installazione del provino III.4 sul banco prova*

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli all'estradosso disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

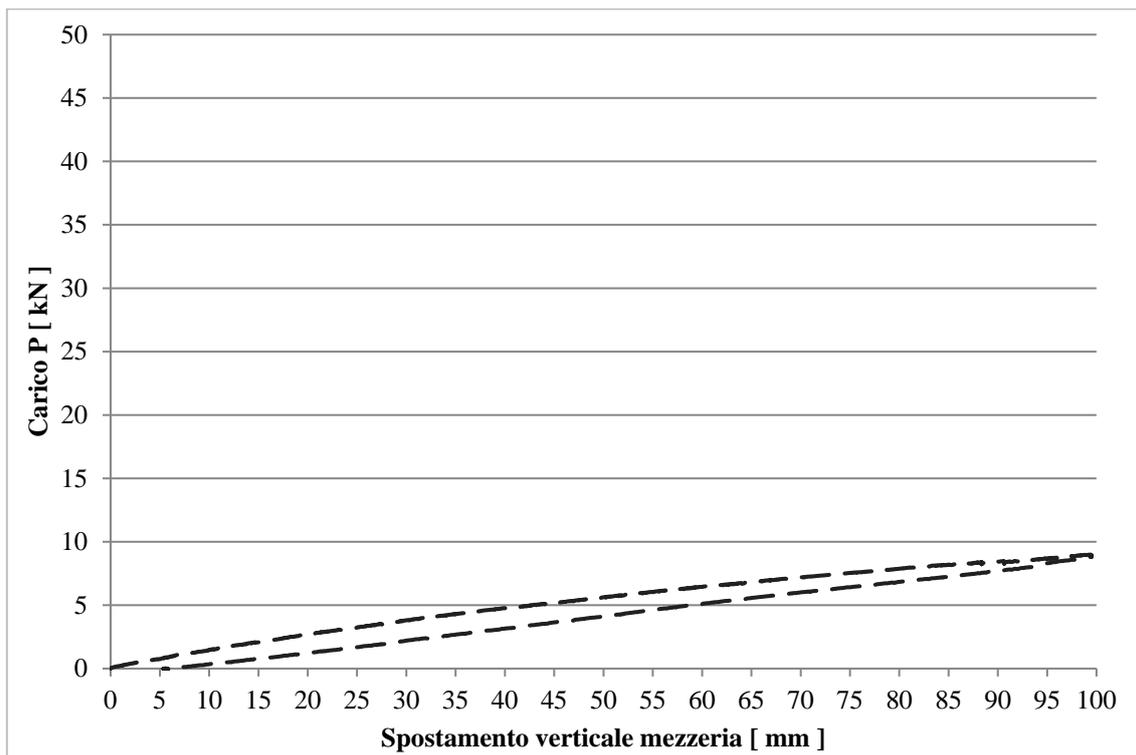


Figura B-123 Grafico carico-spostamento

Si tratta di una prova monotona differente dalle precedenti in quanto la fase di carico viene interrotta prima di raggiungere la rottura. Questo perché la deformazione raggiunge valori elevati a discapito di un basso valore di carico registrato. Al termine della prova, nel pannello, non si sono riscontrate difformità visibili o lesioni, seppur minime.

Il carico massimo raggiunto dalla prova è pari a:

$$P = 8,91 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{8,91}{2} = 4,45 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 99,5 \text{ mm}$$



Figura B-124 Deformazione massima dei provini

### B.3.5 SCHEDE PROVINO III.5

Il provino in oggetto si compone di un grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno, senza discontinuità alcuna nei tre strati. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è la resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80.

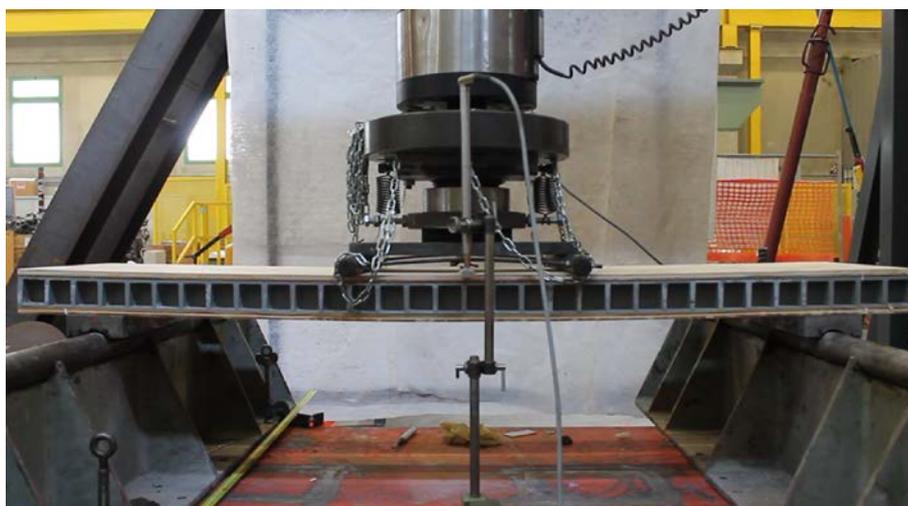


Figura B-125 Installazione del provino III.5 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si raggiungono cicli di 10 mm e 20 mm oltre i quali si verifica poi la crisi.

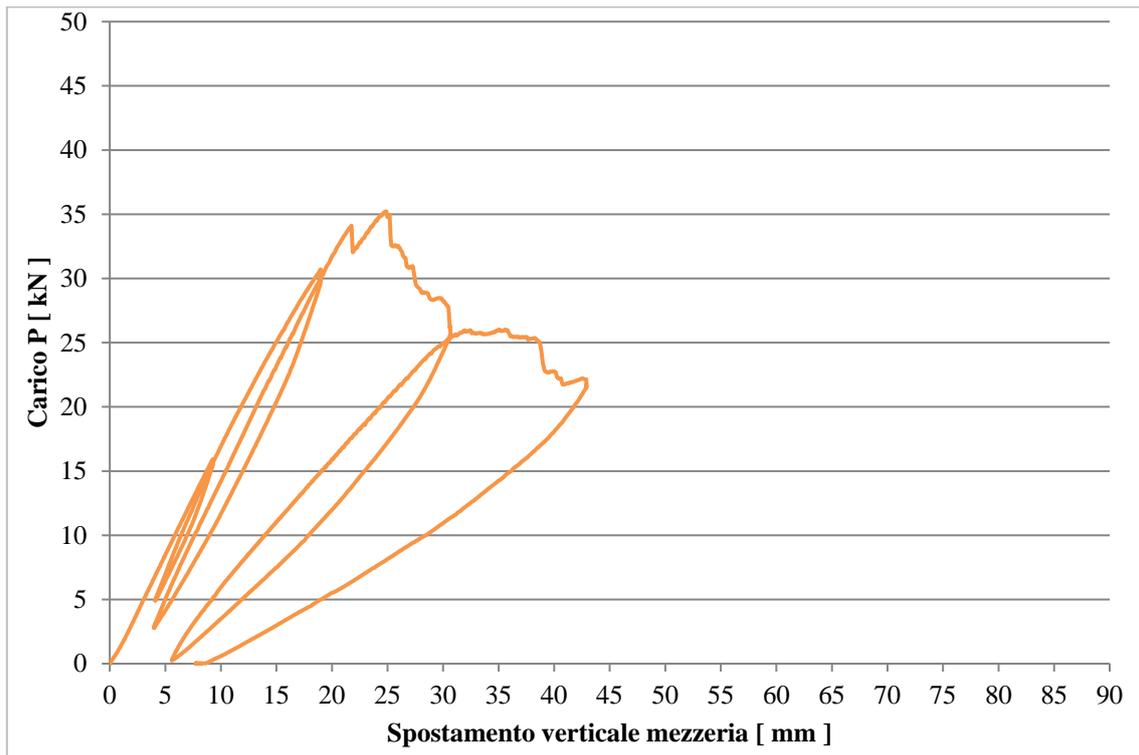


Figura B-126 Grafico carico-spostamento

Nel grafico carico-spostamento si notano due punti di discontinuità coincidenti con la crisi del pannello ligneo prima e del pannello di grigliato poi. La vicinanza di tali punti dimostra che la crisi nei due materiali avviene per carichi pressoché simili. Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 34,11 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{34,11}{2} = 17,05 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 21,76 \text{ mm}$$



Figura B-127 Rottura provini

### B.3.6 SCHEDE PROVINO III.6

Il provino in oggetto si compone di un grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno, senza discontinuità alcuna nei tre strati. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è l'adesivo a base poliuretana Sikaflex 298-FC.



Figura B-128 Installazione del provino III.6 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

Nel presente caso si hanno cicli di 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm oltre i quali si verifica poi la crisi. Al raggiungimento di ogni step, il carico viene tenuto fermo per un minuto al termine del quale ha inizio lo scarico e così via. Il motivo di questa tipologia di prova è legato alla compressione del residuo plastico cui può essere soggetto l'impalcato in esame.

Nel grafico sottostante si nota un punto di discontinuità coincidente con la crisi del materiale in questione, la vetroresina, in cui il carico subisce un decremento significativo a spostamento costante. Non si verifica alcuna rottura del tavolato ligneo, né all'intradosso né all'estradosso. Il motivo è riscontrabile nelle proprietà elastiche del collante utilizzato che permette uno scorrimento relativo grigliato-legno dell'ordine di qualche millimetro. La prova è stata portata avanti anche in seguito alla rottura. Questo ha dimostrato che il provino, anche dopo una significativa perdita di carico, può ancora compiere cicli e raggiungere carichi superiori ai 30 kN.

Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

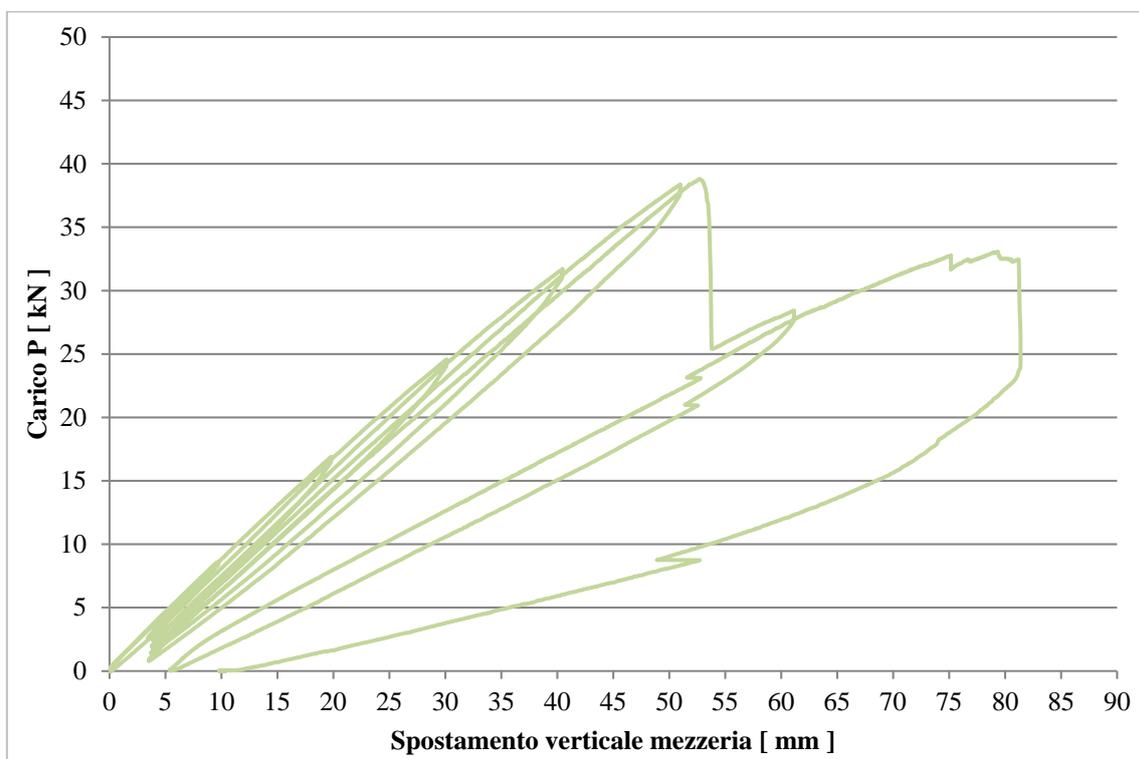


Figura B-129 Grafico carico-spostamento

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 38,82 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{38,82}{2} = 19,41 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 52,72 \text{ mm}$$

### B.3.7 SCHEDE PROVINO III.7

Il provino in oggetto si compone di un singolo grigliato SCH 38/38\_DC intero con doppia copertura.



Figura B-130 Installazione del provino III.7 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

Nel presente caso si hanno cicli di 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, oltre i quali si verifica la crisi. Nel grafico sottostante si nota un punto di discontinuità coincidente con la crisi del grigliato e un decremento significativo a spostamento costante.

La rottura avviene all'estradosso per compressione. In seguito è stato scaricato il campione ed è stato fatto nuovamente un tentativo di ricarico senza troppo successo. Come si nota dal grafico carico-spostamento, allo stesso livello di deformazione si ha un ulteriore abbassamento di carico fino ad oltre il 60 %. Questo ha dimostrato che il singolo grigliato, dopo una serie di più cicli di carico-scarico, raggiunte grandi deformazioni e con una significativa perdita di carico, non è più in grado di incrementare tali valori.

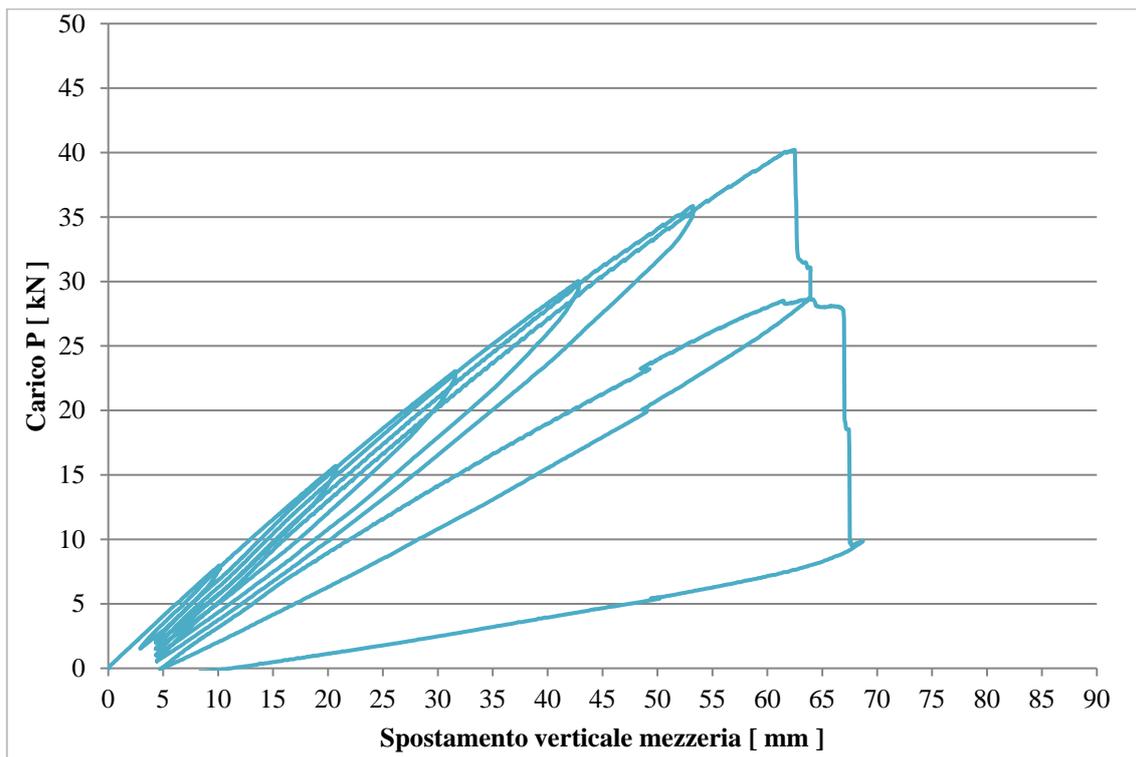


Figura B-131 Grafico carico-spostamento

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 40,21 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{40,21}{2} = 20,10 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 62,50 \text{ mm}$$



Figura B-132 Rottura provini

### B.3.8 SCHEDE PROVINO III.8

Il provino in oggetto si compone di un singolo grigliato SCH38/38 intero senza copertura.



Figura B-133 Installazione del provino III.8 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

Nel presente caso si hanno cicli di 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm oltre i quali si interrompe la prova. Questo perché la deformazione raggiunge valori elevati a discapito di un basso valore di carico registrato.

Nel grafico carico-spostamento non si notano punti di discontinuità. Nel pannello non si sono riscontrate difformità visibili o lesioni, seppur minime.

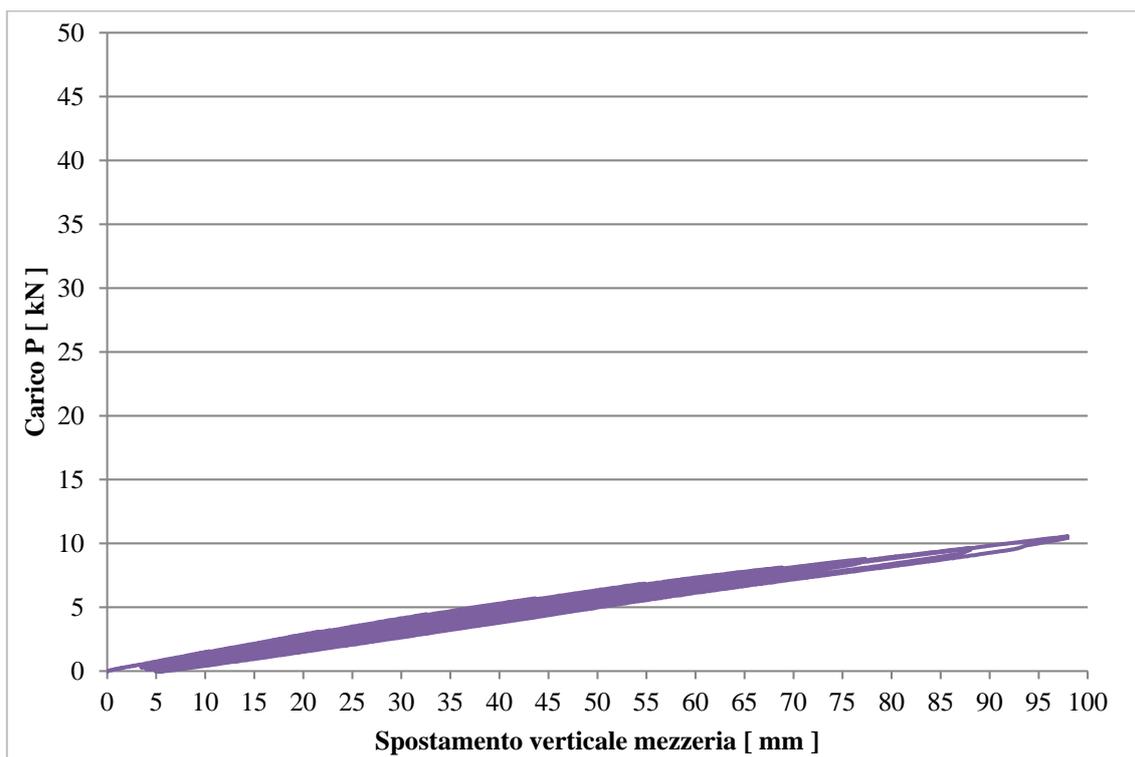


Figura B-134 Grafico carico-spostamento

Il carico massimo raggiunto dalla prova è pari a:

$$P = 10,55 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{10,55}{2} = 5,27 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 97,90 \text{ mm}$$

### B.3.9 SCHEDE PROVINO III.9

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati a due grigliati con discontinuità verticale in corrispondenza della mezzeria del campione. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è la resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80 con cui viene impregnata anche la discontinuità per garantire una migliore adesione.

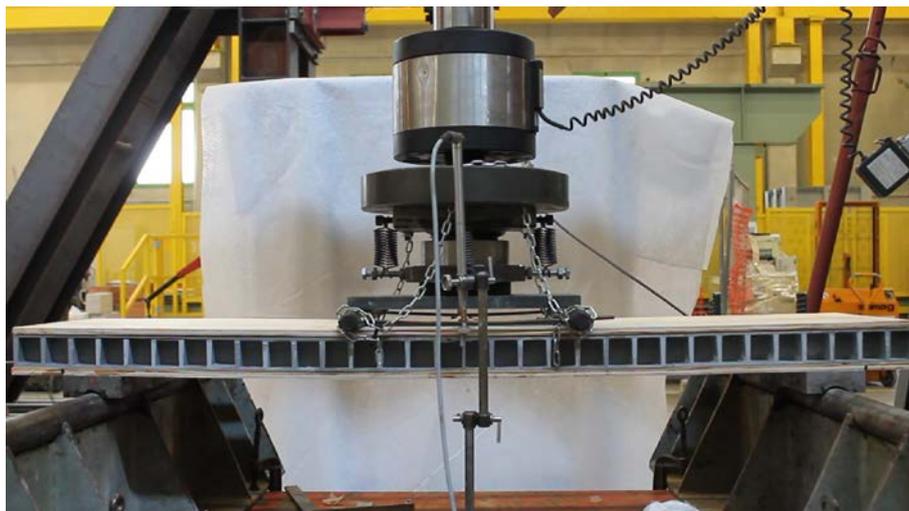


Figura B-135 Installazione del provino III.9 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si effettua un solo ciclo raggiungendo il valore di 10 mm.

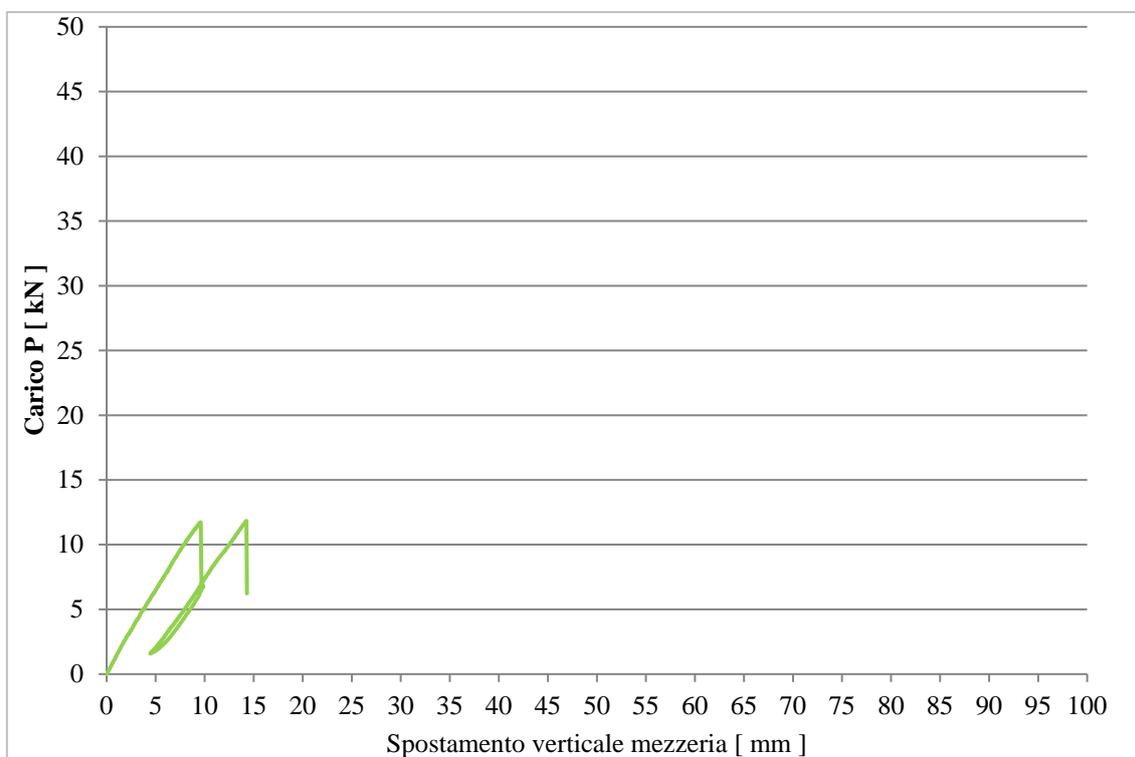


Figura B-136 Grafico carico-spostamento

Dal grafico carico-spostamento si nota un primo evidente calo di carico dovuto ad un difetto di provino: lo scollamento tra legno e grigliato si manifesta quando il carico raggiunge un valore di

circa 12 kN. Questo comporta un notevole abbassamento del carico a spostamento costante in quanto si perde la collaborazione tra i materiali per un valore pari al 50%. Tale crisi comporta una precoce rottura del pannello multistrato superiore che deve assorbire tutta la compressione generata dal momento.

In seguito, si assiste alla ripresa di carico fino allo stesso valore massimo precedentemente raggiunto, arrivando così alla rottura dei pannelli lignei superiori e inferiori. Il grigliato, che non manifesta alcun segno di rottura, perde quasi totalmente la capacità di assorbire carico il quale grava unicamente sul legno.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 11,73 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{11,73}{2} = 5,86 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 9,60 \text{ mm}$$



Figura B-137 Rottura provini

**B.3.10 SCHEDE PROVINO III.10**

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati a due grigliati con giunto all'altezza del coltello di carico, a 150 mm dalla mezzeria. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è la resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80 con cui viene impregnata anche la discontinuità per garantire una migliore adesione.

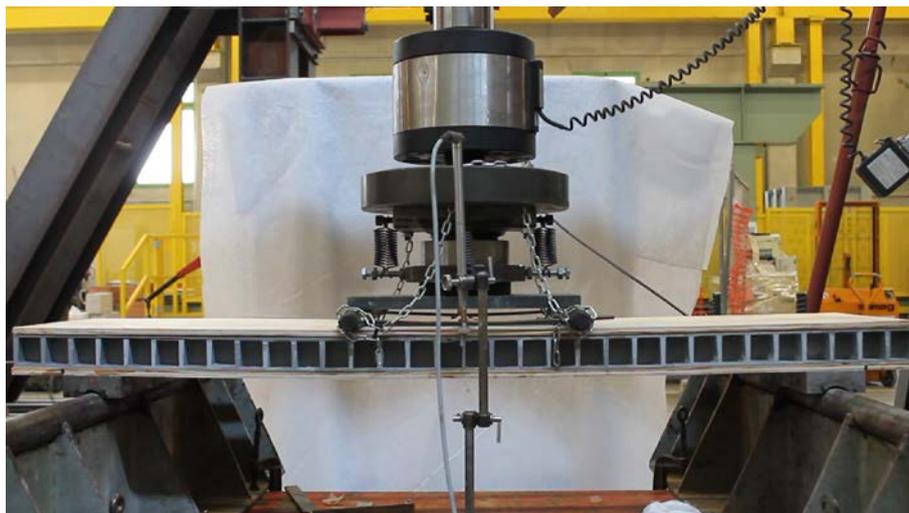


Figura B-138 Installazione del provino III.10 sul banco prova

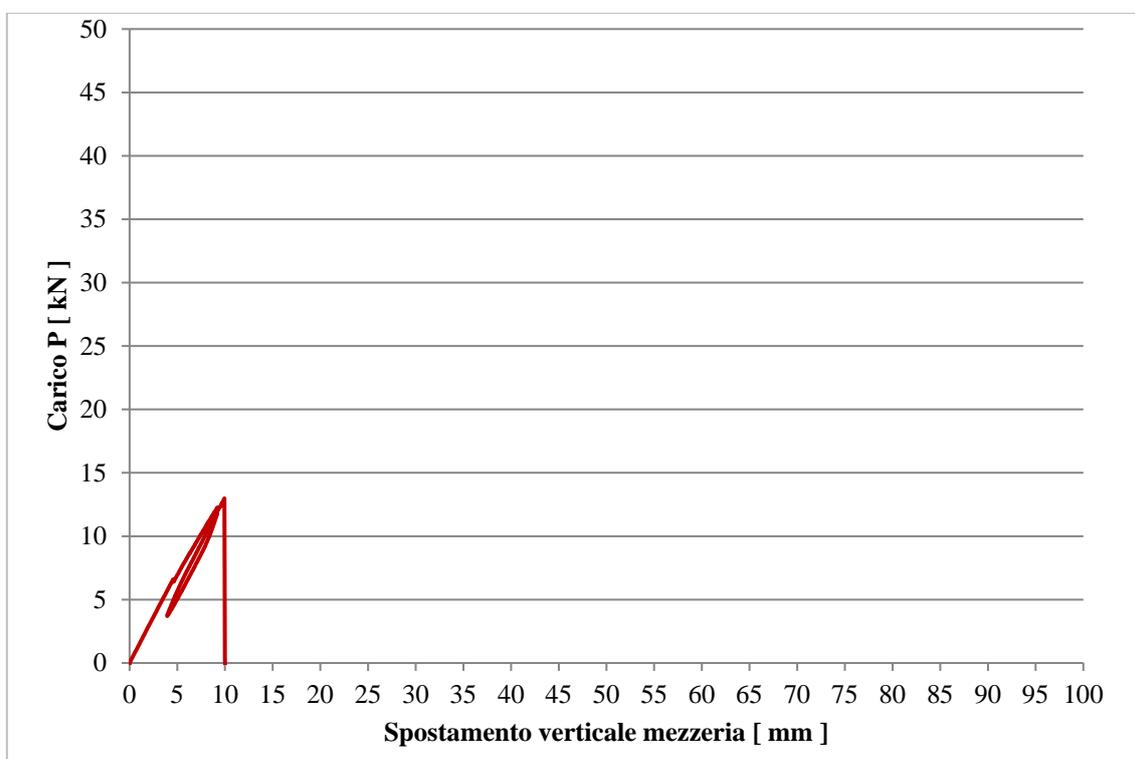


Figura B-139 Grafico carico-spostamento

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si ha solo un ciclo raggiungendo il valore di 10 mm.



Figura B-140 Rottura provini

La crisi dell'impalcato avviene per rottura a taglio del campione dovuta alla discontinuità presente in corrispondenza del coltello di ripartizione del carico. Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento legno-grigliato.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 12,98 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{12,98}{2} = 6,49 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 9,95 \text{ mm}$$

### B.3.11 SCHEDE PROVINO III.11

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati a due grigliati con discontinuità verticale in corrispondenza della mezzeria del campione. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è l'adesivo a base poliuretanicica Sikaflex 298-FC con cui viene impregnata anche la discontinuità per garantire una migliore adesione.



Figura B-141 Installazione del provino III.11 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si hanno cicli di 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm oltre i quali si verifica la crisi.

Nel grafico carico-spostamento si nota un punto di discontinuità coincidente con un decremento significativo di carico a spostamento costante. Si verifica inoltre una totale rottura del tavolato ligneo inferiore e una parziale superiore. Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 7,19 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{7,19}{2} = 3,59 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 46,97 \text{ mm}$$

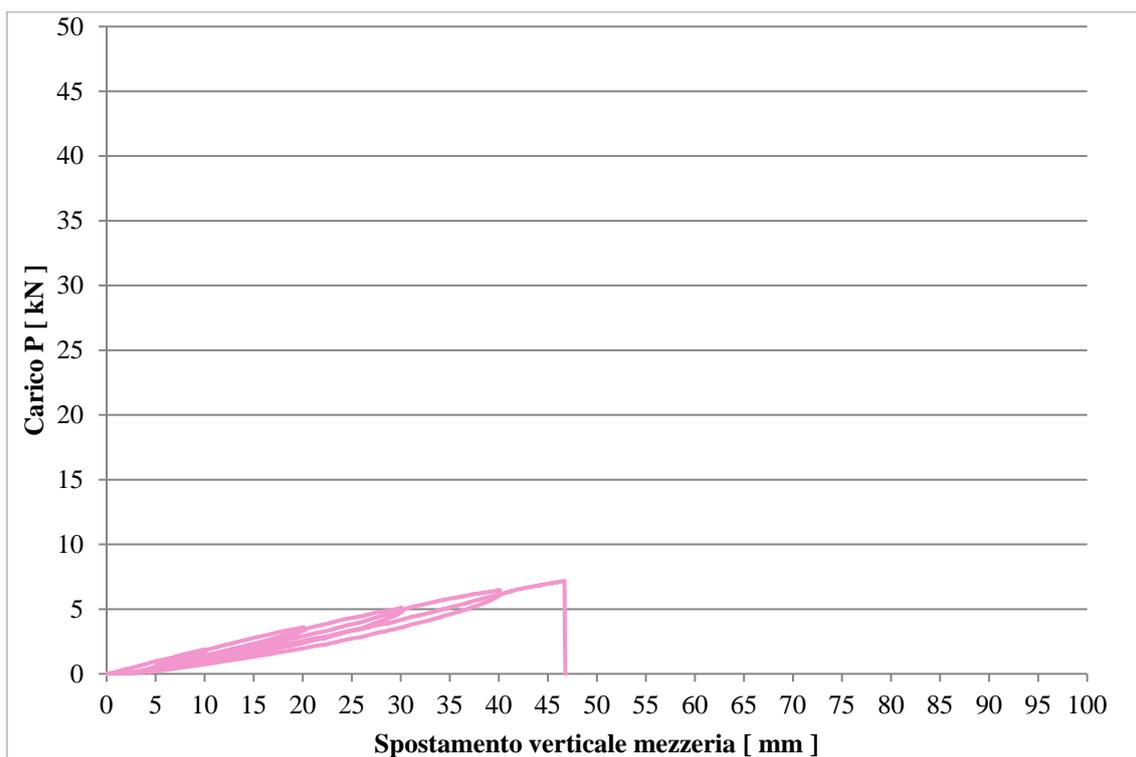


Figura B-142 Grafico carico-spostamento



Figura B-143 Rottura provini

**B.3.12 SCHEDE PROVINO III.12**

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati a due grigliati con giunto in corrispondenza giunto all'altezza del coltello di carico, a 150 mm dalla mezzeria. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è l'adesivo a base poliuretanica Sikaflex 298-FC con cui viene impregnata anche la discontinuità per garantire una migliore adesione.



Figura B-144 Installazione del provino III.12 sul banco prova

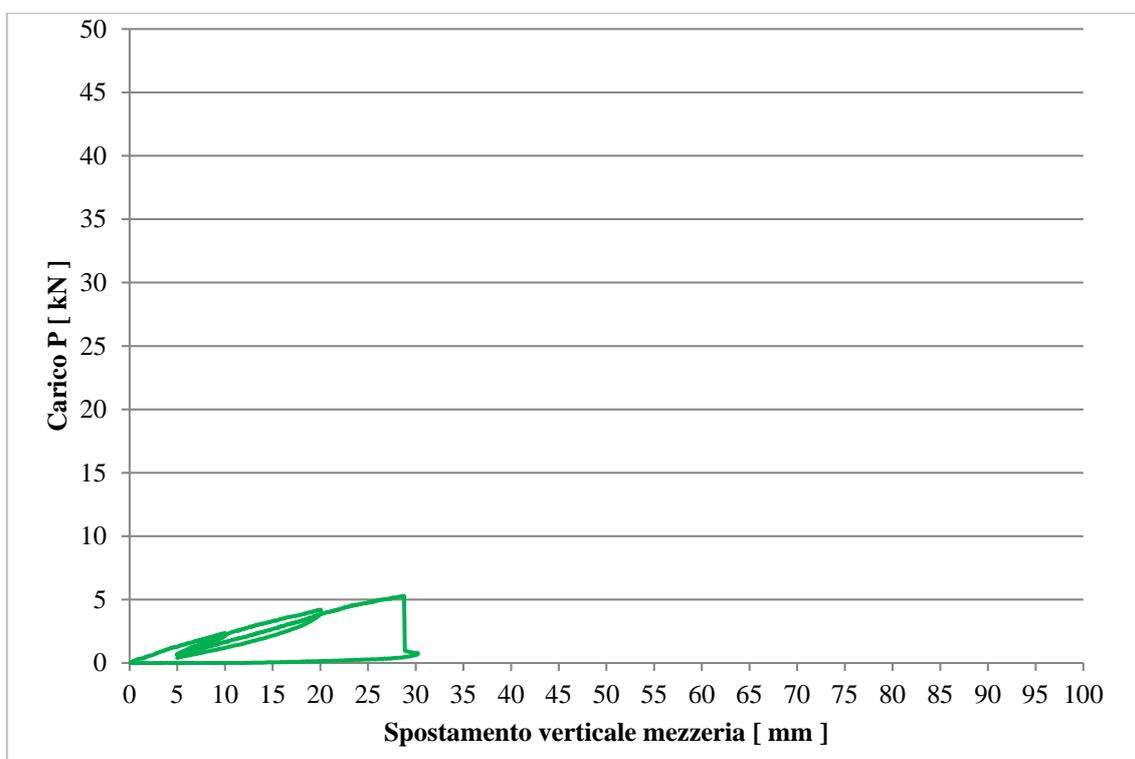


Figura B-145 Grafico carico-spostamento

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si hanno cicli di 10 mm, 20 mm oltre i quali si verifica la crisi.

Nel grafico carico-spostamento si nota un punto di discontinuità coincidente con un decremento significativo di carico a spostamento costante in cui si verifica una totale rottura del tavolato ligneo inferiore. Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari:

$$P = 5,29 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{5,29}{2} = 2,64 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 28,78 \text{ mm}$$



Figura B-146 Rottura provini

## B.3.13 SCHEDE PROVINO III.13

Il provino in oggetto si compone di un singolo grigliato SCH 38/38\_DC intero con doppia copertura. Il campione in esame, subisce un cospicuo numero di cicli di carico-scarico ad una velocità pari a 1 Hz, superiore rispetto alle precedenti prove cicliche, raggiungendo spostamenti predefiniti dell'ordine di pochi millimetri al fine di simulare una condizione di affollamento del solaio. I test durano circa 15-16 ore ciascuno.

La prova in questione, non viene svolta ai fini della determinazione del carico di rottura a fatica, ma per valutare il calo di prestazioni del materiale e il relativo abbassamento del valore del carico massimo raggiunto dopo un numero elevato di cicli.

Inoltre, essendo la macchina di prova dotata di una cella di carico a controllo di spostamento, si impone un delta tra due prefissati valori di spostamento che ne definiscono l'ampiezza. I corrispondenti valori di carico saranno notevolmente inferiori rispetto a quelli raggiunti negli altri test.

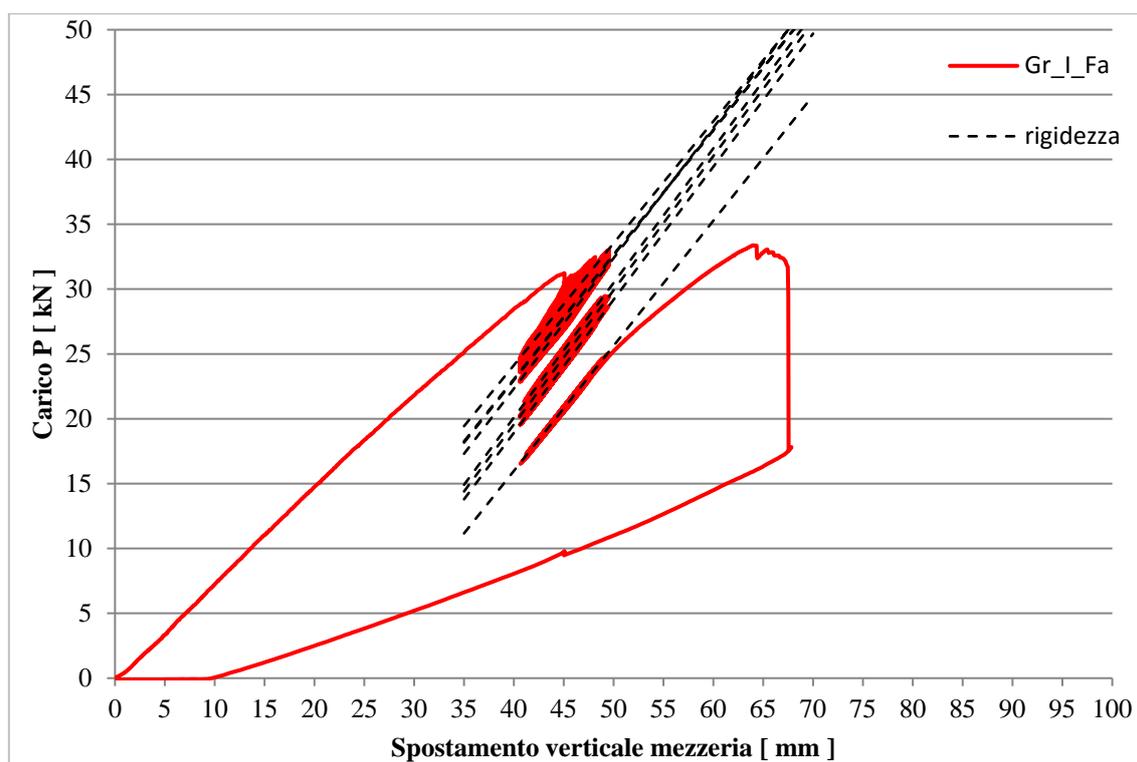


Figura B-147 Grafico carico-spostamento

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

La prova inizia con un ciclo di carico che imprime al campione una freccia iniziale pari a 45 mm. Raggiunto tale valore, si apre una seconda fase che rappresenta la prova vera e propria: una serie di oscillazioni di ampiezza pari a 10 mm, rispettivamente 5 mm di carico e 5 mm di scarico, vengono impresse al campione a partire dalla deformazione massima precedentemente raggiunta. Si conclude con un'ultima fase di carico fino al raggiungimento della crisi, dopo un numero di cicli raggiunti pari a 105.000 e una durata di 15 ore. Il test mira a valutare il comportamento dell'impalcato in seguito ad una condizione di stress accelerata in termini di carico massimo e di rigidezza.

Nel grafico carico-spostamento si distinguono principalmente 3 gruppi di oscillazioni registrati in diversi momenti di tempo durante il test. Da ciò si evince una graduale diminuzione del carico massimo a parità di spostamenti impressi e all'aumentare del numero di cicli.

Per completezza si riportano i valori numerici minimi e massimi registrati durante il test suddivisi in tre serie in ordine temporale:

- Prima serie:
  - Carico massimo: 33,01 kN
  - Carico minimo: 23,58 kN
- Seconda serie:
  - Carico massimo: 31,91 kN
  - Carico minimo: 22,85 kN
- Terza serie:
  - Carico massimo: 29,47 kN
  - Carico minimo: 21,22 kN

Riduzione del carico massimo: 11% pari a 350 kg

Riduzione del carico minimo: 10% pari a 237 kg

Le due prove riportate in seguito, rispettivamente con provino confezionato con resina e adesivo poliuretano, sono state svolte con modalità differenti al fine di simulare una reale condizione di esercizio dettata dalla presenza di un certo numero di persone passanti e in sosta sul solaio. Si è scelto di portare il provino ad una deformazione prestabilita di 12 mm al fine di simulare una reale condizione di utilizzo dell'impalcato, in uno stato di massima deformazione ammissibile da normativa, ampliata di un fattore 4.

---

**B.3.14 SCHEDE PROVINO III.14**

---

Il provino in oggetto si compone di un grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno, senza discontinuità alcuna nei tre strati. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è la resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80. Il campione in esame, subisce un cospicuo numero di cicli di carico-scarico ad una velocità pari a 1 Hz, superiore rispetto alle precedenti prove cicliche, raggiungendo spostamenti predefiniti dell'ordine di pochi millimetri al fine di simulare una condizione di affollamento del solaio. I test durano circa 15-16 ore ciascuno.

La prova in questione, non viene svolta ai fini della determinazione del carico di rottura a fatica, ma per valutare il calo di prestazioni del materiale e il relativo abbassamento del valore del carico massimo raggiunto dopo un numero elevato di cicli.

Inoltre, essendo la macchina di prova dotata di una cella di carico a controllo di spostamento, si impone un delta tra due prefissati valori di spostamento che ne definiscono l'ampiezza. I corrispondenti valori di carico saranno notevolmente inferiori rispetto a quelli raggiunti negli altri test.

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Si è scelto di portare il provino ad una deformazione prestabilita di 12 mm al fine di simulare una reale condizione di esercizio dettata dalla presenza di un certo numero di persone passanti e in sosta sul solaio, in uno stato di massima deformazione ammissibile da normativa, ampliata di un fattore 4.

La prova inizia con un ciclo di carico che imprime al campione una freccia iniziale predefinita pari a 12 mm. Raggiunto tale valore la macchina viene scaricata tornando a zero e si ripete l'operazione per altre tre volte. Questo, al fine di un controllo della stabilizzazione dei valori. In seguito, si apre una seconda fase che rappresenta la prova vera e propria: una serie di oscillazioni pari a 2 millimetri vengono impresse al campione a partire dalla deformazione massima precedentemente raggiunta.

Si conclude con una nuova serie di 3 cicli di carico-scarico nelle stesse condizioni con cui è stato fatto all'inizio. In questo modo è possibile avere un confronto preciso sul cambiamento di carattere dell'impalcato prima e dopo aver subito una condizione accelerata di stress.

Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale. L'ultima fase di carico è quella che porta al raggiungimento della crisi, dopo un numero di cicli raggiunti pari a 105.000 e una durata di 15 ore.

Nel grafico carico-spostamento vengono riportati in blu e in rosso rispettivamente i cicli interi di carico all'inizio e alla fine della prova. I suddetti cicli vengono compiuti per spostamenti definiti tra 0 e 14 mm.

I tratti in giallo, verde chiaro e scuro, invece, rappresentano gruppi di oscillazioni registrati in diversi momenti di tempo durante il test. In verde si nota subito un primo significativo abbassamento di carico che deve essere attribuito ad una perdita di pressione della macchina di prova. Il confronto, quindi, può essere valutato tra lo stato verde scuro e chiaro, di cui si riporta il valore del carico massimo e minimo delle oscillazioni registrate durante il test:

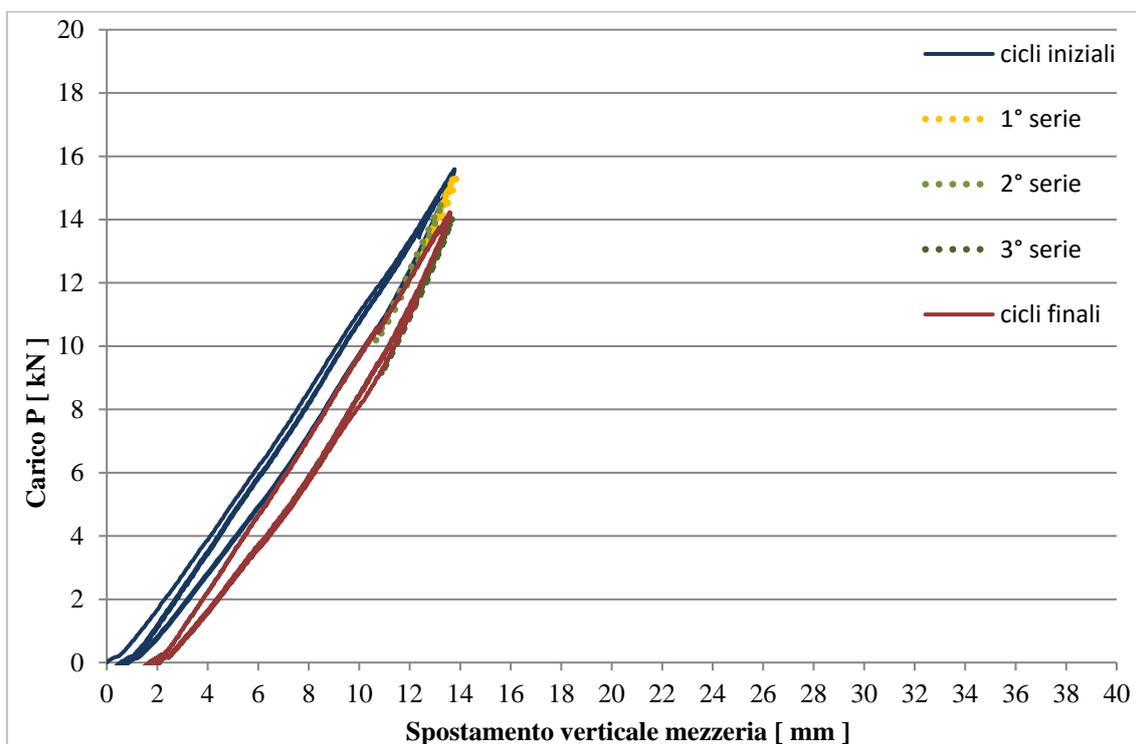


Figura B-148 Grafico carico-spostamento

- Seconda serie:
  - Carico massimo: 14,56 kN
  - Carico minimo: 10,63 kN
- Terza serie:
  - Carico massimo: 14,00 kN
  - Carico minimo: 9,05 kN

Riduzione del carico massimo 4% pari a 50 kg

Riduzione del carico minimo 15% pari a 160 kg

---

**B.3.15 SCHEDE PROVINO III.15**

---

Il provino in oggetto si compone di un grigliato interposto tra due pannelli multistrato in legno, senza discontinuità alcuna nei tre strati. Il collante utilizzato tra legno e grigliato è l'adesivo poliuretano Sikaflex 298-FC. Il campione in esame, subisce un cospicuo numero di cicli di carico-scarico ad una velocità pari a 1 Hz, superiore rispetto alle precedenti prove cicliche, raggiungendo spostamenti predefiniti dell'ordine di pochi millimetri al fine di simulare una condizione di affollamento del solaio. I test durano circa 15-16 ore ciascuno.

La prova in questione, non viene svolta ai fini della determinazione del carico di rottura a fatica, ma per valutare il calo di prestazioni del materiale e il relativo abbassamento del valore del carico massimo raggiunto dopo un numero elevato di cicli.

Inoltre, essendo la macchina di prova dotata di una cella di carico a controllo di spostamento, si impone un delta tra due prefissati valori di spostamento che ne definiscono l'ampiezza. I corrispondenti valori di carico saranno notevolmente inferiori rispetto a quelli raggiunti negli altri test.

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Si è scelto di portare il provino ad una deformazione prestabilita di 12 mm al fine di simulare una reale condizione di esercizio dettata dalla presenza di un certo numero di persone passanti e in sosta sul solaio, in uno stato di massima deformazione ammissibile da normativa, ampliata di un fattore 4.

La prova inizia con un ciclo di carico che imprime al campione una freccia iniziale predefinita pari a 12 mm. Raggiunto tale valore la macchina viene scaricata tornando a zero e si ripete l'operazione per altre tre volte. Questo, al fine di un controllo della stabilizzazione dei valori. In seguito, si apre una seconda fase che rappresenta la prova vera e propria: una serie di oscillazioni pari a 2 millimetri vengono impresse al campione a partire dalla deformazione massima precedentemente raggiunta.

Si conclude con una nuova serie di 3 cicli di carico-scarico nelle stesse condizioni con cui è stato fatto all'inizio. In questo modo è possibile avere un confronto preciso sul cambiamento di carattere dell'impalcato prima e dopo aver subito una condizione accelerata di stress.

Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale. L'ultima fase di carico è quella che porta al raggiungimento della crisi, dopo un numero di cicli raggiunti pari a 105.000 e una durata di 15 ore.

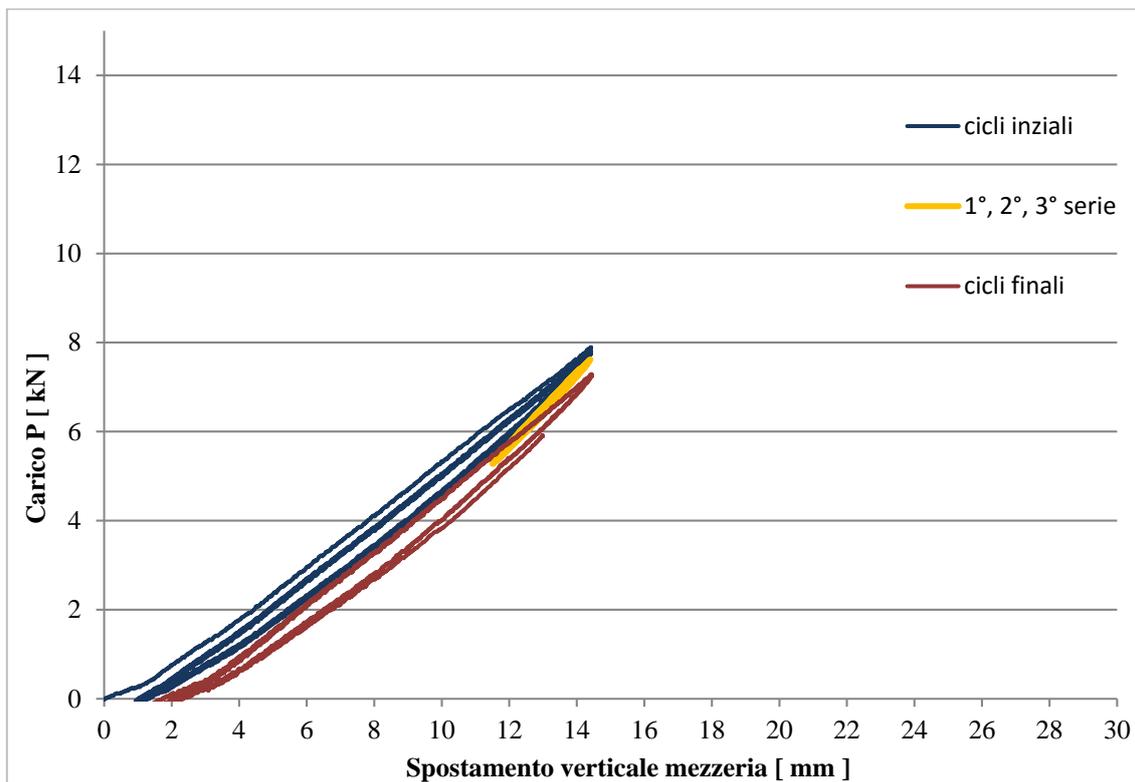


Figura B-149 Grafico carico-spostamento

Nel grafico carico-spostamento vengono riportati in blu e in rosso rispettivamente i cicli interi di carico all'inizio e alla fine della prova. I suddetti cicli vengono compiuti per spostamenti definiti tra 0 e 12 mm. I tratti in giallo, invece, rappresentano gruppi di oscillazioni registrati in momenti di tempo centrali del test.

Si riporta il valore del carico massimo e minimo delle oscillazioni registrate durante il test:

- Carico massimo iniziale: 7,90 kN
- Carico massimo serie: 7,62 kN
- Carico minimo serie: 5,28 kN
- Carico massimo finale: 7,29 kN

Riduzione del carico massimo 8% pari a 60 kg

### B.3.16 SCHEDE PROVINO III.16

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati tra loro con resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80 e incollati poi alla superficie superiore del grigliato

sempre con la resina Biresin® cr82+Biresin® ch80. Il campione di impalcato in oggetto, quindi, presenta una sezione con legno all'estradosso e grigliato all'intradosso.



Figura B-150 Installazione del provino III.16 sul banco prova

È interessante notare che questo è il primo campione confezionato con resina in cui non si verifica prima la rottura del legno ma direttamente quella del grigliato.

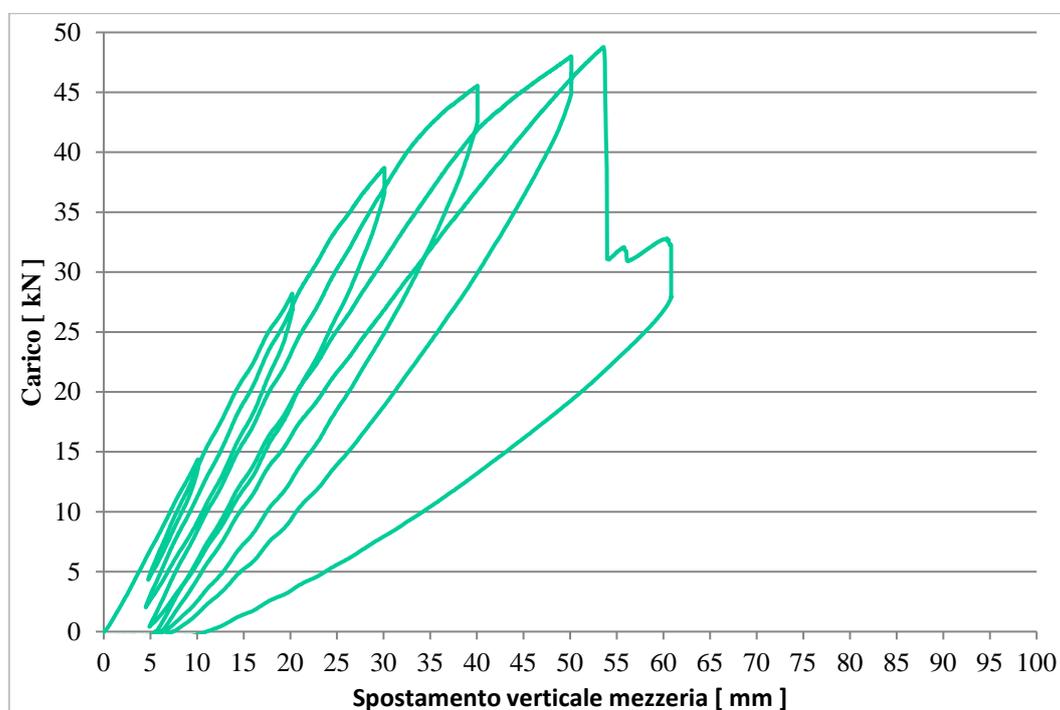


Figura B-151 Grafico carico-spostamento

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 48,79 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{48,79}{2} = 24,39 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 53,58 \text{ mm}$$



*Figura B-152 Rottura provino*

---

### B.3.17 SCHEDE PROVINO III.17

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati tra loro con resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80 e incollati poi alla superficie superiore del grigliato sempre con la resina Biresin® cr82+Biresin® ch80. Il campione di impalcato in oggetto, quindi, presenta una sezione con grigliato all'estradosso e legno all'intradosso.



Figura B-153 Installazione del provino III.17 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si hanno cicli di carico pari a 10 mm, 20 mm, oltre i quali si verifica la crisi.

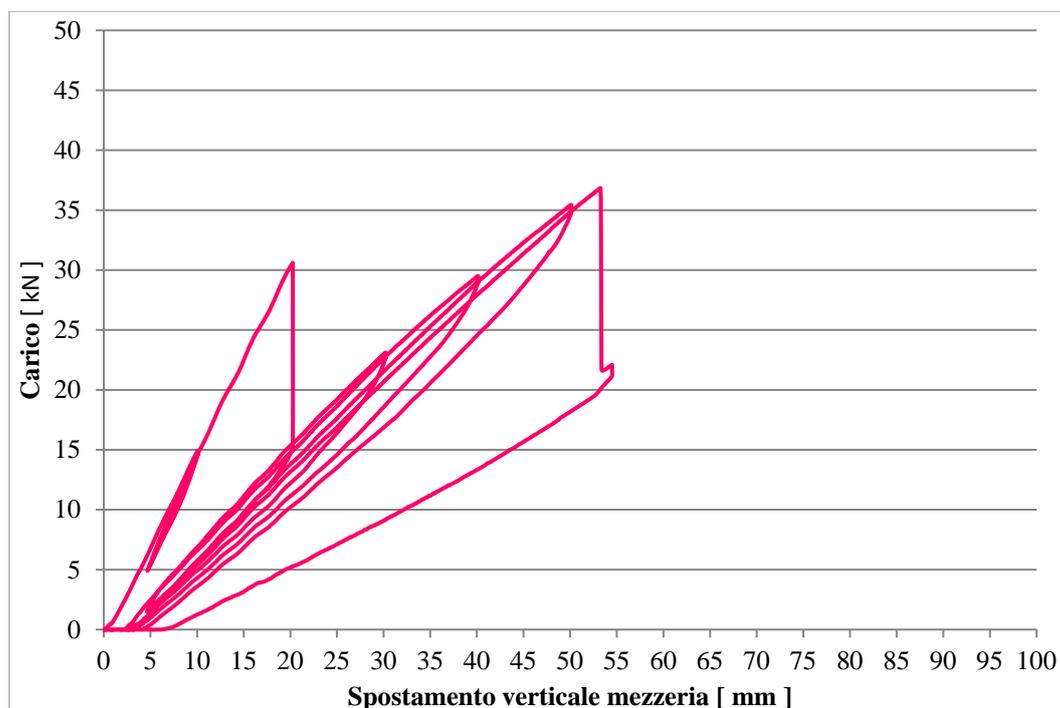


Figura B-154 Grafico carico-spostamento

Nel grafico carico-spostamento si riesce a distinguere il punto di rottura del legno con un abbassamento percentuale del carico pari al 52%. È interessante notare che continuando a caricare il

campione, questo, è in grado di prendere ulteriori carichi fino a raggiungere valori superiori a quello di rottura.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 30,41 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{30,41}{2} = 15,20 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 20,27 \text{ mm}$$



Figura B-155 Rottura provino

### B.3.18 SCHEDE PROVINO III.18

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati tra loro con resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80 e incollati poi alla superficie superiore del grigliato con l'adesivo poliuretano SikaFlex 298-FC. Il campione di impalcato in oggetto, quindi, presenta una sezione con legno all'estradosso e grigliato all'intradosso.



Figura B-156 Installazione del provino III.18 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato.

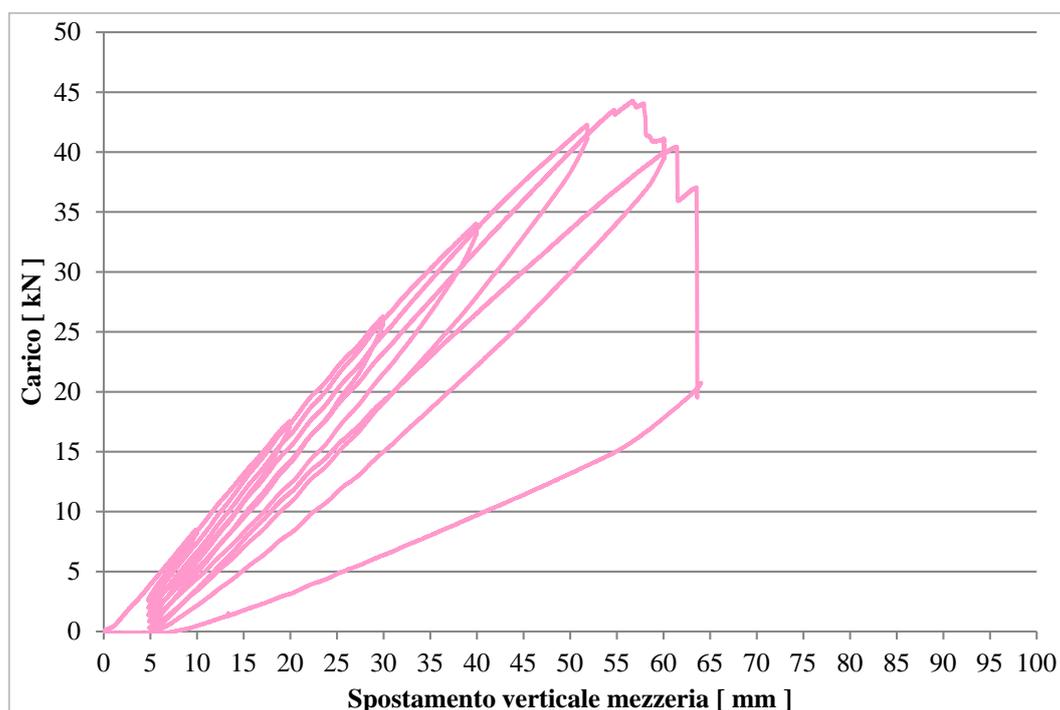


Figura B-157 Grafico carico-spostamento

Nel presente caso si hanno cicli di carico pari a 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, oltre i quali si verifica la crisi. Nel grafico carico-spostamento si riesce a leggere la graduale rottura del grigliato che passa attraverso un graduale abbassamento di carico in una prima fase che coincide con

il progressivo distacco dei travetti del grigliato stesso dall'ala inferiore. Si verifica così una seconda fase caratterizzata da una sostanziale caduta di valori.

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 44,19 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{44,19}{2} = 22,09 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{max} = 56,58 \text{ mm}$$



Figura B-158 Rottura provino

### B.3.19 SCHEDE PROVINO III.19

Il provino in oggetto si compone di due pannelli multistrato in legno accoppiati tra loro con resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80 e incollati poi alla superficie superiore del grigliato con l'adesivo poliuretano Sikaflex 298-FC. Il campione di impalcato in oggetto, quindi, presenta una sezione con legno all'estradosso e grigliato all'intradosso.



Figura B-159 Installazione del provino III.19 sul banco prova

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria dell'impalcato. Nel presente caso si hanno cicli di carico pari a 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, oltre i quali si verifica la crisi. Tale crisi è dovuta alla rottura del grigliato in corrispondenza dell'ala superiore.

Nel grafico carico-spostamento si riesce a leggere la netta rottura del grigliato con un abbassamento di carico pari oltre al 50%.

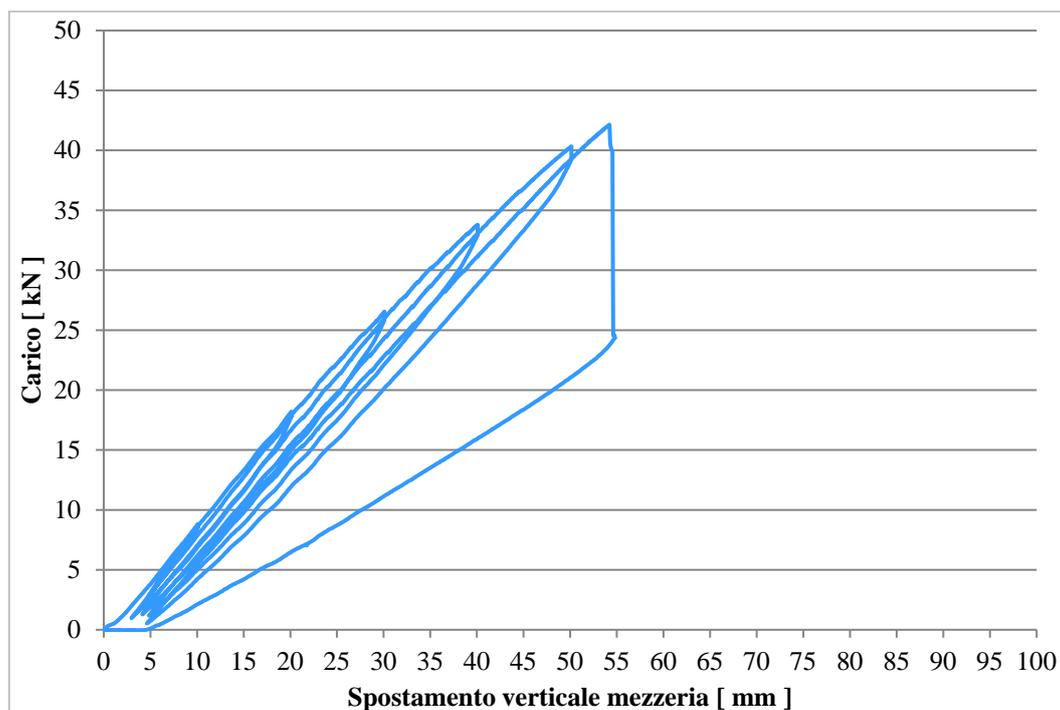


Figura B-160 Grafico carico-spostamento

La crisi dell'impalcato si considera raggiunta quando si arriva alla rottura del grigliato con un carico pari a:

$$P = 42,15 \text{ kN}$$

Risalendo alla forza ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{42,15}{2} = 21,07 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzzeria è:

$$f_{max} = 54,19 \text{ mm}$$



Figura B-161 Rottura provino

### B.3.20 SCHEDE PROVINO III.20

Il provino in oggetto si compone di due grigliati accostati in direzione della lunghezza e interposti tra quattro pannelli multistrato in legno, rispettivamente due inferiori e due superiori. Tali pannelli presentano differenti larghezze pari a 200 e 400 mm, il cui accostamento sfalsato rispetto all'interruzione presente nel grigliato garantendo 100 mm di battentatura tra legno e grigliato sia all'estradosso che all'intradosso del campione. Il collante utilizzato all'interfaccia dei due materiali è

la resina epossidica Biresin® cr82+Biresin® ch80. I tastatori per il controllo delle deformazioni vengono posizionati lungo la mezzeria del provino. Due in prossimità dei bordi esterni e uno al centro.



*Figura B-162 Installazione del provino III.20 sul banco prova*

In seguito alla disposizione del provino sugli appoggi si procede con la fase di carico attraverso una pressa idraulica, la cui forza totale è ripartita tra due coltelli posizionati all'estradosso e disposti simmetricamente rispetto alla lunghezza dell'impalcato e asimmetricamente rispetto alla larghezza. Si tratta di una prova ciclica in cui si raggiungono cicli di 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm oltre i quali si verifica poi la crisi.

Nel grafico carico-spostamento si notano due punti di discontinuità coincidenti con la crisi del pannello ligneo prima e del pannello di grigliato poi. La vicinanza di tali punti dimostra che la crisi nei due materiali avviene per carichi pressoché simili.

In seguito alla rottura del pannello multistrato ligneo inferiore, la prova è stata portata avanti fino al raggiungimento di un significativo abbassamento di carico che avviene con la rottura del grigliato. Durante la prova non si sono riscontrati problemi relativi allo scollamento tra pannelli o altri difetti di materiale.

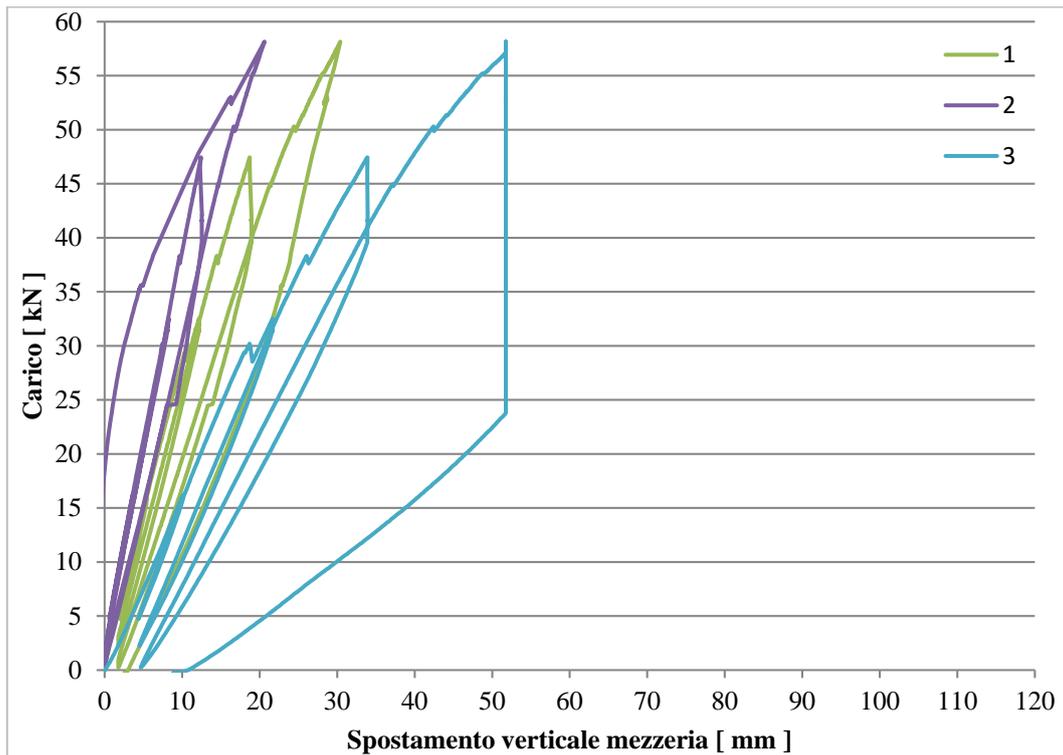


Figura B-163 Grafico carico-spostamento

Si riportano i tre valori delle frecce raggiunte sotto i tastatori alla crisi dell'impalcato considerata quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 47,38 \text{ kN}$$

Risalendo alle rispettive forze ripartite sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{47,38}{2} = 23,69 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{1max} = 12,40 \text{ mm}$$

$$f_{2max} = 18,68 \text{ mm}$$

$$f_{3max} = 33,91 \text{ mm}$$

Durante la prova si assiste a fenomeni di punzonamento dovuti all'asimmetria dei coltelli di carico rispetto al provino. La configurazione doppia mostra valori di carico superiori rispetto al provino con grigliato singolo e deformazioni minori. La battentatura, del legno fornisce una risposta

efficacie al comportamento a piastra. Si riporta la pianta del provino e i relativi abbassamenti in corrispondenza dei punti rilevati per un carico fissato alla quota 30 kN, prima della crisi.



Figura B-164 Foto della prova e del punzonamento del pannello

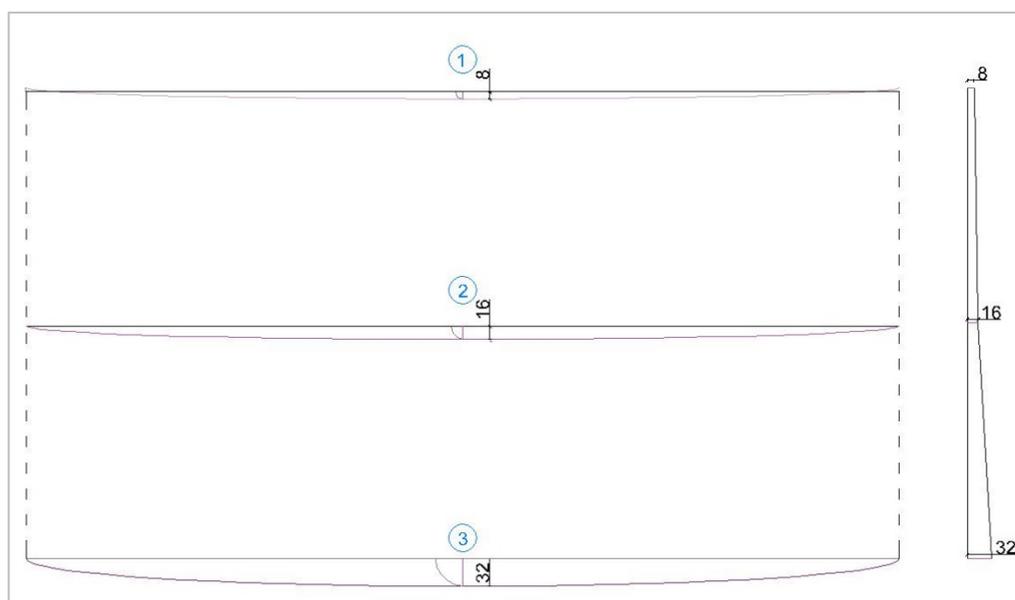


Figura B-165 Abbassamenti mezzeria

### B.3.21 SCHEDE PROVINO III.20

Il provino in oggetto si compone di due grigliati accostati in direzione della lunghezza e interposti tra quattro pannelli multistrato in legno, rispettivamente due inferiori e due superiori. Tali pannelli presentano differenti larghezze pari a 200 e 400 mm, il cui accostamento sfalsato rispetto all'interruzione presente nel grigliato garantendo 100 mm di battentatura tra legno e grigliato sia all'estradosso che all'intradosso del campione

Il collante utilizzato all'interfaccia dei due materiali è l'adesivo a base poliuretanica Sikaflex 298-FC.



Figura B-166 Installazione del provino III.21 sul banco prova

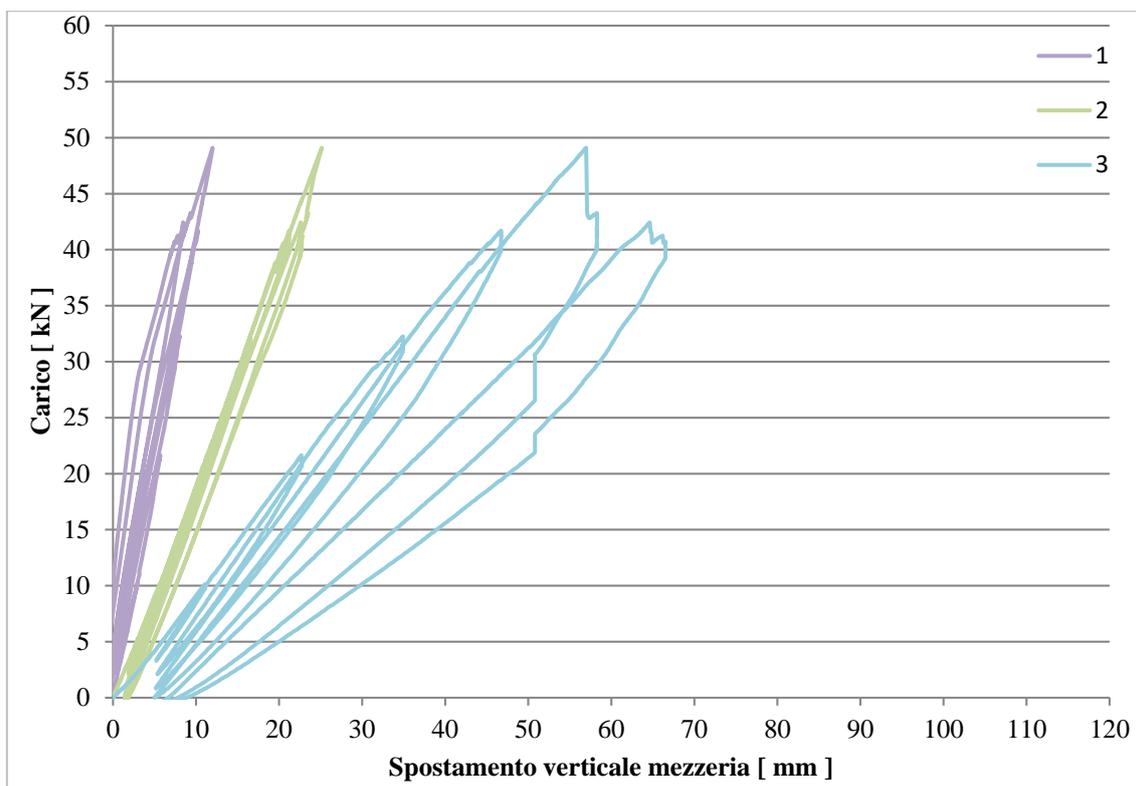


Figura B-167 Grafico carico-spostamento

Si riportano i tre valori delle frecce raggiunte sotto i tastatori alla crisi dell'impalcato considerata quando si arriva alla rottura del legno con un carico pari a:

$$P = 49,10 \text{ kN}$$

Risalendo alle rispettive forze ripartita sui coltelli si ha:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{49,10}{2} = 24,55 \text{ kN}$$

Lo spostamento massimo registrato in mezzeria è:

$$f_{1max} = 12,00 \text{ mm}$$

$$f_{2max} = 25,15 \text{ mm}$$

$$f_{3max} = 56,97 \text{ mm}$$

Durante la prova si assiste a fenomeni di punzonamento dovuti all'asimmetria dei coltelli di carico rispetto al provino. La configurazione doppia mostra valori di carico superiori rispetto al provino con grigliato singolo e deformazioni minori. La battentatura, del legno fornisce una risposta efficace al comportamento a piastra. Si riporta la pianta del provino e i relativi abbassamenti in corrispondenza dei punti rilevati per un carico fissato alla quota 49 kN, prima della crisi.



Figura B-168 Foto della prova e del punzonamento del pannello

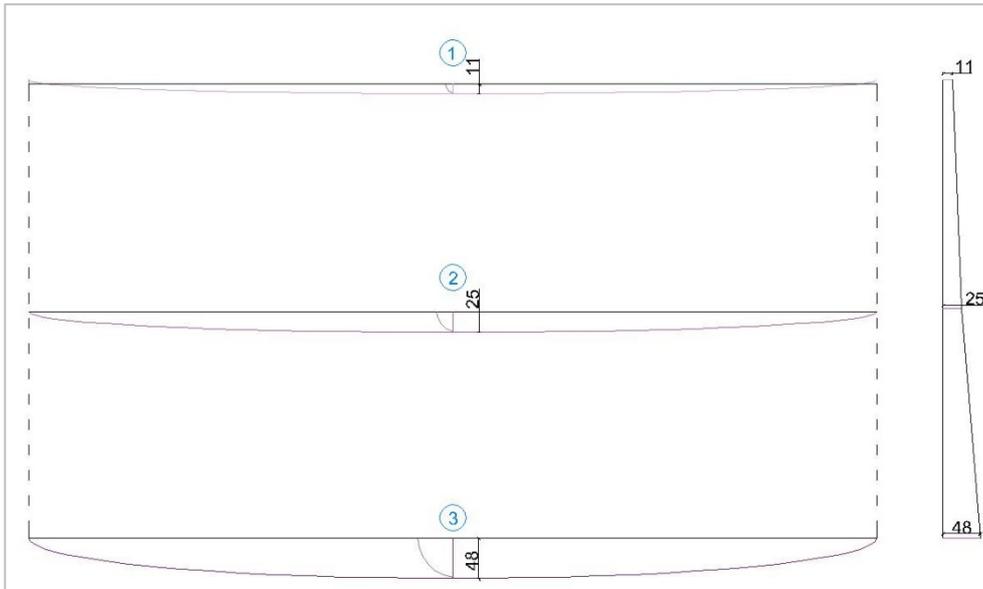


Figura B-169 Abbassamenti mezzeria

# INDICE DELLE FIGURE

## I - PRINCIPI, CRITERI E MODELLI

Figura 1-1 Dymaxion House, R. B. Fuller ( <a href="https://www.inverse.com/article/13715-forget-geodesic-domes-buckminster-fuller-s-dymaxion-house-was-his-masterpiece">https://www.inverse.com/article/13715-forget-geodesic-domes-buckminster-fuller-s-dymaxion-house-was-his-masterpiece</a> - <a href="http://www.archdaily.com/401528/ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller/51dedd14e8e44e6873000002-ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller-image">http://www.archdaily.com/401528/ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller/51dedd14e8e44e6873000002-ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller-image</a> ) .....	46
Figura 1-2 La Maison du Peuple, Clichy (au moment de son ouverture en 1939) Photo © Musée in Commune Roma .....	46
Figura 1-3 MVRDV, Silodam, Amsterdam. (1995-2003) ( <a href="https://www.mvrdv.nl/en/projects/mirador">https://www.mvrdv.nl/en/projects/mirador</a> ).....	47
Figura 1-4 MVRDV, Mirador, Madrid. (2001-2002) ( <a href="https://www.mvrdv.nl/en/projects/mirador">https://www.mvrdv.nl/en/projects/mirador</a> ).....	48
Figura 1-5 Steven Holl - Void space / Hinged space, Housing in Fukuoka, Japan. (1991) - esterni ( <a href="http://www.stevenholl.com/projects/fukuoka-housing">http://www.stevenholl.com/projects/fukuoka-housing</a> ) .....	48
Figura 1-6 Steven Holl - Void space / Hinged space, Housing in Fukuoka, Japan. (1991) - interni ( <a href="http://www.stevenholl.com/projects/fukuoka-housing">http://www.stevenholl.com/projects/fukuoka-housing</a> ) .....	49
Figura 1-7 Shigeru Ban, FURNITURE HOUSE 1 - Yamanashi, Japan, 1995 - esterni ( <a href="http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html">http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html</a> ) .....	49
Figura 1-8 Shigeru Ban, FURNITURE HOUSE 1 - Yamanashi, Japan, 1995 - fasi di Costruzione ( <a href="http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html">http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_furniture-house-1/index.html</a> ).....	50
Figura 1-9 Quinta Monroy, social housing, Chile, Studio Elemental, 2003-2005 - Schema distributivo e possibili espansioni: piano terra, piano primo e secondo in duplex .....	50
Figura 1-10 Quinta Monroy, social housing, Chile, Studio Elemental, 2003-2005 – Variazioni volumetriche nel tempo ( <a href="http://www.elementalchile.cl/en/projects/quinta-monroy/">http://www.elementalchile.cl/en/projects/quinta-monroy/</a> ) .....	51
Figura 1-11 Ikea & Skanska, Boklok. Procedura di installazione. ( <a href="https://medium.com/@bartholomewhearn/the-flat-pack-taken-to-the-next-level-the-boklok-concept-26078e433b3f">https://medium.com/@bartholomewhearn/the-flat-pack-taken-to-the-next-level-the-boklok-concept-26078e433b3f</a> ) .....	51
Figura 1-12 Ikea & Skanska, Boklok. Differenti declinazioni del sistema. ( <a href="https://www.boklok.com/about-the-BoKlok-concept/">https://www.boklok.com/about-the-BoKlok-concept/</a> ) .....	52
Figura 1-13 Matteo Thun, Prefab Heidis House (1999) ( <a href="https://www.designboom.com/interviews/designboom-interview-matteo-thun/">https://www.designboom.com/interviews/designboom-interview-matteo-thun/</a> ).....	53
Figura 1-14 P. Spadolini, MAPI Modulo Abitativo di Pronto Impiego (1984). Meccanismo di trasformazione. ( <a href="http://ordine.architettilroma.it/archivio-50-anni/polidori-massimo/">http://ordine.architettilroma.it/archivio-50-anni/polidori-massimo/</a> ) .....	56
Figura 1-15 LOT-EK, MDU Harbors (2003). Esterni. ( <a href="http://www.lot-ek.com/MDU-Mobile-Dwelling-Unit">http://www.lot-ek.com/MDU-Mobile-Dwelling-Unit</a> ) .....	57
Figura 1-16 LOT-EK, MDU Harbors (2003). Interni. ( <a href="http://www.lot-ek.com/MDU-Mobile-Dwelling-Unit">http://www.lot-ek.com/MDU-Mobile-Dwelling-Unit</a> ) .....	57
Figura 1-17 Shigeru Ban, Paper Loghouse (1995) ( <a href="http://indayear2studio-1314s1.blogspot.it/2013/09/pins-case-study-shigeru-bans-paper-log.html#.WeR8CWi0OHs">http://indayear2studio-1314s1.blogspot.it/2013/09/pins-case-study-shigeru-bans-paper-log.html#.WeR8CWi0OHs</a> ).....	58
Figura 1-18 Shigeru Ban, Padiglione per l'Expo, Hannover (2000) ( <a href="https://focusarchitettura.wordpress.com/2014/04/05/shigeru-ban-architettura-di-carta/">https://focusarchitettura.wordpress.com/2014/04/05/shigeru-ban-architettura-di-carta/</a> ) .....	59
Figura 1-19 Shigeru Ban, Cardboard Cathedral, Christchurch, New Zeland (2013). ( <a href="http://www.archdaily.com/413224/shigeru-ban-completes-cardboard-cathedral-in-new-zealand">http://www.archdaily.com/413224/shigeru-ban-completes-cardboard-cathedral-in-new-zealand</a> ).....	59

Figura 1-20	Renzo Piano, Diogene – Unità abitativa minima autosufficiente (2013). ( <a href="http://buromilan.com/project/diogene-unita-abitativa-minima-autosufficiente/">http://buromilan.com/project/diogene-unita-abitativa-minima-autosufficiente/</a> )	60
Figura 1-21	Peter Zumthor, Padiglione Svizzero per Expo (2000). parete e sistema di post-compressione	61
Figura 1-22	Herzog & De Meuron, Dominus Vinery, Yountville (USA) (1998)	61
Figura 1-23	TriPod Housing System, progetto open source (2014). ( <a href="http://www.genitronsviluppo.com/2009/02/26/casa-prefabbricata-plug-and-play-tripod/">http://www.genitronsviluppo.com/2009/02/26/casa-prefabbricata-plug-and-play-tripod/</a> )	63
Figura 1-24	Hickory Group, One9, Melbourne (2013). ( <a href="https://inhabitat.com/one9-nine-story-prefab-apartment-tower-was-installed-in-just-five-days/one9-by-hickory-group-3">https://inhabitat.com/one9-nine-story-prefab-apartment-tower-was-installed-in-just-five-days/one9-by-hickory-group-3</a> )	64
Figura 1-25	ShoP Architects, Atlantic Yards Modular Tower, Brooklyn (NY, 2014). ( <a href="http://www.brownstoner.com/brooklyn-life/atlantic-yards-modular-tower-could-leak-say-documents-court-hearing-tomorrow/">http://www.brownstoner.com/brooklyn-life/atlantic-yards-modular-tower-could-leak-say-documents-court-hearing-tomorrow/</a> )	64
Figura 1-26	Holzer Kobler Architekturen, Studentato “Frankie & Johnny”, Berlino (2014). ( <a href="https://www.detail.de/artikel/spielerisch-und-praegnant-studentendorf-von-holzer-kobler-architekturen-13253/">https://www.detail.de/artikel/spielerisch-und-praegnant-studentendorf-von-holzer-kobler-architekturen-13253/</a> )	65
Figura 1-27	Tempohousing, Studentato Keetwonen, Amsterdam (2006). ( <a href="http://www.tempohousing.com/projects/keetwonen/">http://www.tempohousing.com/projects/keetwonen/</a> )	66
Figura 1-28	Atelier Cattani Architectes, Cité a Docks, Le Havre, in Francia (2014). ( <a href="http://www.contemporist.com/cite-a-docks-student-housing-by-cattani-architects/">http://www.contemporist.com/cite-a-docks-student-housing-by-cattani-architects/</a> )	66
Figura 1-29	Il sistema brevettato Nomadhome, Gerold Peham - schemi aggregativi modulari. ( <a href="http://loft-factory.at/Lofts/Nomadhome/">http://loft-factory.at/Lofts/Nomadhome/</a> )	67
Figura 1-30	Il sistema brevettato Nomadhome, Gerold Peham - spazi interni. ( <a href="http://loft-factory.at/Lofts/Nomadhome/">http://loft-factory.at/Lofts/Nomadhome/</a> )	67
Figura 1-31	La zeroHouse, Specht Architects	68
Figura 2-1:	Rappresentazione concettuale dello sviluppo sostenibile (Hancock T., Madrid, 1995). “urban planning, sustainability and health”	72
Figura 2-2	Rappresentazione concettuale dello sviluppo sostenibile applicato all’edilizia.	74
Figura 2-3	Confronto fra la produttività nel settore manifatturiero e settore delle Costruzioni negli ultimi 50 anni. ( <a href="http://www.linkiesta.it/it/article/2017/10/09/ledilizia-e-un-disastro-di-produttivita-ecco-come-costi-e-tempi-posson/35764/">http://www.linkiesta.it/it/article/2017/10/09/ledilizia-e-un-disastro-di-produttivita-ecco-come-costi-e-tempi-posson/35764/</a> )	82

## II - SISTEMA “INTEGRO BS 400”

Figura 1-1	Il vallo di Adriano	96
Figura 1-2	Esempio di opus craticium a Ercolano	96
Figura 1-3	Schema di assemblaggio Fachwerkhaus	98
Figura 1-4	Lisbona, Baixa Pombalina	99
Figura 1-5	Ricostruzione della casa a Gaiola portoghese	100
Figura 1-6	Eco Sistema Construção Sustentável proposto da João Carlos Alfonso Alves	101
Figura 1-7.	Terremoto di Reggio e Messina in una rappresentazione pittorica dell'epoca	102
Figura 1-8	Sezione, Prospetto e Pianta della casa e della platea di fondazione	104
Figura 1-9	Modo di costruire muri negli edifici pubblici, dettaglio della struttura in legno e del riempimento in pietra da taglio. Dettaglio della cornice, della grondaia e del tetto con lastre di lavagna o certa cotta. Dettagli dei conduttori	105
Figura 1-10.	Sistema di prevenzione antisismica (L. Pesso): tiranti in ferro, casa baraccata e camera di sicurezza.	107

Figura 1-11 TIPO DI CASA CON SCHELETRO IN LEGNO E LAMIERA STIRATA RESISTENTE AL TERREMOTO (ACS, Min. AIC, UCB n. 101282) Luigi Lanza, Castiglione Cosentino (CS).....	109
Figura 1-12 NUOVO SISTEMA DI COSTRUZIONI EDILIZIE RESISTENTI AI TERREMOTI (ACS, Min. AIC, UCB n. 101281) Luigi Lanza, Castiglione Cosentino (CS).....	110
Figura 1-13 SISTEMA DI COSTRUZIONE DI CASE RESISTENTE AI TERREMOTI (ACS, Min. AIC, UCB, n. 103254) Pasquale Frezza, Laureana di Borriello (Reggio Calabria) .....	110
Figura 1-14 “Himis” rimasta in piedi a dispetto di molte costruzioni in cemento armato nel terremoto del 1999 ...	112
Figura 2-1 Fasi di realizzazione e sottostruttura di controventamento in acciaio .....	116
Figura 2-2 Tipologie blocchi, schemi di posa, sistema si armatura. Schizzi prof. Gulli .....	117
Figura 2-3 Bozza dettagli costruttivi. Schizzi prof. Gulli .....	118
Figura 2-4 Componibilità tipologica. Schizzi prof. Gulli.....	119
Figura 2-5 Definizione della maglia strutturale nella prima evoluzione .....	120
Figura 2-6 Serie di blocchi. In basso concept iniziale. In alto ottimizzazione nella prima evoluzione.....	121
Figura 2-7 Corsi tipo nel concept iniziale (a sinistra) e nella prima fase evolutiva (a destra).....	122
Figura 2-8 Struttura chimica e applicazioni. «Chemical Structure and Applications – Geopolymer Institute», consultato 11 agosto 2017, <a href="https://www.geopolymer.org/science/chemical-structure-and-applications/">https://www.geopolymer.org/science/chemical-structure-and-applications/</a> . .....	124
Figura 2-9 Installazione pilastri e infilaggio barre dywydag.....	128
Figura 2-10 Posa del primo e secondo corso di blocchi.....	128
Figura 2-11 Completamento prima sezione e montaggio piastre di ripartizione.....	129
Figura 2-12 Innesto barre seconda sezione e completamento .....	129
Figura 2-13 Innesto barre terza sezione e completamento .....	130
Figura 2-14 Completamento con trave superiore e serraggio del sistema.....	130
Figura 2-15 Schema delle differenze tra sistema vecchio e il sistema 2.0 .....	132
Figura 2-16 Ossatura lignea del modulo base .....	133
Figura 2-17 Schede prodotto AluMIDI e AluMAXI.....	134
Figura 2-18 Dettaglio trave di bordo e stratigrafia solaio .....	135
Figura 2-19 Dettaglio copertura .....	135
Figura 2-20 Dettaglio fondazione .....	136
Figura 2-21 Abaco delle tipologie di blocchi.....	136
Figura 2-22 Le due tipologie di corsi standard e la soluzione in corrispondenza della reticolare lignea .....	137
Figura 2-23 Schema sul funzionamento della reticolare lignea. ....	138
Figura 2-24 Focus sul sistema di post compressione. Vista della scarpa metallica alla trave superiore e barre di post compressione. ....	138
Figura 2-25 Installazione pilastri e posa scarpa metallica di base.....	139
Figura 2-26 Posa del primo e del secondo corso di blocchi .....	140
Figura 2-27 Completamento della prima sezione e posa della reticolare lignea .....	140
Figura 2-28 Completamento seconda sezione.....	141
Figura 2-29 Completamento parete e posa della trave superiore .....	141
Figura 2-30 Installazione delle barre di post-compressione.....	142
Figura 3-1 Disposizione in pianta dei pilastri del modulo. ....	145
Figura 3-2 Tipi di sagomature della testa del pilastro. ....	145

Figura 3-3	Dettagli esecutivi per la realizzazione delle piastre a scomparsa per realizzare il giunto trave-pilastro .	146
Figura 3-4	Componente femmina del giunto PITZL.....	147
Figura 3-5	Assonometria del telaio ligneo .....	148
Figura 3-6	Piante e prospetti del modulo base al completamento del telaio ligneo .....	149
Figura 3-7	Impalcato del solaio. Stratigrafia del pannello sandwich strutturale .....	150
Figura 3-8	Dettagli dell'attacco del solaio interpiano .....	151
Figura 3-9	Solai sui tre livelli del modulo.....	152
Figura 3-10	Elementi costitutivi del tamponamento. ....	153
Figura 3-11	irrigidimenti esterni e inserimento del primo tavolato di ripartizione .....	154
Figura 3-12	Scheda tecnica Porotherm Plana.....	155
Figura 3-13	Tamponamento completato .....	156
Figura 3-14	Modulo base completo con tamponamento d'angolo e aperture .....	157
Figura 3-15	Tirante testa battente esagonale.....	159
Figura 3-16	Infilaggio delle barre in corrispondenza di un solaio (lato interno).....	159
Figura 3-17	Infilaggio delle barre in corrispondenza di un solaio (lato esterno) .....	160
Figura 3-18	Sequenza delle fasi per l'applicazione della compressione. ....	160
Figura 3-19	disegni esecutivi piastra di ripartizione (base).....	161
Figura 3-20	disegni esecutivi piastra di ripartizione (scarpe asolate) .....	161
Figura 3-21	mensola ricavata da profili commerciali .....	161
Figura 3-22	Assonometria piastra e dettaglio del funzionamento.....	162
Figura 3-23	Veduta dall'alto della città abbandonata di Craco (MT) .....	163
Figura 3-24	Schema concettuale del passaggio da modulo singolo e autonomo ad aggregato.....	163
Figura 3-25	Coperture nel centro storico di Pisticci (MT) .....	164
Figura 3-26	Veduta del centro storico di Cagliari dalla terrazza del Bastione Saint Remy .....	165
Figura 3-27	Aggregazione dei moduli. Possibili configurazioni di copertura.....	166
Figura 4-1	a - Forze d'attrito nelle interfacce laterizio/laterizio (rosso) e laterizio/legno (blu). b- Schematizzazione del funzionamento del tamponamento per le forze nel piano. ....	170
Figura 4-2	Assonometria: cerchiatura delle aperture mediante tavolati lignei.....	171
Figura 4-3	Abaco aperture con e senza rivestimento esterno.....	171
Figura 4-4	Vista del modello della struttura.....	173
Figura 4-5	A sinistra - peso proprio della struttura / A destra - carico permanente solai-coperture.....	176
Figura 4-6	A sinistra - carico variabile solai / A destra - carico variabile neve .....	177
Figura 4-7	Carico permanente muri .....	177
Figura 4-8	Sforzo normale massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica.....	179
Figura 4-9	Taglio massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica .....	180
Figura 4-10	Momento massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica.....	180
Figura 4-11	Spostamenti massimi in combinazione SLD sismica .....	181
Figura 4-12	Percentuale di sfruttamento degli elementi.....	182
Figura 4-13	Vista del modello della struttura.....	188
Figura 4-14	Sforzo normale massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica.....	189

Figura 4-15 Taglio massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica.....	189
Figura 4-16 Momento massimo in combinazione SLU statica ed in combinazione SLV sismica.....	190
Figura 4-17 Spostamenti massimi in combinazione SLD sismica .....	190
Figura 4-18 Percentuale di sfruttamento degli elementi.....	191
Figura 4-19 Finitura di facciata ventilata ( <a href="https://www.marazzi.it/soluzioni-architettura/marazzi-engineering/facciate-ventilate/facciate_ventilate_vantaggi/">https://www.marazzi.it/soluzioni-architettura/marazzi-engineering/facciate-ventilate/facciate_ventilate_vantaggi/</a> ) .....	194
Figura 4-20 Finitura a fasce per facciata ventilate ( <a href="http://www.ulmaarchitectural.com/it/facciate-ventilate/progetti/edifici-residenziali/">http://www.ulmaarchitectural.com/it/facciate-ventilate/progetti/edifici-residenziali/</a> ) .....	195
Figura 4-21 Installazione profilo ALLFACE.....	197
Figura 4-22 Installazione pannelli BETONWOOD BITUM FIBER.....	198
Figura 4-23 Installazione isolante ROCKWOOL ACOUSTIC 225 .....	199
Figura 4-24 Installazione dei pannelli ROCKPAMEL EXTREME 8mm.....	200
Figura 4-25 Esploso della sottostruttura esterna .....	201
Figura 4-26 Stratigrafia interna ed esterna della parete.....	202
Figura 4-27 Diagramma delle pressioni per la parete .....	210
Figura 4-28 Diagrammi delle pressioni mensili .....	212
Figura 4-29 Esempio di progettazione parametrica. Elenco di soluzioni candidate a partire da un modello parametrico flessibile FPM Flexible Parametric Model) - Image by Cory Mogk su Dreamcatcher Home Design	214
Figura 4-30 Caratteristiche geometriche del modulo base .....	219
Figura 4-31 Diagramma di flusso dell' algoritmo iterative di aggregazione dei moduli .....	222
Figura 4-32 A sinistra: "The Broken Chessboard" di Henry Ernest Dudeney da "The Canterbury Puzzles".....	225
Figura 4-33 Relazione fra rapporto S/V e dimensioni.....	228
Figura 4-34 Diagramma di flusso per l' algoritmo di adattabilità funzionale .....	241
Figura 4-35 Classificazione dell' impianto scale in relazione alla sagoma dell' edificio .....	244
Figura 4-36 Diagramma di flusso per l' algoritmo di compatibilità tipologica.....	246
Figura 4-37 Compatibilità tipologica con 1 vano scala.....	248
Figura 4-38 Compatibilità tipologica con 2 vani scala.....	248
Figura 4-39 Schema riassuntivo del procedimento .....	251
Figura 4-40 Alloggiamento dei pilastri .....	252
Figura 4-41 Alloggiamento delle travi munite di mensole.....	253
Figura 4-42 Alloggiamento dei travetti.....	254
Figura 4-43 Alloggiamento del solaio e giunzione coi travetti .....	255
Figura 4-44 Alloggiamento delle travi munite di piastre di ripartizione e mensole per la post compressione.....	257
Figura 4-45 Dispositivi di sicurezza collettiva.....	260
Figura 4-46 Alloggiamento delle travi munite di piastre di ripartizione e appoggi per la copertura.....	261
Figura 4-47 Parapetto a norma sulla parte terminale dei pilastri.....	264
Figura 4-48 Struttura di copertura.....	265
Figura 4-49 Tavolato di copertura.....	266
Figura 4-50 Guaina impermeabilizzante .....	267
Figura 4-51 Pannello accoppiato OSB-isolante sagomato, grondaia, lamiera stirata per il filtraggio della neve nel compluvio.....	267

Figura 4-52 Pannelli esterni e colmo ventilato.....	269
Figura 4-53 Vite e tassello per isolante su muratura Isulfix (Rothoblaas).....	272
Figura 4-54 Cronoprogramma con 1 squadra e 1 lato tamponato.....	276
Figura 4-55 Cronoprogramma con 1 squadra e 2 lati tamponati.....	277
Figura 4-56 Cronoprogramma con 2 squadre e 1 lato tamponato.....	278
Figura 4-57 Cronoprogramma con 2 squadre e 2 lati tamponati.....	279
Figura 4-58 - 1) elementi del telaio e blocchi - 2) piastra di ripartizione realizzata con stampa 3D.....	281
Figura 4-59 - 3) posa del primo corso di blocchi - 4) completamento della prima sezione e posa reticolare lignea.....	282
Figura 4-60 - 5) completamento della reticolare lignea - 6) realizzazione della seconda sezione.....	282
Figura 4-61 - 7) completamento della parete - 8) soluzione d'angolo con apertura.....	282
Figura 4-62 - 9) particolare della piastra di post compressione - 10) modello completato.....	282
Figura 4-63 - 11) profilo di protezione delle barre - 12) installazione del profilo di protezione.....	283
Figura 4-64 Prospetto della porzione di parete realizzata in scala 1:2.....	283
Figura 4-65 blocchi tagliati a misura.....	284
Figura 4-66 Disegni esecutivi per il taglio laser delle piastre metalliche.....	285
Figura 4-67 Particolari della piastra metallica di ripartizione saldata. Particolari delle scarpe centrali e laterali e connessioni alla trave lignea.....	286
Figura 4-68 Reticolare lignea di ripartizione. Particolare della maglia con correnti e diatoni.....	286
Figura 4-69 - 1) trave di base e piastra metallica - 2) particolare della piastra di ripartizione all'attacco del pilastro.....	287
Figura 4-70 - 3) posa del primo corso di blocchi- 4) particolare del primo corso e attacco al pilastro.....	287
Figura 4-71 - 5) posa del secondo corso di blocchi - 6) particolare del secondo corso e chiusura del pilastro.....	288
Figura 4-72 - 7) completamento prima sezione e posa della reticolare - 2) particolare della reticolare all'attacco del pilastro.....	288
Figura 4-73 - 9) ripartenza dei corsi sopra la reticolare lignea - 10) completamento della parete e trave sommitale.....	288
Figura 4-74 - 11) piastra di base e sistema di post compressione - 12) particolare della scarpa e sistema di post compressione.....	288
Figura 4-75 Parete completata e numerazione dei vari corsi per consentire un più rapido smontaggio e ri-assemblaggio.....	289
Figura 4-76 - 1) Montaggio telaio ligneo per soluzione d'angolo- 2) Posizionamento degli irrigidimenti verticali.....	291
Figura 4-77 - 3) Collegamento degli irrigidimenti con vite autofilettante - 4) Intelaiatura lignea completa di irrigidimenti.....	291
Figura 4-78 - 5) Installazione della piastra realizzata mediante stampa 3D - 6) particolare della piastra di ripartizione all'intradosso della trave.....	291
Figura 4-79 - 7) Installazione dei profili ad L nella trave inferiore - 8) Particolare di un profilo ad L e posizione rispetto agli irrigidimenti.....	292
Figura 4-80 - 9) Posizionamento dei primi corsi di blocchi realizzati in polistirene - 10) Completamento del tamponamento.....	292
Figura 4-81 - 11) Particolare del collegamento del ripartitore ligneo al pilastro - 12) Installazione del solaio e cerchiatura metallica simulata attraverso la stampa 3D.....	292
Figura 4-82 - 13) Particolare del collegamento del solaio e stratigrafia - 14) Vista interna della soluzione d'angolo prima della post compressione.....	293
Figura 4-83 - 15) Installazione delle barre nei profili della trave inferiore - 16) Esterno della parete completa con barre e irrigidimenti.....	293

Figura 4-84 - 17) Interno della parete completa con barre e irrigidimenti - 18) Tavolato di ripartizione con funzione di presidio anticaduta.....	293
Figura 4-85 - 19) Soluzione d'angolo completa, vista dell'esterno .....	294
Figura 4-86 - 20) Soluzione d'angolo completa, vista dell'interno.....	294

### III - SOLAIO “INTEGRO FS PRFV”

Figura 1-1 Travetti di un solaio a semplice orditura .....	301
Figura 1-2 solaio in legno a doppia orditura con mezzane.....	302
Figura 1-3 Solaio a doppia orditura .....	303
Figura 1-4 varianti decorative di solaio semplice di tavolato e regoli.....	303
Figura 1-5 Solaio a doppia orditura con trave foderata.....	304
Figura 1-6 orditure con travi maestre con incasso per alloggiamento dei regoli.....	304
Figura 1-7 Orditura di un solaio a cassettoni .....	305
Figura 1-8 solaio a cassettoni.....	306
Figura 1-9 Solaio alla Serlio .....	306
Figura 1-10 Soluzioni di appoggio per le travi lignee.....	307
Figura 1-11 Solaio consolidato con soletta in c.a.....	310
Figura 1-12 Travette in c.c. sopra un tavolato ligneo.....	311
Figura 1-13 Controventamento di piano con profili metallici.....	312
Figura 1-14 Fasce incrociate in FRP .....	313
Figura 1-15 Solaio Compound della Coperlegno.....	316
Figura 1-16 Solaio Latercompound della Coperlegno .....	317
Figura 1-17 7.3.3Solaio Soleco di Picasistemi .....	319
Figura 1-18 Solaio Armorapido della Ecosism .....	320
Figura 1-19 Solaio Step della Ferramati .....	322
Figura 1-20 Solaio New Classic Plastbau della De.Com .....	323
Figura 1-21 7.Solaio Svelto della Ferracin Group .....	324
Figura 1-22 Solaio in Grc del Gruppocentronord .....	326
Figura 1-23 Solaio Emmafloor della Edyl Composites Technology.....	328
Figura 2-1 Scheda tecnica Grigliato SCH 38/38 parte 1 .....	332
Figura 2-2 Scheda tecnica Grigliato SCH 38/38 parte 2 .....	333
Figura 2-3 Pannello di compensato, stratigrafia.....	334
Figura 2-4 Rotolo di carta Kraft.....	335
Figura 2-5 Collegamento meccanico passante puntuale .....	335
Figura 2-6 Collegamento meccanico passante per recupero discontinuità.....	336
Figura 2-7 Collegamento meccanico su orditura principale.....	336
Figura 2-8 Strato isolante in lana di roccia .....	338
Figura 2-9 Strato di ripartizione in lastre di gessofibra.....	338

Figura 2-10 Elemento scaldante elettrico.....	339
Figura 2-11 Camera calda per prove termiche .....	339
Figura 2-12 Vasca d'acqua per prove di carico.....	341
Figura 2-13 Fasi di realizzazione del prototipo in scala 1:1.....	342
Figura 2-14 Pannelli multistrato.....	344
Figura 2-15 Caratteristiche dimensionali dei pannelli multistrato .....	344
Figura 2-16 Caratteristiche meccaniche dei pannelli multistrato .....	345
Figura 2-17 Caratteristiche meccaniche delle fibre.....	348
Figura 2-18 Grigliato stampato in PRFV SCH 38/38_DC.....	350
Figura 2-19 Scheda tecnica grigliato stampato SCH 38/38_DC parte 1 .....	352
Figura 2-20 Scheda tecnica grigliato stampato SCH 38/38_DC parte 2 .....	353
Figura 2-21 Caratteristiche meccaniche IPN.....	357
Figura 2-22 Caratteristiche meccaniche resina epossidica .....	358
Figura 2-23 Caratteristiche fisico-chimiche della resina epossidica per la sperimentazione .....	358
Figura 2-24 Caratteristiche fisico-chimiche della resina epossidica per la sperimentazione .....	359
Figura 2-25 Grafico della temperatura transizione vetrosa .....	359
Figura 2-26 Velocità di indurimento.....	360
Figura 2-27 Caratteristiche fisico-chimiche dell'adesivo poliuretano per la sperimentazione.....	360
Figura 3-1 Schema generale della Prova a Flessione a quattro punti.....	362
Figura 3-2 Schema di carico della prova a 4 coltelli messa in opera .....	363
Figura 3-3 Componenti e caratteristiche di un estensimetro .....	364
Figura 3-4 Caratteristiche degli estensimetri utilizzati nelle prove .....	366
Figura 3-5 Incollaggio e preparazione degli estensimetri .....	367
Figura 3-6 Calibrazione dei trasduttori di spostamento .....	368
Figura 3-7 Installazione di un trasduttore con vetrino normalizzato.....	369
Figura 3-8 Principio stereoscopico alla base del funzionamento delle fotocamere DIC.....	370
Figura 3-9 Sistemi di riferimento della DIC 3D.....	371
Figura 3-10 Principi stereometrici di funzionamento.....	372
Figura 3-11 Sistema di illuminazione adottato.....	374
Figura 3-12 Griglia di calibrazione delle fotocamere DIC.....	375
Figura 3-13 Fasi di generazione del pattern .....	376
Figura 3-14 Schema di posizionamento degli estensimetri.....	377
Figura 3-15 Grafico carico-deformazioni ottenuto dagli estensimetri .....	378
Figura 3-16 Grafico carico-deformazioni ottenuto dal sistema DIC.....	378
Figura 3-17 Grafico carico-deformazioni trasversali ottenuto dagli estensimetri .....	379
Figura 3-18 Grafico carico-deformazioni longitudinali ottenuto dagli estensimetri .....	379
Figura 3-19 Configurazioni provini prima fase da I.1 a I.4.....	381
Figura 3-20 Configurazioni provini prima fase da I.5 a I.8.....	382
Figura 3-21 Configurazioni provini prima fase da I.7 a I.8.....	383
Figura 3-22 Taglio del grigliato .....	383

Figura 3-23 Lavorazione superficie liscia del grigliato.....	384
Figura 3-24 Lavorazione superficie scabra del grigliato.....	384
Figura 3-25 Preparazione dell'adesivo IPN e prima stesura .....	385
Figura 3-26 Applicazione della Rete in fibra di vetro, seconda stesura IPN e provino completo.....	386
Figura 3-27 Preparazione e stesura del primer.....	386
Figura 3-28 Preparazione e applicazione della resina epossidica RC02 .....	387
Figura 3-105 Prova monotona su impalcato completo senza discontinuità e grigliato singolo.....	390
Figura 3-106 Prova ciclica e monotona su impalcato con IPN senza discontinuità.....	391
Figura 3-107 Prova ciclica e monotona su impalcato con RESINA RC02 senza discontinuità.....	392
Figura 3-108 Prova ciclica e monotona su grigliato singolo senza discontinuità.....	393
Figura 3-109 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità del grigliato in mezzeria .....	393
Figura 3-110 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità del grigliato a 100 mm dall'appoggio.....	394
Figura 3-111 Prove monotona e cicliche su impalcato con IPN nelle diverse configurazioni.....	395
Figura 3-112 Prove monotona e cicliche su impalcato con RESINA EPOSSIDICA nelle diverse configurazioni ..	396
Figura 3-113 Configurazioni provini seconda fase da II.1 a II.4 .....	399
Figura 3-114 Configurazioni provini seconda fase da II.5 a II.8 .....	400
Figura 3-115 Configurazioni provini seconda fase da II.9 a II.12 .....	401
Figura 3-117 Preparazione e stesura del primer.....	402
Figura 3-118 Preparazione e stesura della resina epossidica sui pannelli multistrato .....	403
Figura 3-119 Stesura della resina sul pannello XPS e completamento con rete in fibra di vetro.....	403
Figura 3-156 Prova ciclica su diverse configurazioni di impalcato con XPS di spessore 40 mm.....	406
Figura 3-157 Prova ciclica su diverse configurazioni di impalcato con XPS di spessore 60 mm.....	407
Figura 3-158 Prova ciclica su diverse configurazioni di impalcato con XPS di spessore 80 mm.....	408
Figura 3-159 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 9 mm all'intradosso e all'estradosso con XPS di diverso spessore.....	409
Figura 3-160 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 18 mm all'intradosso e all'estradosso con XPS di diverso spessore.....	410
Figura 3-161 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 18 mm all'estradosso e di 9 mm all'intradosso con XPS di diverso spessore .....	411
Figura 3-162 Prova ciclica su configurazione di impalcato con pannello multistrato di 9 mm all'estradosso e di 18 mm all'intradosso con XPS di diverso spessore .....	412
Figura 3-163 Confronto tra impalcato simmetrico con pannelli di legno di 9 mm e XPS di diverso spessore e impalcato con pannelli di legno di 9 mm e grigliato .....	413
Figura 3-164 Confronto tra impalcato simmetrico con pannelli di legno di 18 mm e XPS di diverso spessore e impalcato con pannelli di legno di 9 mm e grigliato .....	414
Figura 3-165 Disposizione dei trasduttori di spostamento WSF 2/50.....	416
Figura 3-166 Installazione delle LVDT per il controllo degli spostamenti.....	416
Figura 3-167 Preparazione della macchina di prova da parte dei tecnici .....	417
Figura 3-168 Prove monotone per sezione simmetrica .....	418
Figura 3-169 Prove cicliche per sezione simmetrica.....	419
Figura 3-170 Prove cicliche per sezione simmetrica discontinua .....	420
Figura 3-171 Prove di fatica per sezione simmetrica .....	421

Figura 3-172 Prove cicliche per sezione asimmetrica .....	422
Figura 3-173 Prove cicliche per sezione simmetrica con pannello doppio .....	423
Figura 3-174 Taglio del grigliato .....	424
Figura 3-175 Levigatura superfici.....	425
Figura 3-176 Stesura della resina.....	425
Figura 3-177 Confezionamento provino con resina epossidica: e configurazione asimmetrica.....	426
Figura 3-178 Stesura dell'adesivo poliuretano.....	427
Figura 3-179 Stesura dell'adesivo poliuretano e confezionamento di un provino con discontinuità .....	428
Figura 4-1 Prove monotone su impalcato completo a sezione simmetrica senza discontinuità e grigliato singolo chiuso e aperto .....	434
Figura 4-2 Valori della rigidità al variare della configurazione e dell'adesivo.....	434
Figura 4-3 Prova ciclica e monotona su impalcato completo a sezione simmetrica con resina epossidica.....	435
Figura 4-4 Prova ciclica e monotona su impalcato completo a sezione simmetrica con adesivo poliuretano.....	436
Figura 4-5 Prova ciclica e monotona su grigliato singolo chiuso senza discontinuità .....	437
Figura 4-6 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità in mezzeria.....	438
Figura 4-7 Prova ciclica dell'impalcato con discontinuità laterale .....	439
Figura 4-8 •Prova monotona e ciclica su impalcato con resina epossidica nelle diverse configurazioni .....	441
Figura 4-9 Prova monotona e ciclica su impalcato con adesivo poliuretano nelle diverse configurazioni .....	442
Figura 4-10 Prove monotone su sperimentazione attuale e precedente.....	443
Figura 4-11 Prove cicliche su sperimentazione attuale e precedente con grigliato interrotto in mezzeria.....	445
Figura 4-12 Prove cicliche su sperimentazione attuale e precedente con grigliato interrotto lateralmente.....	446
Figura 4-13 Prove cicliche su impalcato completo a sezione asimmetrica con resina epossidica.....	448
Figura 4-14 Prove cicliche su impalcato completo a sezione asimmetrica con adesivo poliuretano .....	449
Figura 4-15 Confronto tra gli impalcati a sezione asimmetrica con adesivo poliuretano e resina e pannello multistrato all' estradosso .....	450
Figura 4-16 Confronto tra gli impalcati a sezione asimmetrica con adesivo poliuretano e resina e pannello multistrato all' intradosso .....	451
Figura 4-17 Confronto tra tutti gli impalcati senza discontinuità con adesivo poliuretano.....	452
Figura 4-18 Confronto tra tutti gli impalcati senza discontinuità con resina epossidica.....	453
Figura 4-19 Prova ciclica su pannello singolo e pannello doppio con resina epossidica .....	454
Figura 4-20 Prova ciclica su pannello singolo e pannello doppio con adesivo poliuretano .....	456
Figura 4-21 Schema statico.....	458
Figura 4-22 Sezione resistente dell'impalcato nelle diverse configurazioni del pannello sandwich.....	460
Figura 4-23 Alternanza delle maglie del grigliato in planimetria. Sezioni in corrispondenza delle maglie e dei travetti .....	462
Figura 4-24 Sezioni dell'impalcato in corrispondenza del singolo travetto .....	463
Figura 4-25 Schemi statici .....	469
Figura 4-26 Confronto grafici carico-spostamento linearizzati.....	472
Figura 4-27 Schema di carico prova a 4 punti.....	476
Figura 4-28 Grafico carico-spostamento dei pannelli multistrato .....	477
Figura 4-29 Sezione del pannello multistrato e andamento delle tensioni interne .....	478

Figura 4-30 Prova monotona su grigliato singolo .....	479
Figura 4-31 Sezione del pannello multistrato e andamento delle tensioni interne .....	479
Figura 4-32 Sollecitazioni interne delle ali del grigliato .....	480
Figura 4-33 Soluzione progettuale: pannello sandwich per solaio .....	485
Figura 4-34 Nido d'ape e riempimento FERMACELL .....	488
Figura 4-35 Isolante Floormate 300 .....	489
Figura 4-36 Fasi della posa dell'isolante da calpestio .....	490
Figura 4-37 Lastre di gessofibra .....	491
Figura 4-38 Proprietà materassino termoriflettente .....	492
Figura 4-39 Proprietà del film scaldante Accona .....	493
Figura 4-40 Proprietà materassino diffondente .....	494
Figura 4-41 Film termoriflettente, film scaldante, film diffondente e pavimentazione .....	494
Figura 4-42 Particolare del nodo strutturale muro-solaio con stratigrafia di completamento .....	500
Figura 4-43 Connessione del solaio alla trave .....	501
Figura 4-44 Pannello sandwich con battentatura .....	502
Figura 4-45 Particolare del nodo trave-solaio .....	503
Figura 4-46 Posa dei pannelli con battentatura nel caso di nuovo solaio .....	504
Figura 4-47 Posa dei pannelli con battentatura nel caso di sostituzione solaio e tavolato preesistente .....	506
Figura 4-48 Sfrido e taglio dei pannelli .....	507

## APPENDICE

Figura A-1 I Iterazione .....	522
Figura A-2 II Iterazione .....	523
Figura A-3 III Iterazione .....	524
Figura A-4 IV Iterazione .....	525
Figura A-5 V Iterazione prima parte .....	526
Figura A-6 V Iterazione seconda parte .....	527
Figura A-7 VI Iterazione prima parte .....	528
Figura A-8 VI Iterazione seconda parte .....	529
Figura A-9 VI Iterazione risultati .....	530
Figura A-10 VII Iterazione prima parte .....	531
Figura A-11 VII Iterazione seconda parte .....	532
Figura A-12 VII Iterazione terza parte .....	533
Figura A-13 VII Iterazione quarta parte .....	534
Figura A-14 VII Iterazione quinta parte .....	535
Figura A-15 VII Iterazione sesta parte .....	536
Figura A-16 VII Iterazione risultati prima parte .....	537
Figura A-17 VII Iterazione risultati seconda parte .....	538

Figura A-18 VII Iterazione risultati terza parte.....	539
Figura A-19 - Monolocale A - 2 moduli - soluzione 1.....	541
Figura A-20 - Bilocale AA - 3 moduli - soluzione 1.....	542
Figura A-21 - Bilocale AA - 3 moduli - soluzione 2.....	543
Figura A-22 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 1.....	544
Figura A-23 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 2.....	545
Figura A-24 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 3.....	546
Figura A-25 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 4.....	547
Figura A-26 - Trilocale AAb - 4 moduli - soluzione 5.....	548
Figura A-27 -Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 1.....	549
Figura A-28 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 2.....	550
Figura A-29 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 3.....	551
Figura A-30 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 4.....	552
Figura A-31 - Quadrilocale AAA - 4 moduli - soluzione 5.....	553
Figura A-32 - Plurilocale AAbb - 5 moduli - soluzione 1.....	554
Figura A-33 - Plurilocale AAAA - 6 moduli - soluzione 1.....	555
Figura A-34 - Plurilocale AAbbb - 7 moduli - soluzione 1.....	556
Figura A-35 - Plurilocale AAbbb - 7 moduli - soluzione 2.....	557
Figura A-36 - Plurilocale AAbbb - 7 moduli - soluzione 3.....	558
Figura A-37 - Plurilocale AAbbb - 7 moduli - soluzione 4.....	559
Figura B-1 Installazione del provino I.1 sul banco prova.....	560
Figura B-2 Rottura del provino I.1.....	561
Figura B-3 Deformazione iniziale e finale.....	562
Figura B-4 Punti di controllo sulla mezzeria del provino.....	562
Figura B-5 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	563
Figura B-6 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura.....	563
Figura B-7 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A.....	564
Figura B-8 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B.....	564
Figura B-9 Installazione del provino I.2 sul banco prova.....	565
Figura B-10 Rottura del provino I.2.....	566
Figura B-11 Deformazione iniziale e finale.....	567
Figura B-12 Punti di controllo sulla mezzeria del provino.....	567
Figura B-13 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	568
Figura B-14 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura.....	568
Figura B-15 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A.....	569
Figura B-16 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B.....	569
Figura B-17 Installazione del provino I.3 sul banco prova.....	570
Figura B-18 Rottura del provino I.3.....	571
Figura B-19 Deformazione iniziale e finale.....	571
Figura B-20 Punti di controllo sulla mezzeria del provino.....	572

Figura B-21 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo .....	572
Figura B-22 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura .....	573
Figura B-23 Installazione del provino I.4 sul banco prova .....	574
Figura B-24 Rottura del provino I.4.....	575
Figura B-25 Deformazione iniziale e finale .....	575
Figura B-26 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	576
Figura B-27 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	576
Figura B-28 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura .....	577
Figura B-29 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A .....	577
Figura B-30 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B .....	578
Figura B-31 Installazione del provino I.5 sul banco prova .....	579
Figura B-32 Rottura del provino I.4.....	580
Figura B-33 Deformazione iniziale e finale .....	580
Figura B-34 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	581
Figura B-35 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	581
Figura B-36 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura .....	582
Figura B-37 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A .....	583
Figura B-38 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B .....	583
Figura B-39 Installazione del provino I.6 sul banco prova .....	584
Figura B-40 Rottura del provino I.6.....	585
Figura B-41 Deformazione iniziale e finale .....	585
Figura B-42 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	586
Figura B-43 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	586
Figura B-44 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura .....	587
Figura B-45 Installazione del provino I.7 sul banco prova .....	588
Figura B-46 Rottura del provino I.7.....	589
Figura B-47 Deformazione iniziale e finale .....	589
Figura B-48 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	590
Figura B-49 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	590
Figura B-50 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura .....	591
Figura B-51 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A .....	591
Figura B-52 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B .....	592
Figura B-53 Installazione del provino I.8 sul banco prova .....	593
Figura B-54 Rottura del provino I.8.....	594
Figura B-55 Deformazione iniziale e finale .....	594
Figura B-56 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	595
Figura B-57 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	595
Figura B-58 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura .....	596
Figura B-59 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A .....	596
Figura B-60 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B .....	597

Figura B-61 Installazione del provino I.9 sul banco prova .....	598
Figura B-62 Rottura del provino I.9.....	599
Figura B-63 Deformazione iniziale e finale.....	599
Figura B-64 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	600
Figura B-65 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	600
Figura B-66 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura.....	601
Figura B-67 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A.....	601
Figura B-68 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B.....	602
Figura B-69 Installazione del provino I.10 sul banco prova .....	603
Figura B-70 Rottura del provino I.10.....	604
Figura B-71 Deformazione iniziale e finale.....	604
Figura B-72 Punti di controllo sulla mezzeria del provino .....	605
Figura B-73 Grafico carico-spostamento elaborato a partire dai punti di controllo.....	605
Figura B-74 Deformata della sezione di mezzeria alla rottura.....	606
Figura B-75 Confronto tra punto di controllo 1 e LVDT A.....	606
Figura B-76 Confronto tra punto di controllo 5 e LVDT B.....	607
Figura B-77 Installazione del provino II.1 sul banco prova.....	608
Figura B-78 Rottura del provino II.1 .....	609
Figura B-79 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	610
Figura B-80 Installazione del provino II.1 sul banco prova.....	611
Figura B-81 Rottura del provino II.2 .....	612
Figura B-82 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	613
Figura B-83 Installazione del provino II.1 sul banco prova.....	614
Figura B-84 Rottura del provino II.3 .....	615
Figura B-85 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	615
Figura B-86 Installazione del provino II.4 sul banco prova.....	616
Figura B-87 Rottura del provino II.4 .....	617
Figura B-88 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	618
Figura B-89 Installazione del provino II.5 sul banco prova.....	619
Figura B-90 Rottura del provino II.5 .....	620
Figura B-91 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	621
Figura B-92 Installazione del provino II.6 sul banco prova.....	622
Figura B-93 Rottura del provino II.6 .....	623
Figura B-94 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	624
Figura B-95 Installazione del provino II.7 sul banco prova.....	625
Figura B-96 Rottura del provino II.7 .....	626
Figura B-97 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	627
Figura B-98 Installazione del provino II.8 sul banco prova.....	627
Figura B-99 Rottura del provino II.8 .....	628
Figura B-100 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	629

Figura B-101 Installazione del provino II.9 sul banco prova.....	630
Figura B-102 Rottura del provino II.9 .....	631
Figura B-103 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	632
Figura B-104 Installazione del provino II.10 sul banco prova .....	633
Figura B-105 Rottura del provino II.10 .....	634
Figura B-106 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	635
Figura B-107 Installazione del provino II.11 sul banco prova .....	635
Figura B-108 Rottura del provino II.11 .....	636
Figura B-109 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	637
Figura B-110 Installazione del provino II.12 sul banco prova .....	638
Figura B-111 Rottura del provino II.12 .....	639
Figura B-112 Grafico carico spostamento dei punti di controllo con LVDT e spostamento medio .....	640
Figura B-113 Installazione del provino III.1 sul banco prova.....	641
Figura B-114 Grafico carico-spostamento .....	642
Figura B-115 Rottura dei provini.....	643
Figura B-116 Installazione del provino III.2 sul banco prova.....	643
Figura B-117 Grafico carico-spostamento .....	644
Figura B-118 Rottura dei provini.....	645
Figura B-119 Installazione del provino III.3 sul banco prova.....	645
Figura B-120 Grafico carico-spostamento .....	646
Figura B-121 Rottura dei provini .....	647
Figura B-122 Installazione del provino III.4 sul banco prova.....	647
Figura B-123 Grafico carico-spostamento .....	648
Figura B-124 Deformazione massima dei provini .....	649
Figura B-125 Installazione del provino III.5 sul banco prova.....	649
Figura B-126 Grafico carico-spostamento .....	650
Figura B-127 Rottura provini.....	651
Figura B-128 Installazione del provino III.6 sul banco prova.....	651
Figura B-129 Grafico carico-spostamento .....	652
Figura B-130 Installazione del provino III.7 sul banco prova.....	653
Figura B-131 Grafico carico-spostamento .....	654
Figura B-132 Rottura provini.....	655
Figura B-133 Installazione del provino III.8 sul banco prova.....	655
Figura B-134 Grafico carico-spostamento .....	656
Figura B-135 Installazione del provino III.9 sul banco prova.....	657
Figura B-136 Grafico carico-spostamento .....	657
Figura B-137 Rottura provini.....	658
Figura B-138 Installazione del provino III.10 sul banco prova.....	659
Figura B-139 Grafico carico-spostamento .....	659
Figura B-140 Rottura provini.....	660

Figura B-141 Installazione del provino III.11 sul banco prova..... 661

Figura B-142 Grafico carico-spostamento ..... 662

Figura B-143 Rottura provini..... 662

Figura B-144 Installazione del provino III.12 sul banco prova..... 663

Figura B-145 Grafico carico-spostamento ..... 663

Figura B-146 Rottura provini..... 664

Figura B-147 Grafico carico-spostamento ..... 665

Figura B-148 Grafico carico-spostamento ..... 668

Figura B-149 Grafico carico-spostamento ..... 670

Figura B-150 Installazione del provino III.16 sul banco prova..... 671

Figura B-151 Grafico carico-spostamento ..... 671

Figura B-152 Rottura provino..... 672

Figura B-153 Installazione del provino III.17 sul banco prova..... 673

Figura B-154 Grafico carico-spostamento ..... 673

Figura B-155 Rottura provino..... 674

Figura B-156 Installazione del provino III.18 sul banco prova..... 675

Figura B-157 Grafico carico-spostamento ..... 675

Figura B-158 Rottura provino..... 676

Figura B-159 Installazione del provino III.19 sul banco prova..... 677

Figura B-160 Grafico carico-spostamento ..... 677

Figura B-161 Rottura provino..... 678

Figura B-162 Installazione del provino III.20 sul banco prova..... 679

Figura B-163 Grafico carico-spostamento ..... 680

Figura B-164 Foto della prova e del punzonamento del pannello..... 681

Figura B-165 Abbassamenti mezzeria ..... 681

Figura B-166 Installazione del provino III.21 sul banco prova..... 682

Figura B-167 Grafico carico-spostamento ..... 682

Figura B-168 Foto della prova e del punzonamento del pannello..... 683

Figura B-169 Abbassamenti mezzeria ..... 684

# INDICE DELLE TABELLE

## I - PRINCIPI, CRITERI E MODELLI

Tabella 1-1 Popolazione residente in famiglia che si sposta giornalmente per motivo di lavoro -tempo impiegato e regione- Censimento 2011 (valori percentuali). (ISTAT 2013) .....	40
Tabella 1-2 Popolazione residente in famiglia che si sposta giornalmente per motivo di studio -tempo impiegato e regione- Censimento 2011 (valori percentuali). (ISTAT 2013) .....	41
Tabella 1-3 Famiglie per tipologia- Anno 1988, Medie 1994-1995, 1998-1999,2002-2003, 2006-2007 (valori in migliaia per 100 famiglie). (ISTAT 2013).....	42
Tabella 1-4 Famiglie per numero di componenti -Anno 1988, Medie 1994-1995,1998-1999, 2002-2003, 2006-2007 (per 100 famiglie). (ISTAT 2013) .....	42

## II - SISTEMA “INTEGRO BS 400”

Tabella 2-1 Modularità in relazione al singolo blocco e alla parete.....	126
Tabella 4-1 Carichi del solaio di copertura .....	174
Tabella 4-2 Carichi del solaio sottotetto .....	175
Tabella 4-3 Carichi del solaio interpiano .....	175
Tabella 4-4 Carichi del tamponamento collaborante.....	176
Tabella 4-5 Rsi e Rse in funzione della direzione del flusso termico .....	203
Tabella 4-6 Resistenza termica [m2K/W] di intercapedini non ventilate.....	204
Tabella 4-7 Dati tecnici dei vari elementi componenti il pacchetto di parete .....	204
Tabella 4-8 Metodo dei parametri qualitativi per la valutazione della prestazione energetica estiva .....	206
Tabella 4-9 Pressione di saturazione del vapore Psat[KPa] in funzione della temperatura.....	209
Tabella 4-10 Valori del diagramma delle pressioni .....	210
Tabella 4-11 Verifica igrometrica annuale.....	211
Tabella 4-12 Valori delle pressioni di saturazione mensili .....	211
Tabella 4-13 Schema del primo algoritmo .....	221
Tabella 4-14 Classificazione dei polimini.....	225
Tabella 4-15 Tabella riassuntiva delle prime sette iterazioni per la ricerca dei polimini .....	226
Tabella 4-16 Metrazioni minime dei locali di abitazione .....	235
Tabella 4-17 Definizione delle unità abitative di riferimento e individuazione del numero di moduli base necessary .....	237
Tabella 4-18 Schema del secondo algoritmo .....	239

Tabella 4-19 Schema del terzo algoritmo .....	245
Tabella 4-20 Tempi relativi alle lavorazioni nelle diverse ipotesi considerate .....	274

### III - SOLAIO “INTEGRO FS PRFV”

---

Tabella 3-1 Principali leghe utilizzate per la realizzazione di estensimetri e loro caratteristiche .....	366
Tabella 3-2 Risultati I fase di sperimentazione .....	388
Tabella 3-3 Risultati II fase di sperimentazione.....	405
Tabella 3-4 Risultati II fase di sperimentazione.....	429
Tabella 3-5 Risultati II fase di sperimentazione. Provini doppi.....	430
Tabella 4-1 Tabella dei pesi e del confezionamento .....	432
Tabella 4-2 Tabella di confronto delle rigidezze.....	459
Tabella 4-3 Tabella di confronto delle rigidezze reali e teoriche .....	467
Tabella 4-4 Analisi dei carichi .....	470
Tabella 4-5 Carichi massimi calcolati in corrispondenza della deformazione massima ammissibile .....	473
Tabella 4-6 tabella delle luci massime ammissibili per le due condizioni di carico distribuito .....	475
Tabella 4-7 Proprietà del polistirene .....	489
Tabella 4-8 Proprietà delle lastre accoppiate in gessofibra 10 + 10 mm.....	491
Tabella 4-9 Dati tecnici dei vari elementi componenti il pacchetto solaio.....	496
Tabella 4-10 Caratteristiche meccaniche acciaio e PRFV secondo normativa .....	499

# BIBLIOGRAFIA

- Aiello, Lorenzo, e Ettore Zambelli, a c. di. *Il sistema edilizio aperto*. Mariotti 1820, 2017.
- Alfarano, Gianpiero, e Roberto Bologna, a c. di. *La reversibilità del costruire: l'abitazione transitoria in una prospettiva sostenibile*. Mariotti 1820, 2017.
- Antonucci, Rodolfo. *Restauro e recupero degli edifici a struttura muraria: analisi e interventi sul costruito storico*. 4. ed. aggiornata e ampliata. Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2012.
- Argenti, Maria, e Maura Percoco. «Innovazione e Tecnica Nel Progetto Della Residenza». *MATERIA* 47 (2005): 100–107.
- Ascione, F., L. Feo, e F. Maceri. «Primi risultati sperimentali sul comportamento di collegamenti bullonati in strutture composite laminate», 1–10. Cuzzolin Editore, 2007. <https://www.iris.unisa.it/handle/11386/2283373#.Wbj8nshJaHs>.
- Ascione, F., L. Feo, e F. Maceri. «Risultati di un'indagine sperimentale sulla rottura per rifollamento di laminati compositi fibrorinforzati». *XXXVII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, Roma*, 2008.
- AVISA - Gruppo adesivi e sigillanti, e Federchimica. «Materiali Didattici Incollaggio/Adesivi». Signum srl (Milano), 2006.
- Badini, Claudio. *Materiali compositi per l'ingegneria*. Torino: CELID, 2003.
- Barbisan, Umberto. *Capriate e tetti in legno: progetto e recupero: tipologie, esempi di dimensionamento, particolari costruttivi, criteri e tecnologie per il recupero, manti di copertura*, 2000.
- Barker, Paul. «il problema delle abitazioni a Londra». *New Statesman*. 2002.
- Bartolini, Nicola, Davide Prati, Francesco Della Fornace, Riccardo Gulli, e Cecilia Mazzoli. «Misurare la qualità complessiva degli edifici. Il protocollo BQE (Building Quality Evaluation)». In *Colloqui.AT.e 2015: l'evoluzione del sapere in architettura tecnica*, 43–42. Rimini: Maggioli Editore, 2016.
- Bartolini, Nicola, Davide Prati, Alice Schweigkofler, Riccardo Gulli, e Cecilia Mazzoli. «Strumenti e metodi per la progettazione parametrica di un procedimento costruttivo innovativo». In *Colloqui.AT.e 2015: l'evoluzione del sapere in architettura tecnica*, 43–42. Rimini: Maggioli Editore, 2016.

- Bartolini, Nicola, Alice Schweigkofler, Davide Prati, Cecilia Mazzoli, e Riccardo Gulli. «Parametric Design Tools and Methods for an Innovative Constructive Procedure». *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture*, n. 1 (1 dicembre 2016). <https://doi.org/10.17410/tema.v2i1.92>.
- Barucci, Clementina. *La casa antisismica: prototipi e brevetti: materiali per una storia delle tecniche e del cantiere*, 1990.
- Belluzzi, Odone. *Scienza delle Costruzioni*. Vol. 1. Zanichelli, 1989.
- Beraghi, Luca. «Edilizia sostenibile: modelli progettuali e tecniche costruttive». In *Quaderno del dottorato di ricerca in ingegneria edile/architettura - volume 3*. Pavia: Università di Pavia, 2006.
- Bergamaschi, Paolo, Paolo Bertozzi, e Agnese Ghini. *Il sistema stratificato a secco: una tecnologia sostenibile per l'architettura della casa*. Palermo: D. Flaccovio, 2010.
- Bianco, Alessia, a c. di. *La «Casa baraccata»: guida al progetto e al cantiere di restauro*. Roma: GB Editoria, 2010.
- Bignozzi, M.C., S. Manzi, I. Lancellotti, E. Kamseu, L. Barbieri, e C. Leonelli. «Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag». *Applied Clay Science* 73, n. 1 (2013): 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.015>.
- Bilò, Massimo. *Tipo e forma nell'architettura: il fondamento normativo del progetto*. Mariotti 1820, 2017.
- Bologna, Roberto. «La reversibilità del costruire». *Costruire in laterizio*, dicembre 2008.
- Bolognesi, Cecilia, e Paolo Mazzoleni, a c. di. *Housing contest: repertorio di progetti per edifici residenziali ad elevate prestazioni e basso costo = design directory for high performance, low cost residential buildings*. Mariotti 1820, 2017.
- Bondanelli, Michele, Rosella Bellesi, Alessio Avaltroni, Paola Mazzotti, e Francesco Doglioni, a c. di. *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico: integrazioni alla luce delle esperienze nella Regione Marche*. Mariotti 1820, 2017.
- Bonito, Marcello. *Terra tremante*, 1980.
- Botta, Carlo, e Anna Maria Salvadè. *Le vestigia del terrore: storia d'Italia continuata da quella del Guicciardini sino al 1789 (libro 49.)*. Milano: LED, 2011.

- Bufaini, Stefano, Vincenzo D’Aria, e Domenico Squillacioti. *Meccanica delle murature. Dalla definizione della qualità muraria alle indagini sperimentali mediante la tecnica dei martinetti piatti*. Consultato 4 dicembre 2017. <https://www.unilibro.it/libro/bufarini-stefano-d-aria-vincenzo-squillacioti-domenico/meccanica-murature-definizione-qualita-muraria-indagini-sperimentali-mediante-tecnica-martinetti-piatti/9788863103984>.
- Cangi, Giovanni, e Francesco Giovanetti. *Manuale del recupero strutturale e antisismico*. 2. ed. Roma: Dei, 2012.
- Caniggia, Gianfranco, e Gian Luigi Maffei. «2, Il progetto nell’edilizia di base». *Composizione architettonica e tipologia edilizia*, 2017.
- Caniggia, Gianfranco, e Gian Luigi Maffei. *Lettura dell’edilizia di base*. Nuova ed. Mariotti 1820, 2017.
- Casavecchia, Stefano. «Sistemi costruttivi per l’edilizia scolastica sostenibile». Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, 2014.
- Ceccotti, Ario. «Legno: il materiale da costruzione affidabile per gli edifici sismo-resistenti». *12 IHF-Internationales Holzbau-Forum*, 6 dicembre 2006.
- Cirillo, Antonio. *Legno. Criteri di calcolo e aspetti realizzativi*. Milanofiori Assago: Wolters Kluwer Italia, 2014.
- Cleri, Emanuele. «Pareti prefabbricate a secco per l’edilizia sostenibile.». Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, 2015.
- CNR. «Guide for the design and construction of structures made of FRP pultruded elements. Advisory Committee on Technical Recommendations for Constructions, Italian National Research Council», 9 ottobre 2008.
- Davidovits, J. «Geopolymers - Inorganic polymeric new materials». *Journal of Thermal Analysis* 37, n. 8 (1991): 1633–56. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>.
- Davidovits, Joseph. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 4th edition. Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, 2015.
- Davies, Colin. *High Tech Architecture*. New York: Rizzoli international, 1988.
- De Nardi, Diego, e Jean Prouvé. *Jean Prouvé: idee costruttive*. Mariotti 1820, 2017.
- Del Bino, Delfo, Michele Di Sivo, e Fedelina Santi. *Clima ed edilizia: rapporto tra tipologia edilizia e soleggiamento*. Mariotti 1820, 2017.
- Del Piano, Enrico. *Contributo al calcolo delle intelaiature ricolme di muratura: determinazione delle sollecitazioni in alcuni casi speciali*. Bologna: Zanichelli, 1937.

- Delatte, Jacqueline, e Gérard Facy. «Des Bétons Antiques aux Géopolymères». *Des Bétons Antiques aux Géopolymères*, n. 180 (settembre 1993): 8–16.
- Di Micco, Sara. *La casa ecologica prefabbricata: sistemi e tecniche di costruzione, i contesti ambientali, schede di progetto: con disegni, prospetti, immagini a colori*. Mariotti 1820, 2017.
- Di Perna, C., F. Stazi, A. Ursini Casalena, e M. D’Orazio. «Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads». *Energy and Buildings* 43, n. 1 (1 gennaio 2011): 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>.
- Di Perna, C., Francesca Stazi, A. Ursini Casalena, e Alessandro Stazi. «Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica». *L’industria dei Laterizi*, n. 110 (2008).
- Dolomieu, Déodat: Gratet. *Il terremoto del 1783*. Locri: Pancallo, 2008.
- Dudeney, H. E. *The Canterbury Puzzles*. Courier Corporation, 2002.
- Emy, Amand Rose. *Traité de l’art de la charpenterie*, 1841.
- Faresin, Anna, Ernesto Antonini, e Valeria Tatano. *Architettura in calcestruzzo: soluzioni innovative e sostenibilità*. Torino: Utet scienze tecniche, 2012.
- Fiandaca, Ornella. *Le béton armé «système Hennebique» a Messina fra XIX e XX secolo: dalle sperimentazioni pre-terremoto del brevetto alle sue declinazioni antisismiche*. Ariccia: Aracne, 2014.
- França, José Augusto. *Una città dell’illuminismo: la Lisbona del marchese di Pombal*. Collana di architettura, 1972.
- Giordano, Guglielmo. *La moderna tecnica delle costruzioni in legno*. 3. ed. riveduta. Mariotti 1820, 2017.
- Giovanetti, Francesco, e Rita Argalia, a c. di. *Manuale del recupero del comune di Città di Castello*. Roma: Edizioni DEI, Tipografia del Genio Civile, 1992.
- Giovanetti, Francesco, e Paolo Marconi, a c. di. *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Mariotti 1820, 2017.
- Giuffrè, Antonino. *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*. Roma: Kappa, 1991.
- Granato, Maria Teresa. «Lo spazio della casa - La casa INDIVIDUALE come risposta dell’ABITARE». Phd, Università di Camerino, 2007. <http://ecum.unicam.it/29/>.

- Greco, Alessandro, e Riccardo Gulli, a c. di. *Innovazione ed evoluzione nel progetto della residenza: le nuove frontiere dell'industrializzazione per l'housing in Italia*. Monfalcone: Edicomedizioni, 2010.
- Grimaldi, Achille. *La Cassa Sacra, ovvero La soppressione delle manimorte in Calabria nel secolo 18*. Napoli: Stamperia dell'Iride, 1863.
- Gulli, Riccardo. *Metis e techne: gli strumenti del progetto per la manutenzione e il recupero dell'edilizia storica*. Monfalcone: Edicomedizioni, 2000.
- Gulli, Riccardo. *Recupero sostenibile del patrimonio costruito in ambito sismico*. Mariotti 1820, 2017.
- Gulli, Riccardo. *Struttura e costruzione*. Nuova edizione rivista e ampliata. Mariotti 1820, 2017.
- Gulli, Riccardo. *Tecnica e progetto: l'esperienza della Weissenhof di Stoccarda del 1927 nell'ambito delle sperimentazioni edilizie tedesche degli anni '20*. Ancona: CLUA, 1990.
- Gulli, Riccardo, e Giovanni Mochi. *Bovedas tabicadas: architettura e costruzione*. Roma: CDP, 1995.
- Iacobelli, Franco. *Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica: con particolari riferimenti alle norme tecniche per le costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008 e alla circolare 2 febbraio 2009, n. 617 ed alle direttive per i beni tutelati*. 7. ed. Roma: EPC, 2011.
- Iacomoni, Andrea. «Abitare lo spazio flessibile». *Macramè* 2, n. 1 (1 gennaio 2008): 53–61. <https://doi.org/10.13128/1971-6249/2287>.
- Istat. «Gli spostamenti quotidiani per motivi di studio o lavoro», 30 novembre 2013. <http://www.istat.it>.
- Joshi, S. V., e M. S. Kadu. «Role of Alkaline Activator in Development of Eco-friendly Fly Ash Based Geo Polymer Concrete». *International Journal of Environmental Science and Development*, 2012, 417–21. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.258>.
- Lancellotti, Isabella, Chiara Ponzoni, Luisa Barbieri, e Cristina Leonelli. «L'attivazione alcalina per la stabilizzazione dei rifiuti pericolosi». *La Chimica & L'Industria*, green chemistry, n. 9 (novembre 2012).
- Laner, Franco. *Tecnologia del recupero delle strutture lignee*. Mestre: Flap, 2005.
- Latina, Corrado. *Terremoti e costruzioni: progetto e tecnologia della resistenza sismica*. Firenze: Alinea, 1989.
- Maganzini, I, G Agazio, M Borgatti, E Camerana, e S Canevazzi. «Giornale del Genio Civile: rivista dei lavori pubblici». 1909.

- Magnati, Vincenzo. *Notitie istoriche de' terremoti succeduti ne' secoli trascorsi, e nel presente, indirizzate alla serenissima real maestà di Carlo 2.* In Napoli: appresso Antonio Bulifon, 1688.
- Marchi, Giulia. «Tecniche innovative per il recupero edilizio in ambito sismico. Solai in struttura lignea con impalcati in grigliato stampato PRFV.» Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, 2013.
- Marianelli, Marika. «Soluzioni tecniche innovative per il miglioramento prestazionale di solai in legno. Sperimentazione di nuove configurazioni di impalcato sandwich in PRFV.» Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, 2017.
- Mariani, Massimo. *Consolidamento delle strutture lignee con l'acciaio.* Roma: Dei, 2004.
- Marinelli, Leonardo. *L'arte muraria in Bologna nell'eta pontificia.* Credito emiliano, 1992.
- Martí Arís, Carlos. *Las variaciones de la identidad: ensayo sobre el tipo en arquitectura.* Mariotti 1820, 2017.
- Masciari Genoese, F. *Trattato di costruzioni antisismiche preceduto da un corso di sismologia,* 1915.
- Massarelli, Matteo, e Samuela Ristori. «Forme contemporanee dell'abitare». *Macramè* 2, n. 1 (1 gennaio 2008): 71–77. <https://doi.org/10.13128/1971-6249/2296>.
- Mau, Bruce. *An incomplete manifesto for growth.* Combination Press, 2001.
- Mazzoli, C., O. Fusco, L. Guardigli, e R. Gulli. «Innovative materials and technologies for a new envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock». In *CESB 2013 PRAGUE - Central Europe Towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*, 405–8, 2013. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84925234142&partnerID=40&md5=a8438c675254adfe0b20189ed99692f9>.
- Mazzoli, Cecilia, e Davide Prati, a c. di. «Colloqui.AT.e 2015: l'evoluzione del sapere in architettura tecnica», 1–766. Rimini: Maggioli Editore, 2016.
- Membri della commissione “Materiali compositi e innovativi”. «Le normative sull'impiego di materiali compositi e innovativi». *rivista dell'ordine degli ingegneri della provincia di Roma* 1 (2014).
- Menditto, Giovanni. «Alcuni elementi essenziali di sismologia applicati all'ingegneria». *CT - Consulente Tecnico* 4 (dicembre 2010).
- Menges, Achim. «Simple Systems-Complex Capacities. Integrative Processes of Computational Morphogenesis in Architecture». *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment* 1, n. 2 (2011): 68–77.

- Mercalli, Giuseppe. *I terremoti della Calabria Meridionale e del Messinese: saggio di una monografia sismica regionale*. Roma: Tip. della R. Accademia dei Lincei, 1897.
- Milizia, Francesco <1725-1798>. *Principi di architettura civile*. Planning & design, 1847.
- Minguzzi, Gianluca, a c. di. *Architettura sostenibile: processo costruttivo e criteri biocompatibili*. S.l.: Mariotti 1820, 2017.
- Ministero dei lavori pubblici. Direzione generale dei servizi speciali. *L'opera del Ministero dei lavori pubblici nei comuni colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908. I, Relazione*. Roma: Tip. dell'unione editrice, 1912.
- Ministero per i Beni. Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio del patrimonio culturale: Allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (2011).
- Mochi, Giovanni, a c. di. *Teoria e pratica del costruire: saperi, strumenti, modelli: esperienze didattiche e di ricerca a confronto: seminario internazionale: Ravenna, 27-29 ottobre 2005*. Ravenna: Moderna, 2005.
- Mochi, Giovanni, e Giorgia Predari. *La costruzione moderna a Bologna: 1875-1915: ragione scientifica e sapere tecnico nella pratica del costruire in cemento armato*. Milano: Bruno Mondadori, 2012.
- Modena, Claudio, F. da Porto, e M. R. Valluzzi. «Brick and Block Masonry: Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, 26-30 June 2016». CRC Press, 2016.
- Morandi, P., R. R. Milanesi, e G. Magenes. «Innovative seismic solution for clay masonry infills with sliding joints: principles and details». In *Proceedings of 16th International Brick and Block Masonry Conference*, 26–30, 2016. [https://www.researchgate.net/profile/Paolo\\_Morandi2/publication/304989843\\_Innovative\\_seismic\\_solution\\_for\\_clay\\_masonry\\_infills\\_with\\_sliding\\_joints\\_principles\\_and\\_details/links/577e36f708aeaa6988b094a7.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Paolo_Morandi2/publication/304989843_Innovative_seismic_solution_for_clay_masonry_infills_with_sliding_joints_principles_and_details/links/577e36f708aeaa6988b094a7.pdf).
- Morandi, Paolo, Riccardo Milanesi, e Guido Magenes. «Sistema innovativo antisismico per tamponature in laterizio a giunti scorrevoli». *Costruire in laterizio*, dicembre 2015.
- Mosele, Flavio, e Lorenzo Bari. «Comportamento e verifica dei tamponamenti soggetti ad azioni sismiche». *Murature oggi* 109, n. 2 (2011).
- Nespolo, Enrico. «I solai collaboranti nella progettazione antisismica». Consultato 12 settembre 2017. [http://www.ingenio-web.it/Articolo/1972/I\\_solai\\_collaboranti\\_nella\\_progettazione\\_antisismica.html](http://www.ingenio-web.it/Articolo/1972/I_solai_collaboranti_nella_progettazione_antisismica.html).
- Neufert, Ernst, e Luigi Lenzi. *Enciclopedia pratica per progettare e costruire: ad uso di architetti, ingegneri, costruttori e periti edili, docenti e discenti: norme e prescrizioni per progettare*,

*costruire, dimensionare, distribuire dimensioni di edifici, ambienti, impianti e suppellettili in funzione dell'uomo che se ne deve servire*. 1. ed. italiana autorizzata. Mariotti 1820, 2017.

Paduano, Teresa. «La costruzione razionale della casa alla luce delle categorie del mobile e del transitorio». Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006.

Parenti, Giulia. «Tecniche innovative per il recupero edilizio in ambito sismico. Solai in struttura lignea con irrigidimento dell'impalcato in grigliato stampato in PRFV a giunti sfalsati». Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, 2014.

Patti, Fabrizio. «L'edilizia è un disastro di produttività, ecco come costi e tempi possono dimezzarsi», 9 ottobre 2017. <http://www.linkiesta.it/it/article/2017/10/09/ledilizia-e-un-disastro-di-produttivita-ecco-come-costi-e-tempi-posson/35764/>.

Pesando, Fabrizio, e Maria Paola Guidobaldi. *Pompei, Oplontis, Ercolano, Stabiae*. Roma [etc.]: GLF editori Laterza, 2006.

Pesso, Luigi. *Sul consolidamento delle fabbriche nelle Calabrie contro i danni dei terremoti: incatenamento delle fabbriche; case baraccate; camera di sicurezza*. Camilla e Bertolero, 1877.

Piazza, Maurizio, Roberto Tomasi, e Roberto Modena. *Strutture in legno: materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*. Mariotti 1820, 2017.

Pichi, Daniele. «Prefabbricazione». In *Quaderno del dottorato di ricerca in ingegneria edile/architettura - volume 3*. Pavia: Università di Pavia, 2006.

Pollio, Vitruvius. *I dieci libri dell'architettura*. Libri rari: collezione di ristampe con nuovi apparati, 1987.

Prati, Davide, Matilde Signorello, e Riccardo Gulli. «Innovative Technical Solutions for Improving Performance of Wooden Floors». *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture*, n. 2 (6 novembre 2017): 81–98. <https://doi.org/10.17410/tema.v3i2.134>.

Prati, Davide, Matilde Signorello, e Riccardo Gulli. «Soluzioni Tecniche Innovative per Il Miglioramento Prestazionale Di Solai in Legno», 511–20. Roma: Gangemi Editore spa, 2017.

Predari, Giorgia. *I solai latero-cementizi nella costruzione moderna in Italia, 1930-1950*. Bologna: Bononia University Press, 2015.

Rebecchini, Marcello. *Il fondamento tipologico dell'architettura: teoria e significato del tipo*. Mariotti 1820, 2017.

Redazione. «Strutture in acciaio smontabili. Il futuro del settore delle costruzioni?». CASA&CLIMA.com. Consultato 12 settembre 2017.

[http://www.casaclima.com/ar\\_20123\\_TECH-Ricerche-acciaio-strutture-smontabili-Strutture-in-acciaio-smontabili.-Il-futuro-del-settore-delle-costruzioni.html](http://www.casaclima.com/ar_20123_TECH-Ricerche-acciaio-strutture-smontabili-Strutture-in-acciaio-smontabili.-Il-futuro-del-settore-delle-costruzioni.html).

- Ruffilli, M. «L'abitazione transitoria per il nuovo nomadismo». In *La reversibilità del costruire. L'abitazione transitoria in una prospettiva sostenibile*, a cura di Roberto Bologna e Giampietro Alfarano. Maggioli Editore, 2002.
- Ruggieri, Nicola. «Il sistema antisismico borbonico, muratura con intelaiatura lignea, genesi e sviluppo in Calabria alla fine del '700». *Bollettino Ingegneri* 10 (s.d.): 3–14.
- Ruggieri, Nicola. «La casa antisismica». In *Proceedings of the International Conference on Conservation of Historic Wooden Structures, Collegio degli Ingegneri della Toscana, Florence*, 2005. <http://www.nicolaruggieriarchitetto.it/file%20pdf/LA%20CASA%20ANTISISMICA,%20Nicola%20Ruggieri.pdf>.
- Ruggieri, Nicola. «Timber Framing Wall in the Italic Civilization». In *Historical Earthquake-Resistant Timber Frames in the Mediterranean Area*, a cura di Nicola Ruggieri, Gennaro Tampone, e Raffaele Zinno, 1–10. Springer International Publishing, 2015. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16187-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16187-7_1).
- Santos, Daniela. *Strutture e case prefabbricate*. Modena: Logos, 2010.
- Senthivel, R., e P. B. Lourenco. «Finite Element Modelling of Deformation Characteristics of Historical Stone Masonry Shear Walls». *Engineering Structures* 31, n. 9 (settembre 2009): 1930–43. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.046>.
- Signorello, Matilde. «Progetto e verifica sperimentale di soluzioni tecniche innovative per il miglioramento prestazionale di solai in legno». Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura, 2015.
- Silva, Natalia Jorquera. «Chilean earthen building cultures. Local strategies of environmental adaptation.» Consultato 13 settembre 2017. [http://www.academia.edu/download/34010309/EARTH\\_USA\\_2013\\_Chilean\\_earthen\\_building\\_cultures\\_\\_NJorquera.pdf](http://www.academia.edu/download/34010309/EARTH_USA_2013_Chilean_earthen_building_cultures__NJorquera.pdf).
- Staib, Gerald, Andreas Dörröfer, e Markus Rosenthal. *Components and Systems: Modular Construction: Design, Structure, New Technologies*. München: Basel [etc.]: Detail, Institut für internationale Architektur-Dokumentation ; Birkhäuser, 2008.
- Studioteda, a c. di. *Edifici a struttura di legno: progettazione e realizzazione*. Milano: Lampi di Stampa, 2012.
- Sutton, Michael A., Jean Jose Orteu, e Hubert Schreier. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. 2009 edition. New York, N.Y.: Springer, 2009.

- Tampone, Gennaro. *Il restauro delle strutture di legno: il legname da costruzione, le strutture lignee e il loro studio, restauro, tecniche di esecuzione del restauro*. Milano: U. Hoepli, 1996.
- Tichelmann, Karsten, Jochen Pfau, e Enrico De Angelis. *Costruzioni a secco*, 2017.
- Tobriner, Stephen. «La Casa Baraccata: Earthquake-Resistant Construction in 18th-Century Calabria». *Journal of the Society of Architectural Historians* 42, n. 2 (1 maggio 1983): 131–38. <https://doi.org/10.2307/989827>.
- Traini, Lorenzo. «Sistemi costruttivi industrializzati a secco: la massività e la modularità di “Integro BS\_400 EVO”». *Magistrale, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Scuola di Ingegneria e Architettura*, 2016.
- Trivelli, Alessandro. *Edilizia residenziale innovativa. Progettare l’housing contemporaneo. Con CD-ROM*. Maggioli Editore, 2011.
- Vaccaro, Paolo. *Aspetti e problemi della prefabbricazione dell’edilizia residenziale in Italia*. Venezia: s.n., 1964.
- Vallucci, Sara, Stefano Lenci, e Enrico Quagliarini. *Costruzioni storiche in muratura: vulnerabilità sismica e progettazione degli interventi*. Assago: Wolters Kluwer Italia, 2014.
- Villa, Valentina. «L’industrializzazione del cantiere: un problema ancora non risolto nella filiera delle costruzioni». *Ingegneri* 2014, n. 3 (2014). [http://digitalmagazine.maggioli.it/articolo\\_digital/dettaglio/autori-vari/industrializzazione-del-cantiere-un-problema-ancora-non-risolto-nella-filiera-delle-costruzioni-di-valentina-villa-ing\\_2014\\_3\\_9\\_11-20901.html](http://digitalmagazine.maggioli.it/articolo_digital/dettaglio/autori-vari/industrializzazione-del-cantiere-un-problema-ancora-non-risolto-nella-filiera-delle-costruzioni-di-valentina-villa-ing_2014_3_9_11-20901.html).
- Vivenzio, Giovanni. *Istoria de’ tremuoti avvenuti nella provincia della Calabria ulteriore e nella città di Messina nell’anno 1783*. Napoli: nella Stamperia regale, 1788.
- Willis, C. *Empire State Building. 21 mesi per costruire il grattacielo più alto del mondo*. Tradotto da D. Biasi. Milano: Mondadori Electa, 2004.
- World Commission on Environment and Development, a c. di. *Our common future*. Oxford paperbacks. Oxford; New York: Oxford University Press, 1987.
- Zambelli, Ettore, Marco Imperadori, e Pietro Antonio Vanoncini. *Costruzione stratificata a secco: tecnologie edilizie innovative e metodi per la gestione del progetto*. Mariotti 1820, 2017.
- Zani, Gino. «La casa asismica economica», 1923. <http://www.ginozani.org/>.
- Zani, Gino. «Nuovi sistemi di costruzioni edilizie moderne per i paesi soggetti a terremoto», 1925.

# RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto vorrei ringraziare il Prof Riccardo Gulli per avermi dato la possibilità di iniziare questo percorso e per avermi guidato lungo tutto il suo sviluppo con grande professionalità e competenza.

Ringrazio il Prof. Giovanni Mochi per il tempo prezioso speso per darmi supporto in merito alle numerose problematiche tecniche suggerendo spesso soluzioni semplici ed efficaci.

Ringrazio il Prof. Luca Guardigli per gli innumerevoli spunti critici di riflessione che mi ha lanciato stimolando continuamente la mia curiosità sulle tematiche affrontate.

Ringrazio il Prof. Marco Alvisè Bragadin per l'assistenza fornita in merito ai temi della produzione edilizia e alla cantierizzazione.

Ringrazio l'ing. Simone Garagnani per l'amicizia mostrata nei miei confronti e per il supporto nelle attività di modellazione e rendering.

Un ringraziamento particolare all'ing. Cecilia Mazzoli e all'ing. Nicola Bartolini per l'amicizia e la condivisione di un percorso di ricerca appassionante.

Ringrazio inoltre la prof. Annarita Ferrante, l'ing. Giorgia Predari, l'ing. Anastasia Fotopoulou e l'ing. Elena Cattani per aver sopportato la mia presenza all'interno del dipartimento.

Un enorme riconoscimento va a tutto il personale del Laboratorio LISG. L'aiuto di Roberto Carli, Mario Marcolongo, Roberto Bianchi e Luca Capuzzi è stato indispensabile per il corretto svolgimento delle prove di carico. Grazie per avermi accolto con estrema disponibilità e per il supporto altamente qualificato e professionale.

Allo stesso modo voglio ringraziare Giovanni Bacci per avermi messo a disposizione il suo supporto per l'utilizzo delle risorse del Laboratorio Silab Fabbricazione.

Questo percorso di ricerca non sarebbe nemmeno cominciato senza il supporto della MMGrigliati di Udine che ha fornito gratuitamente i campioni di materiale per la realizzazione dei provini. Ringrazio sentitamente Alessandro Mondolo e Emanuel Morandini per aver creduto nel progetto e garantito il necessario supporto.

Anche la collaborazione delle ditte Ardea Progetti e Sistemi e Sika Italia è stata fondamentale per portare a termine questo percorso di ricerca. Ringrazio il Prof. Lino Credali e l'ing. Gianluca Ussia per la fornitura degli adesivi Ardea e l'ing. Daniele Meroni, responsabile della divisione "Resins & Composites Systems" di Sika.

Ringrazio la Prof. Bzy per le preziose riflessioni sulla "*causa delle cose*".

Ringrazio l'ing. Beatrice Silvano per il supporto indispensabile per la modellazione ed il calcolo strutturale.

Ringrazio infine l'ing. Alice Schweigkofler per il fondamentale contributo allo sviluppo degli algoritmi parametrici, l'ing. Giulia Marchi, l'ing. Giulia Parenti, l'ing. Matilde Signorello e l'ing. Marika Marianelli per la collaborazione nella realizzazione delle prove di carico e l'ing. Emanuele Cleri e l'ing. Lorenzo Traini per la collaborazione nello sviluppo dei prototipi.