

Alma Mater Studiorum - Università degli studi di Bologna

Facoltà di Ingegneria

DICASM - Dipartimento di Chimica Applicata e Scienza dei Materiali

Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Materiali XX Ciclo

ING-IND/22

**CONTROLLO E QUALIFICAZIONE DI AGGREGATI DI
DEMOLIZIONE PER NUOVI CALCESTRUZZI
SOSTENIBILI: IL CASO DELL' "ECOMOSTRO"
DI PUNTA PEROTTI**

Dottorando:

Ing. A. B. Costantino

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. Franco Sandrolini

Correlatore:

Chiar.mo Prof. Ing. P.P. Diotallevi

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. G. Timellini

ESAME FINALE ANNO 2008

AI MIEI CARI

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. TRASFORMAZIONE DELLE MACERIE DA DEMOLIZIONE E COSTRUZIONE IN MATERIE PRIME SECONDE	5
2.1 IL RICICLAGGIO DEI RIFIUTI DELL'EDILIZIA	5
2.1.1 Aspetti qualitativi e quantitativi	6
2.1.2 Costi dell'aggregato riciclato e campi di impiego	10
2.2 DEMOLIZIONE SELETTIVA	11
2.2.1 Impianti di produzione di aggregati riciclati	13
2.2.2 Visita ad alcuni impianti con tecnologia R.O.S.E.	14
2.2.3 Disomogeneità costituzionale e possibile incostanza nel tempo	17
2.3 PRODUZIONE DI CALCESTRUZZO CON AGGREGATI RICICLATI: LA NORMA EN 12620	18
2.4 DECRETO MINISTERIALE DEL 14.09.2005	21
2.5 DECRETO MINISTERIALE DEL 14.01.2008	22
3. DEMOLIZIONE DI UN EDIFICIO A TORRE CON IL SISTEMA DELLE MICRO - CARICHE ESPLOSIVE: CONTROLLO DEL MICRO - SISMA ED EFFETTI SULLE COSTRUZIONI VICINE	25
3.1 LE DEMOLIZIONI CON ESLOSIVO IN ITALIA	26
3.2 IL CANTIERE DI PUNTA PEROTTI	31
3.3 EFFETTI DELLA DEMOLIZIONE	32
3.4 TECNICA DI DEMOLIZIONE	35
3.5 CONOSCENZA ACCURATA DELL'EDIFICIO STRUMENTATO	38
3.6 MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI	40
3.7 ACQUISIZIONE DEL SEGNALE	41
3.8 ANALISI DEL SEGNALE	43
3.9 ANALISI SPETTRALE	48
3.10 VALIDAZIONE DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI	49
4. SUL CALCESTRUZZO CONFEZIONATO CON AGGREGATI DI RICICLO	53
4.1 GLI AGGREGATI DI RICICLO	53
4.2 PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO ALLO STATO FRESCO	59
4.2.1 Lavorabilità del calcestruzzo con aggregati riciclati	59

4.2.2	<i>Contenuto d'aria</i>	62
4.3	<i>PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO INDURITO</i>	62
4.3.1	<i>Massa volumica</i>	62
4.3.2	<i>Resistenza a sforzo normale di compressione</i>	63
4.3.3	<i>Resistenza a sforzo normale di trazione</i>	65
4.3.4	<i>Modulo elastico</i>	65
4.3.5	<i>Attacchi chimici del calcestruzzo con aggregati riciclati</i>	67
4.3.6	<i>Prove di gelo – disgelo sul calcestruzzo con aggregati riciclati</i>	67
4.3.7	<i>Permeabilità e porosità</i>	68
4.3.8	<i>Comportamento al fuoco</i>	70
4.3.9	<i>Rigonfiamento, ritiro idrometrico e deformazioni viscosse</i>	70
4.3.10	<i>Zona di transizione: interfaccia pasta - aggregato</i>	70
4.4	<i>PRECEDENTI ESPERIENZE</i>	75
4.4.1	<i>Formulazioni dei calcestruzzi realizzati</i>	77
4.4.2	<i>Modalità di prova e risultati</i>	79
5.	<i>CALCESTRUZZO STRUTTURALE IN AMBIENTE SEVERO: IL CASO DEL COMPLESSO DI PUNTA PEROTTI</i>	83
5.1	<i>DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO</i>	85
5.2	<i>CAMPIONAMENTO</i>	87
5.3	<i>RESISTENZA MECCANICA DEL CALCESTRUZZO</i>	88
5.4	<i>CARBONATAZIONE E SALI IDROSOLUBILI DEL CALCESTRUZZO</i>	91
5.5	<i>RESISTENZA MECCANICA DEL CALCESTRUZZO, CARBONATAZIONE E SALI</i>	94
5.6	<i>MAPPE DEL DEGRADO</i>	96
6.	<i>GLI AGGREGATI DI RICICLO DI PUNTA PEROTTI</i>	99
6.1	<i>FATTORI DI RISCHIO</i>	101
6.2	<i>MITIGAZIONE DEI FATTORI DI RISCHIO</i>	104
6.3	<i>APPROVVIGIONAMENTO DEL DEMOLITO TRATTATO IN CANTIERE</i>	105
6.4	<i>CALIBRAZIONE DELLA FRANTUMAZIONE DI LABORATORIO</i>	106
6.5	<i>FRANTUMAZIONE E VAGLIATURA DI LABORATORIO</i>	112
6.6	<i>QUALIFICAZIONE DEGLI AGGREGATI IN LABORATORIO</i>	114
6.6.1	<i>Analisi granulometrica</i>	115
6.6.2	<i>Analisi della composizione del materiale</i>	117
6.7	<i>CARATTERIZZAZIONE CHIMICO – FISICA DEGLI AGGREGATI</i>	121
7.	<i>GLI AGGREGATI NATURALI</i>	127

7.1 ANALISI GRANULOMETRICA	128
7.2 CARATTERIZZAZIONE FISICA DEGLI AGGREGATI	131
8. CALCESTRUZZI STRUTTURALI SOSTENIBILI	133
8.1 MISCELE	134
8.2 PROCESSO DI MISCELAZIONE	139
8.3 RISULTATI	144
8.3.1 Massa volumica del calcestruzzo fresco	145
8.3.2 Lavorabilità	146
8.3.3 Massa volumica del calcestruzzo indurito	147
8.3.4 Resistenza a compressione	148
8.4 STIMA DELLE MACERIE ED ASPETTI ECONOMICI	152
8.5 SOSTENIBILITÀ IDRICA	159
8.6 MALTE CON AGGREGATI DI RICICLO E CENERI DA BIOMASSA	160
CONCLUSIONI	163
BIBLIOGRAFIA	167
RINGRAZIAMENTI	173

1.INTRODUZIONE

Negli anni la produzione di rifiuti è andata progressivamente aumentando, quale sintomo del progresso economico e dell'aumento dei consumi. La diversificazione dei processi produttivi ha inoltre generato rifiuti di diversa natura con effetti sempre più negativi per l'ambiente.

Le considerevoli quantità di rifiuti prodotti, che tendono sempre più ad incrementarsi, unite alle difficoltà di smaltimento e alla crescita dei costi di trattamento, hanno determinato un sempre maggior interesse verso il riciclaggio, la possibilità, cioè, di recuperare alcune frazioni dei rifiuti reinserendoli nei cicli produttivi sotto forma di materie prime seconde.

I rifiuti da costruzione e demolizione, o rifiuti da C&D, provengono essenzialmente dalle operazioni di costruzione e manutenzione di opere edili e civili, da attività estrattive e dalla demolizione delle costruzioni.

La domanda di aggregati per calcestruzzo ha generato forti impatti sul territorio a causa di una attività estrattiva che, con molta difficoltà, riesce ad essere pianificata e regolamentata; dall'altra, il notevole quantitativo di rifiuti proveniente dal settore edile ha generato una domanda di impianti di smaltimento difficile da soddisfare: ciò ha comportato il frequente abbandono in discariche abusive, distribuite nelle aree periferiche dei centri urbani.

Alla luce di quanto detto è evidente l'importanza di utilizzare gli aggregati provenienti dal trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione, quale risorsa complementare ed alternativa alle materie prime naturali.

Sono trascorsi ormai diversi anni da quando (2003) mi fu data l'opportunità di affrontare, in occasione della tesi di laurea, l'innovativo tema del confezionamento del calcestruzzo strutturale con aggregati di riciclo.

Le prime esperienze riguardarono l'utilizzo di aggregati "tout venant" provenienti da un impianto di riciclo, con tecnologia ROSE (recupero omogeneizzato scarti edilizia), ubicato a Villa Musone (AN).

I risultati ottenuti furono molto utili ma riferiti al limitato quantitativo di aggregato studiato, non si conosceva la provenienza dei prodotti di demolizione e la caratterizzazione degli aggregati fu fatta solo in laboratorio. Non poteva pertanto essere garantita l'affidabilità del calcestruzzo prodotto.

La sperimentazione evidenziò comunque i problemi di assorbimento d'acqua e di impiego della frazione fine caratteristici degli aggregati di riciclo per calcestruzzo.

Si capì, già allora, che la possibilità di utilizzare convenientemente gli aggregati di riciclo per confezionare calcestruzzi strutturali affidabili dipendeva non solo dalla qualificazione degli stessi attraverso indagini di laboratorio necessarie ad acquisire i parametri di progetto della miscela (analisi granulometrica, assorbimento d'acqua, massa volumica, ecc.) ma anche attraverso la conoscenza dei prodotti di demolizione prima del trattamento di riciclo.

I risultati non mancarono, molto interessanti furono le prestazioni del calcestruzzo confezionato con aggregati provenienti dalla frantumazione delle traversine ferroviarie, cioè provenienti da un calcestruzzo originario ad elevata resistenza meccanica. Ciò che rendeva molto interessante quella ricerca era la possibilità di poter realizzare un calcestruzzo con prestazioni ripetibili e quindi affidabile.

Il problema principale in termini quantitativi risultava però quello di recuperare i rifiuti provenienti dalle demolizioni delle costruzioni.

Con l'attiva partecipazione, non priva di difficoltà, alla demolizione del complesso edilizio di Punta Perotti, avvenuta a Bari nel 2006, il problema viene finalmente affrontato in tutta la sua complessità.

Essere stati tra i pochi tecnici a livello nazionale ad essersi interessati di questo evento eccezionale ha rappresentato una irripetibile opportunità. L'obiettivo di confezionare calcestruzzi strutturali affidabili utilizzando gli aggregati provenienti dal trattamento dei prodotti di demolizione poteva essere raggiunto solo attraverso un insieme di indagini, distruttive e non distruttive, che consentissero di raggiungere un'accurata conoscenza dei materiali utilizzati per la costruzione del plesso ancor prima che avvenisse la demolizione.

Operando in questo modo è stato possibile conoscere le caratteristiche meccaniche e lo stato di degrado del calcestruzzo originario, esso risultava complessivamente di buona

qualità e quindi adeguato per essere riutilizzato, previo specifico trattamento, per confezionare nuovo calcestruzzo strutturale.

La campagna sperimentale sviluppata in questa tesi mostra che si possono ottenere calcestruzzi di buona resistenza meccanica anche con percentuali di aggregato di riciclo superiori a quelle definite dalle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni e questo grazie al processo di qualificazione dell'aggregato di riciclo e alla messa a punto di una differente metodologia di impasto.

Prima di trattare i temi della sperimentazione sono stati sviluppati alcuni capitoli introduttivi necessari a inquadrare a livello teorico e normativo il tema della produzione dei rifiuti da costruzione e demolizione e la possibilità di riciclo nel settore del calcestruzzo. È stato sviluppato inoltre un capitolo che raccoglie i risultati di alcune delle ricerche sviluppate a livello internazionale in questo settore.

Infine è stato dedicato un capitolo al problema delle vibrazioni nelle costruzioni indotte dal micro-sisma cagionato dalla demolizione con il sistema delle micro-cariche esplosive.

2. TRASFORMAZIONE DELLE MACERIE DA DEMOLIZIONE E COSTRUZIONE IN MATERIE PRIME SECONDE

2.1 IL RICICLAGGIO DEI RIFIUTI DELL'EDILIZIA

I rifiuti da demolizione e costruzione (cosiddetti rifiuti da C&D) provengono dall'attività edilizia, secondo quanto affermato all'art.184 del D.Lgs 152/06 (Norme in materia ambientale) essi fanno parte dei rifiuti speciali. I rifiuti da C&D sono per la maggior parte, costituiti da: calcestruzzo, laterizi, ceramiche, terre di scavo, ecc.; più in dettaglio nella figura 2.1 vengono riportati i possibili materiali.

I rifiuti da demolizione e costruzione posseggono, di per sé, grandi potenzialità di recupero e riutilizzo, spesso disperse poiché vengono smaltiti in discarica, se non addirittura abbandonati abusivamente con gravi conseguenze ambientali. In Italia l'impiego ad oggi è stato limitato, previo trattamento di trasformazione da rifiuti in materie prime seconde, ad interventi di riempimento sottoforma di materiale sciolto (figura 2.2). In altri Paesi europei il riutilizzo è più vasto e vantaggioso: vengono infatti impiegati per usi più nobili come il confezionamento di calcestruzzi, anche strutturali, di cui ci interesseremo in modo specifico in questa tesi.

Riutilizzabili come aggregati	Da eliminare o ridurre al minimo
Calcestruzzo (precompresso o normale)	Terra vegetale
Cemento e malte varie	Legname
Conglomerati e misti bituminosi	Carta, cellulosa e polistirolo
Mattoni, laterizi, tegole e blocchi	Metalli
Ceramica, piastrelle, rivestimenti	Plastica
Elementi litici	Gesso
	Materiali compositi
	Vernici
	Materiali per isolamento termico ed acustico
	Amianto (smaltimento selettivo preventivo)

Figura 2.1: Materiali presenti nei residui da costruzioni e demolizioni



Figura 2.2: Due esempi di impiego di rifiuti da C&D: per riempimento in sistemazioni esterne e in strutture in c.a.

In Germania il calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati viene da tempo utilizzato per strutture in elevazione, due esempi di particolare interesse sono rappresentati dalla nuova sede dell'associazione per l'ambiente di Osnabruck e da un progetto di Friedensreich Hundertwasser a Darmstadt chiamato "Waldspirale" (figura 2.2) dove sono stati utilizzati 12000 m³ di calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati.

2.1.1 Aspetti qualitativi e quantitativi

La composizione delle macerie è estremamente variabile: tecniche costruttive locali, attività economica e sviluppo tecnologico della zona, materie prime e materiali da costruzione localmente disponibili sono fattori che influenzano la composizione delle macerie.

La nuova stesura del CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti), tratta i rifiuti da C&D nel capitolo *17-Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione (compreso il terreno proveniente da siti contaminati)* che si sviluppa in otto classi:

17 01 Cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche;

17 02 Legno, vetro e plastica;

17 03 Miscele bituminose, catrame di carbone e prodotti contenente catrame;

17 04 Metalli (incluse le loro leghe);

17 05 Terra (compreso il terreno proveniente da siti contaminati), rocce e fanghi di dragaggio;

17 06 Materiali isolanti e materiali da costruzione contenenti amianto;

17 08 Materiali da costruzione a base di gesso;

17 09 Altri rifiuti dall'attività di costruzione e demolizione.

La classe **17 07**, prevista dalla precedente stesura del CER e comprendente i rifiuti misti di costruzione e demolizione, è stata eliminata e sostituita nella nuova stesura con la classe **17 09**.

Secondo quanto affermato nel 2003 dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (*European Environment Agency-EEA*) i rifiuti prodotti ogni anno dall'UE sono costituiti principalmente da cinque flussi: rifiuti produttivi, rifiuti di cava e di miniera, rifiuti da costruzione e demolizione, rifiuti solidi urbani e rifiuti agricoli-forestali. Tra questi i rifiuti solidi urbani, i rifiuti industriali e i rifiuti da costruzione e demolizione sono in progressivo aumento [1]. All'interno di una strategia generale di gestione e prevenzione dei rifiuti l'Unione Europea ha affrontato in modo specifico la questione dei rifiuti da C&D con una serie di provvedimenti rivolti a migliorarne la gestione e a incentivarne il riciclo e il riutilizzo nelle opere pubbliche come materie prime secondarie.

Già nel febbraio 1999 la Direzione Generale dell'Ambiente della Commissione Europea aveva sviluppato questi concetti nel rapporto realizzato da Symonds, in associazione con ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum, "*Construction and demolition waste management practises and their economic impacts*", (Norme di gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione e loro impatto economico) avente come obiettivo la definizione di un quadro dettagliato sulla produzione e gestione dei rifiuti da C&D nei paesi dell'Europa a Quindici. Il documento analizza in particolare quello che viene definito "*core*" *Constuction & Demolition Waste* ovvero un mix di materiali ottenuti dalla demolizione di un edificio o di una parte di un'infrastruttura e di quegli stessi materiali che rimangono al termine di una costruzione (in particolare vengono considerate le classi CER 17 01, 17 02, 17 04, 17 06, 17 07). Non vengono quindi presi in considerazione materiali stradali, prodotti di scavo ed elementi di connessione (materiali elettrici, idraulici, etc.). Secondo quanto affermato nel rapporto nell'UE-15 la produzione di rifiuti da C&D ammonta a 180 milioni di tonnellate, per un corrispettivo

di circa 480 kg pro capite all'anno (dati riferiti alla produzione del 1997). Di questi solo il 28% viene riciclato e reinserito nel processo produttivo, mentre il restante 72% viene smaltito in discarica o incenerito. Da notare che sono solo cinque paesi (Germania, Regno Unito, Francia, Italia e Spagna) a produrre circa l'80% dei rifiuti da C&D complessivi e che ci sono grandi disparità per quanto riguarda le percentuali di rifiuti da C&D riciclati: Olanda, Belgio e Danimarca già nel 1997 riciclavano più dell'80% dei rifiuti da C&D a differenza di paesi come Italia, Spagna, Portogallo, Grecia e Irlanda in cui la percentuale di rifiuti da C&D riciclati risulta inferiore al 10% [2]. Nella tabella di figura 2.3 sono riportati i dati sulla produzione di rifiuti da C&D nell'UE-15. Come emerge dalla tabella la gestione dei rifiuti da C&D in Europa non è omogenea e in molti Paesi, in particolare del Sud Europea, il deposito in discarica e l'incenerimento risultano essere i principali strumenti per lo smaltimento dei rifiuti da C&D.

PAESE MEMBRO	PRODUZIONE DI RIFIUTI DA C&D (in milioni di t)	% MATERIALE RICICLATO o RIUTILIZZATO	% MATERIALE SMALTITO IN DISCARICA
GERMANIA	59	17	83
REGNO UNITO	30	45	55
FRANCIA	24	15	85
ITALIA	20	9	91
SPAGNA	13	<5	>95
OLANDA	11	90	10
BELGIO	7	97	13
AUSTRIA	5	41	59
PORTOGALLO	3	<5	>95
DANIMARCA	3	81	19
GRECIA	2	<5	>95
SVEZIA	2	21	79
FINLANDIA	1	45	55
IRLANDA	1	<5	>95
LUSSEMBURGO	—	—	—
UE-15	180	28	72

Figura 2.3. Produzione di rifiuti da demolizione e costruzione nell'UE-15 [2]

(Fonte: Symonds, Commissione Europea-rapporto alla DGXI, Febbraio 1999)

Nel rapporto vengono inoltre evidenziate le misure che i Paesi Membri devono adottare per incoraggiare il riciclo e il riutilizzo dei rifiuti da C&D, come lo sviluppo di spazi di raccolta differenziata per le diverse frazioni dei rifiuti da C&D, l'adozione di misure fiscali che disincentivino lo smaltimento in discarica, la pianificazione della gestione dei rifiuti e l'adozione di norme, sia a livello nazionale che locale, rivolte ad un più corretto sistema di gestione dei rifiuti da C&D. L'obiettivo è dunque quello di sensibilizzare i Paesi Membri, orientandoli verso una comune strategia di pianificazione e gestione dei rifiuti da C&D, nel tentativo di ridurre il gap che separa Paesi quali Olanda, Belgio e Danimarca da Paesi come Italia, Spagna, Portogallo e Irlanda, più arretrati nei settori di riciclaggio e recupero dei rifiuti.

Dati più recenti riguardo all'ammontare dei rifiuti da C&D annualmente prodotti in Europa sono forniti nella Comunicazione della Commissione Europea n. 301 del 27 maggio 2003 nella quale si afferma che ogni anno nell'UE sono prodotti circa 1,3 miliardi di tonnellate di rifiuti di cui il 22% è costituito da rifiuti da costruzione e demolizione, per un totale di 286 milioni di tonnellate annue. Rispetto ai dati forniti nel rapporto del 1999 l'ammontare di rifiuti da C&D prodotti in Europa è aumentato di circa il 60%. Si deve però tenere in considerazione che la differente stima dei rifiuti da C&D può essere dovuta non solo ad un reale incremento del quantitativo dei rifiuti prodotti annualmente ma anche all'allargamento dell'Unione Europea a nuovi Paesi, che ovviamente contribuiscono alla produzione di rifiuti da C&D.

Un ulteriore dato viene fornito dal Rapporto Rifiuti 2006 redatto dall'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) secondo cui la produzione di rifiuti da C&D si attesta in Europa a circa 510 milioni di tonnellate pari a 1126 kg pro capite all'anno. In particolare per i Paesi dell'UE-15 il dato pro capite risulta essere più elevato e si attesta a circa 1320 kg pro capite all'anno, mentre per i Paesi di più recente ingresso nell'Unione Europea, ovvero Repubblica Ceca, Cipro, Estonia, Lettonia, Lituania, Malta, Polonia, Slovacchia, Slovenia, Ungheria, il dato risulta essere decisamente inferiore e pari a circa 135 kg pro capite all'anno. Ciò è dovuto non solo al diverso sviluppo del settore edilizio in questi Paesi rispetto a quelli dell'UE-15, ma anche ad una maggiore difficoltà di reperimento e monitoraggio dei dati relativi ai rifiuti da C&D [3]. La discrepanza dei dati forniti da APAT, definiti analizzando le

pubblicazioni Eurostat e i dati forniti nel portale internet dell'Unione Europea, con quelli forniti in precedenza, può essere dovuta ad un incremento dei rifiuti da C&D negli anni e ad una diversa definizione di rifiuto da C&D, più ampia rispetto a quella di "core" *Constuction & Demolition Waste*, che, come è stato precedentemente specificato, tiene conto solo di alcune classi del capitolo 17 del CER. La presenza di differenti fonti di informazione comporta una molteplicità di dati difficilmente confrontabili sia perché non riferiti allo stesso anno sia perché la definizione di rifiuto da C&D può non essere la stessa per tutte le stime. La definizione di un quadro di riferimento a livello comunitario risulta quindi complessa per le difficoltà di reperimento e di comparazione dei dati forniti dai diversi Paesi.

In Italia, gli ultimi dati ufficiali, riportati da APAT nel Rapporto Rifiuti 2006 e relativi alla produzione del 2004, stimano l'ammontare di rifiuti da costruzione e demolizione pari a 46,5 milioni di tonnellate.

A livello nazionale la produzione di rifiuti da C&D non risulta essere omogenea: più del 60% dei rifiuti da C&D viene prodotto al Nord, mentre il restante 40% è suddiviso quasi equamente tra il Centro e il Sud. Analizzando i dati relativi al triennio 2002-2004 non si riscontrano sostanziali variazioni del contributo percentuale fornito da ciascuna macroarea a conferma del fatto che la maggior produzione di rifiuti da C&D che caratterizza il Nord Italia è legato ad una maggiore attività del settore delle costruzioni [3].

2.1.2 Costi dell'aggregato riciclato e campi di impiego

Il costo dello smaltimento dei rifiuti, pur variando da zona a zona, dipende fortemente dalla distanza tra il cantiere di demolizione e l'impianto di stoccaggio ed è in continuo aumento, data la progressiva diminuzione del numero di discariche. Il riciclaggio del materiale demolito incontra, quindi, sia le esigenze degli operatori del settore, che vedono la possibilità di reinserire nel processo produttivo un rifiuto che comporta un costo di smaltimento, sia le esigenze delle Amministrazioni Pubbliche, alle quali si prospetta una possibilità di far fronte alle emergenze legate alla questione ambientale. D'altra parte, in numerose parti d'Europa si registra una disponibilità di inerti naturali

sempre più ridotta a fronte di una notevole richiesta, con un conseguente aumento del prezzo del calcestruzzo al metro cubo; tutto ciò potrebbe contribuire a rendere l'aggregato riciclato concorrenziale con l'aggregato naturale sotto il profilo economico.

Il riciclaggio di questa tipologia di rifiuti, previo idoneo trattamento in appositi impianti, può comportare indubbi vantaggi dal punto di vista ambientale e di salvaguardia del territorio:

- la creazione di un materiale sostitutivo delle materie prime naturali (ghiaia e sabbia), con prestazioni sostanzialmente equivalenti, sia nel settore dell'ingegneria non strutturale, sia nel settore dell'ingegneria strutturale;
- la riduzione dello sfruttamento di materie prime non rinnovabili con conseguente preservazione e ottimizzazione dello sfruttamento dei giacimenti, ovvero maggiore durata degli stessi;
- riduzione del numero di discariche presenti nel territorio;
- abbassamento dei costi di smaltimento che potrebbe stimolare la riduzione della pratica dell'abbandono abusivo.

Non è possibile individuare in maniera esatta la differenza di prezzo tra gli aggregati di riciclo e quelli naturali in quanto questa dipende essenzialmente dalla qualità degli aggregati naturali e dalla composizione degli aggregati riciclati.

Normalmente il prezzo degli aggregati di riciclo è circa la metà di quello degli aggregati naturali.

2.2 DEMOLIZIONE SELETTIVA

Durante la demolizione, generalmente, viene prodotto un flusso indifferenziato di macerie, costituito da frazioni eterogenee che rendono costose le eventuali operazioni di recupero e compromettono un eventuale impiego per confezionare calcestruzzi strutturali. In questa ottica, una separazione preliminare dei materiali può risultare conveniente. In vista di un riutilizzo dei rifiuti sarebbe quindi opportuno ricorrere a tecniche di "demolizione selettiva".

La demolizione selettiva è una pratica che mira a separare le diverse frazioni di materiali demoliti per sottoporli ad adeguati trattamenti che ne facilitino il re-impiego.

Infatti, tanto più omogeneo è il materiale ottenuto dalla demolizione, tanto più elevate sono le possibilità di recupero.

L'incompiuto complesso di Punta Perotti, privo di ogni finitura, ha rappresentato un caso di studio per il riuso del demolito che pare adatto (figura 2.4), previo trattamento, per il confezionamento di calcestruzzi strutturali. Il demolito, infatti, per lo stato di avanzamento lavori in cui si trovano le costruzioni, risulta privo di molte impurità (ceramica, vetro, ecc.) non separabili in fase di trattamento con gli attuali impianti di riciclaggio con tecnologia R.O.S.E..

L'Italia è in ritardo, rispetto ad altri Paesi europei, nell'applicazione della demolizione finalizzata al recupero del materiale; comunque, in questi ultimi anni si sono registrati progressi nell'incentivazione al recupero e al riutilizzo di materiali riciclati.

Questa tendenza è stata recentemente dimostrata da tutta una serie di iniziative e di provvedimenti in materia (si registrano una serie di accordi di programma a livello locale tra amministrazioni provinciali e produttori di riciclati) e dall'elaborazione, da parte della Commissione Edilizia dell'UNI, di una Guida alla demolizione selettiva.

La linea guida UNI fornisce indicazioni progettuali ed esecutive per dare una regolamentazione al processo di demolizione delle opere edilizie e di ingegneria civile e industriale con lo scopo sia di ridurre la produzione, sia di valorizzare i rifiuti da costruzione e demolizione. Nel diagramma a blocchi di figura 2.5 è schematizzato il sistema di gestione dei rifiuti da demolizione e costruzione.



Figura 2.4: Demolito di Punta Perotti

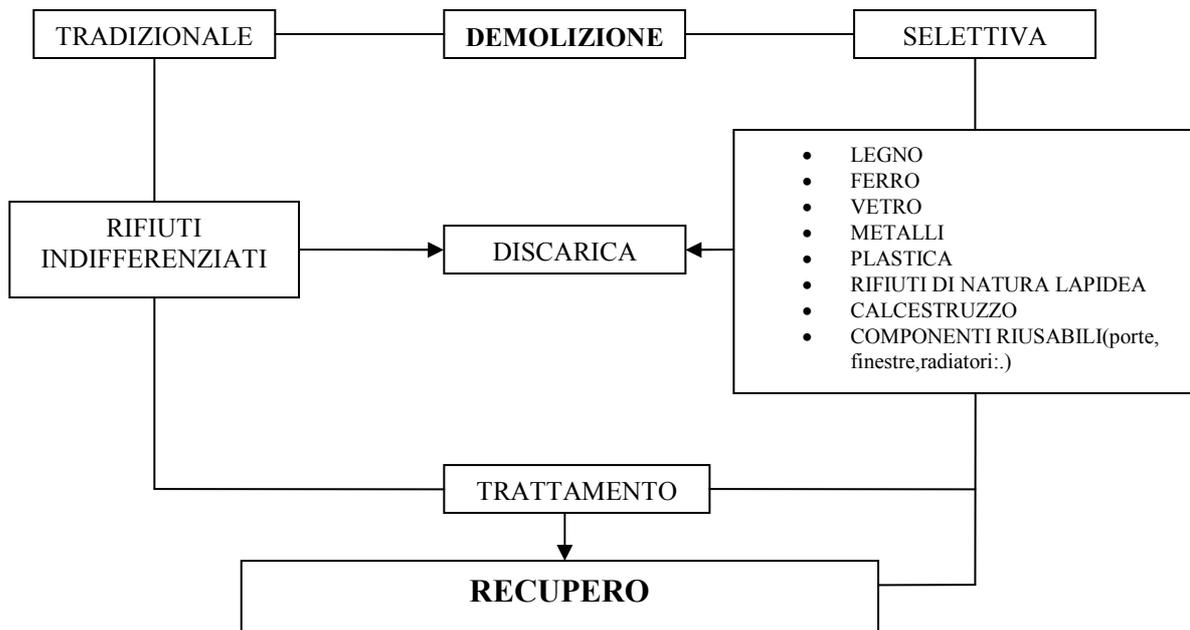


Figura 2.5: Schema di gestione dei rifiuti da demolizione

2.2.1 Impianti di produzione di aggregati riciclati

Il processo di produzione dell'aggregato riciclato a partire dai rifiuti da C&D non è molto diverso da quello con cui si ottengono gli inerti naturali di frantumazione dal trattamento di blocchi lapidei provenienti da attività estrattiva e non comporta sostanziali costi aggiuntivi.

Tale processo consiste in tre fasi, sulle quali si basano gli schemi di funzionamento degli impianti per il trattamento delle macerie:

- la selezione del materiale;
- la decontaminazione;
- la riduzione delle pezzature.

Tali impianti possono essere di tipo mobile (figura 2.6) oppure fissi. Le installazioni fisse potrebbero avere lo svantaggio di essere localizzate in una zona distante dal cantiere di demolizione, tuttavia l'onere legato al trasporto delle macerie viene compensato dalla maggiore produttività e dalla migliore qualità del prodotto.



Figura 2.6: Impianto mobile in funzione presso il cantiere di Punta Perotti

Una corretta dislocazione sul territorio degli impianti fissi sarebbe in tal senso auspicabile e permetterebbe di abbassare il costo dell'inerte di riciclo.

2.2.2 Visita ad alcuni impianti con tecnologia R.O.S.E.

Sono stati visitati due impianti fissi di produzione di aggregati di riciclo, che utilizzano la tecnologia R.O.S.E. (acronimo che sta per Recupero Omogeneizzato degli Scarti in Edilizia); si tratta di una tecnologia relativamente recente capace di garantire, a tutt'oggi, il migliore livello qualitativo dell'aggregato riciclato prodotto.

Gli impianti visitati sono rispettivamente l'impianto di Villa Musone (AN) e l'impianto di Vigonza (PD). Il materiale proveniente dall'impianto di riciclaggio di Villa Musone è stato utilizzato in una precedente sperimentazione [4].

Lo schema di funzionamento degli impianti visitati è sostanzialmente analogo, esso è costituito da una prima fase di controllo di qualità dei rifiuti in ingresso per verificarne l'ammissibilità all'impianto da un punto di vista sia normativo sia tecnico, il controllo consente attraverso un sistema di telecamere di verificare dall'alto il tipo di materiale presente sull'autocarro in arrivo e permette di poter risalire allo smaltitore in caso si verificano delle non conformità in merito alla natura del materiale conferito.

Lo scarico avviene in zona appositamente attrezzata (stoccaggio provvisorio), posta in prossimità dell'impianto, pertanto non viene consentita l'alimentazione diretta dagli autocarri in arrivo. L'area di stoccaggio è sufficientemente ampia da consentire la

possibilità di ripartizione del materiale in ingresso in cumuli di natura merceologica abbastanza omogenea.

Tale ripartizione consente la produzione di materiale riciclato caratterizzato da un diverso livello qualitativo a seconda della miscela di demolito introdotta in impianto.

Il materiale in ingresso subisce una prima selezione effettuata tramite vibrovaglio, che permette di evitare l'invio alla macinazione della frazione fine.

Dopo questa operazione il materiale viene convogliato nella camera di frantumazione. Il mulino, del tipo ad urto, consente oltre alla riduzione granulometrica dei rifiuti il distacco del ferro dall'impasto di calcestruzzo senza che in tale operazione possano verificarsi danni alla meccanica del mulino stesso.

La tecnologia applicata consente di realizzare il perfetto distacco del ferro dal calcestruzzo. Tale distacco risulta di particolare importanza in quanto, se avviene solo parzialmente, si vanifica tutta l'operazione in quanto i piccoli blocchetti di calcestruzzo tra loro collegati dal tondino dovrebbero essere smaltiti in discarica autorizzata con un doppio danno economico: il costo di conferimento ed il mancato guadagno dalla vendita del solo metallo.

Nell'impianto di Vigonza, a valle del mulino si trova un dispositivo per l'abbattimento delle polveri a getti di acqua nebulizzata che consente il recupero delle polveri stesse che, invece di disperdersi nell'ambiente, vanno ad incrementare la frazione fine del prodotto.

Per mezzo di un estrattore orizzontale, i materiali in uscita dal mulino vengono convogliati attraverso un nastro trasportatore sino al primo deferrizzatore elettromagnetico a nastro per la separazione dei metalli ferrosi presenti e il successivo stoccaggio in un apposito cassone metallico.

Dopo questa operazione, il materiale viene convogliato attraverso un nastro trasportatore ad un vibrovaglio per la separazione a secco delle frazioni leggere non idonee (carta, legno, plastica, ecc.); questi materiali vengono stoccati in apposito contenitore e successivamente eliminati mediante conferimento in discarica autorizzata.

A questo punto il materiale viene inviato ad un sistema di vagli per la separazione in frazioni granulometriche. Nel diagramma a blocchi di figura 2.7 è rappresentato lo schema di funzionamento degli impianti.

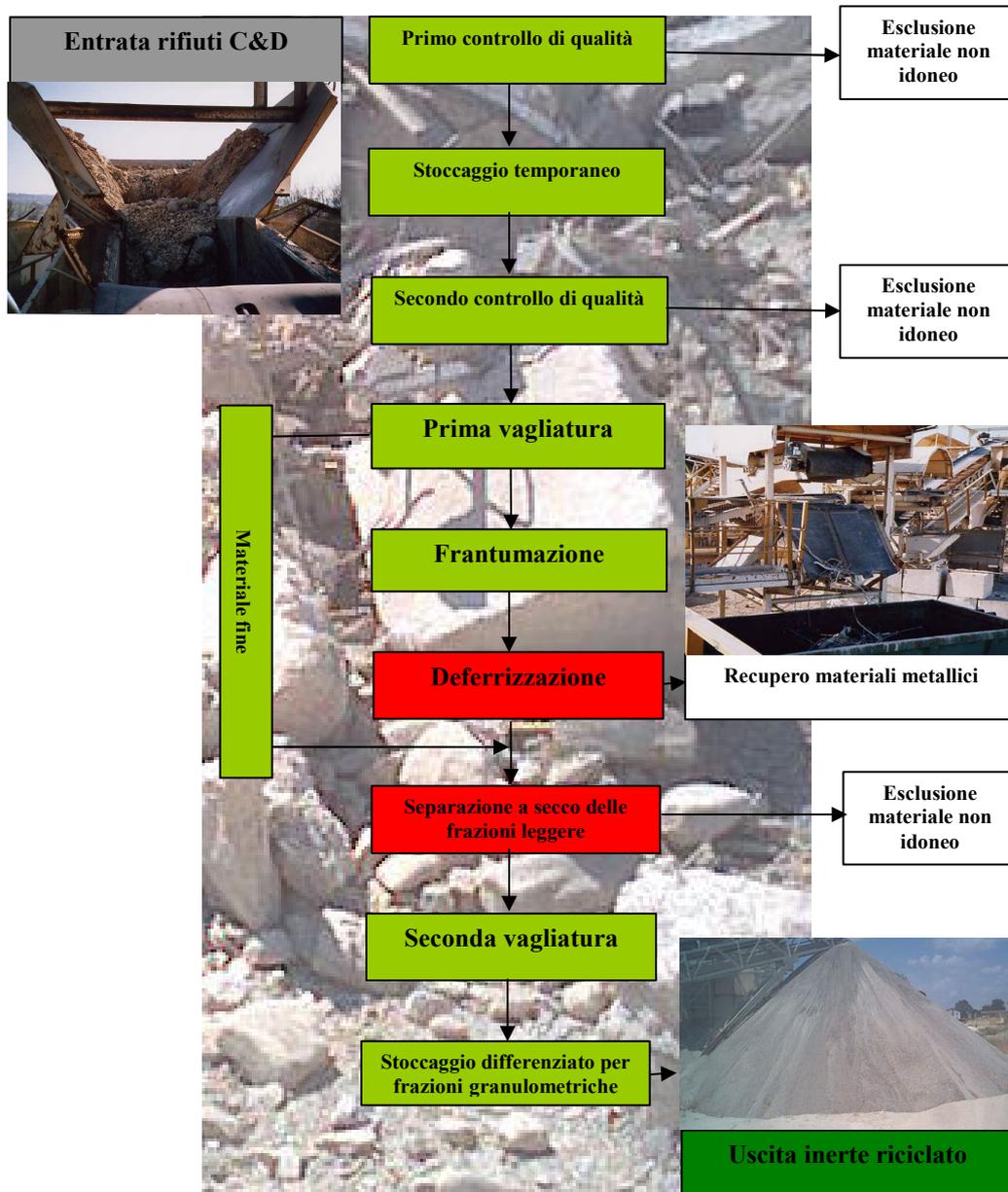


Figura 2.7: Schema di funzionamento

Le caratteristiche tecniche dell'impianto R.O.S.E. sono molto soddisfacenti: la rumorosità rimane nell'intervallo di 70÷94 dB(A); le vibrazioni sono confrontabili con quelle presenti nell'ambiente; la produzione di polveri è praticamente nulla e si limita a quella dovuta alla movimentazione del materiale prima e dopo il trattamento; la potenza richiesta dall'impianto è di soli 100 kW per una produzione oraria di 50÷60 m³; infine,

l'avanzata automazione richiede l'impiego di tre soli operatori (pesatura – controllo del materiale in ingresso ed uscita, controllo e gestione impianto, alimentazione impianto) [5].

2.2.3 Disomogeneità costituzionale e possibile incostanza nel tempo

In generale dal processo di produzione di aggregati riciclati attraverso la tecnologia R.O.S.E. a partire da macerie (“tout venant” o si solo calcestruzzo) si ottengono i seguenti tipi di grani (figura 2.8):

- granelli di calcestruzzo;
- granelli di laterizio;
- granelli di piastrelle,
- granelli naturali rigenerati;
- granelli naturali rigenerati avvolti da malta cementizia;
- granelli di vetro;
- granelli di bitume.

A differenza di altri materiali, quali ad esempio gli scarti industriali, che derivano normalmente da processi che non si modificano facilmente una volta impostati ed avviati, la generazione degli scarti dell'edilizia avviene in luoghi molto differenti tra loro e produce una notevolissima variabilità dei singoli conferimenti, può così accadere che il prodotto finale si presenti molto eterogeneo in termini prestazionali.



Figura 2.8: Aggregato “tout venat” sinistra – aggregato di solo calcestruzzo destra

Questo inconveniente viene superato se si procede ad un attento prelievo da cumuli differenziati per tipologia prevalente di materiali. Allo stato dell'arte, gli impianti, in particolare quelli fissi, sono in grado di realizzare una valida costanza di composizione del prodotto, anche perché adottano speciali procedure di estrazione dai cumuli di stoccaggio preventivo che permettono di ottenere una certa "miscelazione" degli apporti.

2.3 PRODUZIONE DI CALCESTRUZZO CON AGGREGATI RICICLATI: LA NORMA EN 12620

Nel mese di aprile 1998 il Comitato Europeo per la Normalizzazione (CEN) ha ricevuto dal Comitato Permanente per le Costruzioni, istituito dalla commissione della comunità Europea nell'ambito della direttiva CDP 89/106 CEE sui prodotti da costruzione, il Mandato M/125 per la stesura di una norma per la classificazione e determinazione delle caratteristiche prestazionali degli aggregati che devono essere oggetto di specifiche norme europee armonizzate, nonché l'indicazione del relativo livello di attestazione di conformità. Viene fatta distinzione tra gli aggregati per usi non critici, per i quali è previsto che il produttore rilasci una dichiarazione in cui attesti la conformità del prodotto alla norma (livello 4), e gli aggregati destinati a impieghi con elevati requisiti di sicurezza per i quali la dichiarazione di conformità del produttore dovrà essere accompagnata dal certificato rilasciato da un ente esterno dell'avvenuto controllo del processo produttivo (livello 2+).

Il livello dei requisiti di sicurezza delle opere dovranno essere definiti mediante leggi e regolamenti nazionali in base all'importanza delle opere.

Il Comitato tecnico 154 del CEN ha emesso nel settembre 2002 la norma "EN 12620 [6]: Aggregati per calcestruzzo" rispondente alla direttiva CDP 89/106 CEE sui prodotti da costruzione.

Nel diagramma a blocchi di figura 2.9 è rappresentata schematicamente la classificazione degli aggregati per calcestruzzo secondo la norma EN 12620.

La norma si applica per tutti gli aggregati normali, naturali, artificiali e riciclati, il cui uso è previsto per la realizzazione di calcestruzzi [7], secondo la norma infatti

l'aggregato è un "...materiale granulare utilizzato nelle costruzioni..." che "...può essere naturale, artificiale o riciclato...".

La norma EN 12620 è stata recepita in Italia nell'ottobre 2003 con la norma UNI EN 12620:2003 "Aggregati per calcestruzzo". Con il recepimento della EN 12620 anche in Italia il campo degli aggregati per calcestruzzo viene allargato agli aggregati di riciclo. Rispetto alla norma precedentemente in vigore, la UNI 8520, che si riferiva solamente agli inerti naturali, di origine alluvionale o ottenuti per frantumazione di materiale estratto da cava, si ha un importante cambiamento che porta, nel settembre 2005, all'emanazione di due norme complementari alla UNI EN 12620 necessarie alla sua applicazione: la UNI 8520-1 "Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione dei criteri di conformità" e la UNI 8520-2 "Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti".

La UNI 8520-1 definisce le caratteristiche che devono essere dichiarate e garantite dal produttore di aggregato indicando per ciascuna caratteristica il riferimento normativo e la frequenza minima di prova (punto 7). La norma specifica inoltre quali siano i due Sistemi di Attestazione di conformità (sistema 2+ e sistema 4) previsti per gli aggregati e quali indicazioni debbano fornire [9].

La UNI 8520-2 specifica le caratteristiche e i requisiti degli aggregati, definiti e classificati in conformità della UNI EN 12620, destinati al confezionamento di calcestruzzi di adeguata resistenza e durabilità in funzione della destinazione d'uso.

Al punto 4.2 della norma viene fatto esplicito riferimento agli aggregati di riciclo per i quali è consentito, in attesa di una regolamentazione europea:

- l'utilizzo totale o parziale di aggregato di riciclo proveniente da demolizione non selettiva (macerie *tout-venant*), cioè comprendente macerie di diversi materiali (calcestruzzo, laterizi, ceramiche, vetro, etc.) per il confezionamento di calcestruzzi non strutturali con classe di resistenza \leq C12/15;
- l'utilizzo totale o parziale di aggregato di riciclo proveniente da demolizione selettiva, cioè di solo calcestruzzo, per il confezionamento di calcestruzzi strutturali con classe di resistenza \leq C20/25.

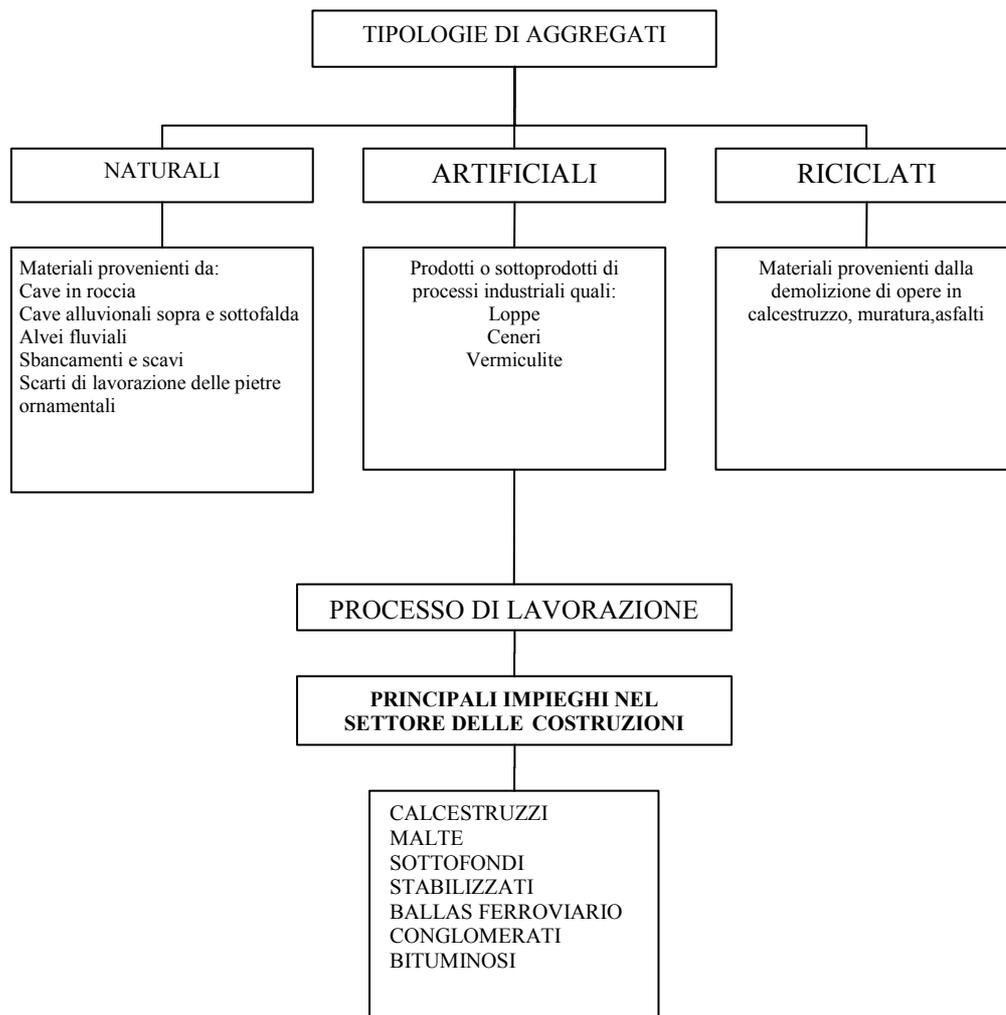


Figura 2.9: Classificazione degli aggregati secondo la Norma EN 12620 “Aggregati per calcestruzzo” [8]

La norma specifica inoltre che per confezionare calcestruzzi con classe di resistenza superiore alla classe C20/25 è necessario utilizzare aggregati di riciclo in percentuali massime del 5% nel caso di aggregato costituito da macerie e del 10% nel caso di aggregato costituito da solo calcestruzzo [10].

Le norme UNI 8520-1 e UNI 8520-2 forniscono indicazioni che specificano la UNI EN 12620 rendendola applicabile in Italia e consentono l’utilizzo di aggregato di riciclo per il confezionamento di calcestruzzo, anche strutturale, nel nostro paese.

In esse non sono specificati metodi di prova specifici per gli aggregati di riciclo, che quindi devono essere qualificati secondo gli stessi criteri che vengono presi in considerazione per gli aggregati naturali.

2.4 DECRETO MINISTERIALE 14.09.2005

Un ulteriore e importante passo avanti verso l'utilizzo di aggregato di riciclo in Italia è rappresentato dal Decreto Ministeriale del 14 settembre 2005 "Norme Tecniche per le Costruzioni", pubblicato nel Supplemento Ordinario n. 159 - G.U. n. 222 del 23/09/2005 [11]. I materiali e i prodotti per uso strutturale sono trattati nel capitolo 11, nel quale sono specificati i requisiti che devono essere garantiti dai materiali finiti e dai loro componenti.

Al paragrafo 11.1.9.2 "Aggregati" viene ribadito quanto affermato nella UNI EN 12620 e cioè che "sono idonei alla produzione di conglomerato cementizio gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali e artificiali, ovvero provenienti da processi di riciclo" purché siano conformi alla suddetta norma europea. Per quanto riguarda gli aggregati di riciclo è ammesso solo l'utilizzo di aggregati grossi in percentuali differenti a seconda dell'origine dell'aggregato di riciclo e della resistenza meccanica che si vuole ottenere (figura 2.10), a patto che le miscele confezionate vengano qualificate attraverso adeguate prove [11].

Origine del materiale di riciclo	R_{ck} del calcestruzzo (N/mm ²)	Percentuale di impiego
Demolizione di edifici (macerie)	< 15	fino al 100%
Demolizione di solo calcestruzzo e c.a.	≤ 35 ≤ 25	fino al 30% fino al 60%
Riutilizzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati	≤ 55	fino al 5%

Figura 2.10: D.M. 14.09.2005 tabella 11.1.III [11]

Caratteristiche tecniche	Metodo di prova
Descrizione petrografia semplificata	EN 932-3
Dimensione dell'aggregato (analisi granulometrica e contenuto dei fini)	EN 933-1
Indice di appiattimento	EN 933-3
Dimensione per il filler	EN 933-10
Forma dell'aggregato grosso (per aggregato proveniente da riciclo)	EN 933-4
Resistenza alla frammentazione/frantumazione (per calcestruzzo $R_{ck} \geq C50/60$)	EN 1097-2

Figura 2.11: Controlli di accettazione del Direttore dei Lavori (D.M. 14.09.2005, Tabella 11.1.IV [11])

Importante è il riferimento alle norme UNI 8520-1 e UNI 8520-2 per la definizione dei requisiti fisici e chimici, delle proprietà prestazionali che gli aggregati di riciclo devono rispettare e per la definizione delle quantità percentuali massime di impiego.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni riportano anche le caratteristiche tecniche che devono essere determinate in caso di eventuali controlli di accettazione dell'aggregato da parte del Direttore dei Lavori (figura 2.11).

2.5 DECRETO MINISTERIALE 14.01.2008

L'attuale Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni", pubblicato nel Supplemento Ordinario n. 30 - G.U. n. 29 del 04/02/2008, sostituisce il Decreto Ministeriale del 14 settembre 2005.

Per quanto riguarda l'uso di aggregati di riciclo non si riscontrano importanti elementi di novità, ad esclusione di una maggiore percentuale di impiego di aggregati di riciclo provenienti dal settore della prefabbricazione per il confezionamento di calcestruzzi di classe $\leq C45/55$ all'interno degli stessi stabilimenti di prefabbricazione, al paragrafo 11.2.9.2 "Aggregati" viene rivista la tabella 11.1.III del vecchio decreto con la nuova tabella 11.2.III (figura 2.12).

Origine del materiale di riciclo	Classe del calcestruzzo (N/mm ²)	Percentuale di impiego
Demolizione di edifici (macerie)	= C8/10	fino al 100%
Demolizione di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C30/37 ≤ C20/25	≤ 30% fino al 60%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati		
Da qualsiasi classe	≤ C45/55	fino al 15%
Da calcestruzzi > C45/55	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%

Figura 2.12: D.M. 14.01.2008, tabella 11.2.III

3. DEMOLIZIONE DI UN EDIFICIO A TORRE CON IL SISTEMA DELLE MICRO-CARICHE ESPLOSIVE: CONTROLLO DEL MICRO-SISMA ED EFFETTI SULLE COSTRUZIONI VICINE

La demolizione del complesso edilizio di Punta Perotti (2006) ha rappresentato una importante esperienza di demolizione controllata con esplosivo in Italia, quando questi interventi interessano opere non isolate, gli effetti della demolizione (micro – sisma causato dall'esplosione e dall'impatto al suolo della struttura) riguardano anche le vibrazioni indotte sulle costruzioni vicine. Nel campo delle demolizioni con esplosivo per controllato si deve intendere la possibilità di orientare la caduta della struttura nella direzione voluta tramite opportuna disposizione delle cariche e dei tempi di innesco e non anche la scelta del tipo di abbattimento; non sarà mai possibile infatti far implodere una struttura priva di elementi portanti interni (ciminiere, torri, serbatoi ecc.) come d'altro canto non è possibile rovesciare, ma al massimo traslare di qualche metro verso il lato più libero attraverso un semi ribaltamento, un fabbricato a telaio multipiano avente sezione trasversale con tre o più piedritti [12].

Ciò che è invece possibile controllare, oltre all'orientamento, sono gli effetti causati dalla demolizione. L'opportunità di accesso al cantiere di Punta Perotti nei giorni precedenti alle esplosioni, per la quale si ringrazia il Comune di Bari e la General Smontaggi (ditta esecutrice dei lavori), non solo ha consentito di qualificare i materiali costituenti la struttura in cemento armato e di valutarne lo stato di degrado al fine di poter correttamente utilizzare i prodotti della demolizione per confezionare calcestruzzo con aggregati di riciclo, ma ha posto un ulteriore obiettivo: la valutazione sulle adiacenti costruzioni dell'effetto dinamico procurato dall'esplosione e dal crollo dell'edificio di Punta Perotti.

In particolare, con riferimento a questo ultimo tema, sono state eseguite su un edificio a torre con struttura a telaio in conglomerato cementizio armato, che spiccava dal piano di fondazione per un'altezza di circa 45 m, misure delle accelerazioni indotte dallo

scuotimento del terreno per l'esplosione e il crollo della porzione dell'edificio denominato "A" di Punta Perotti demolito il 02-04-2006.

La valutazione dell'effetto dinamico è stata effettuata attraverso l'analisi dei segnali acquisiti nel dominio fisico del tempo e proiettati nel dominio della frequenza attraverso analisi spettrale di Fourier.

La durata delle rilevazioni per un lungo intervallo temporale ha consentito di individuare alcune caratteristiche dinamiche dell'edificio strumentato, eccitato anche dalle forzanti ambientali, prima e dopo l'evento.

I primi risultati del presente lavoro indicano un comportamento lineare della struttura a fronte di importanti accelerazioni di ingresso in fondazione (1.3g) dal carattere impulsivo. Durante l'evento le accelerazioni in ingresso registrate nell'intervallo temporale corrispondente all'esplosione e crollo dei piani bassi vengono amplificate dalla costruzione, si segnala invece, uno smorzamento delle accelerazioni alla base nel successivo intervallo temporale corrispondente al crollo dei piani alti.

3.1 LE DEMOLIZIONI CON ESPLOSIVO IN ITALIA

L'anzianità del patrimonio edilizio italiano, i piani urbanistici di riqualificazione urbana ed una nuova sensibilità contro gli abusi edilizi finalizzata al ripristino del territorio hanno determinato negli ultimi anni una notevole accelerazione del fronte delle demolizioni, sempre più effettuate attraverso la tecnica delle microcariche in sostituzione delle più tradizionali demolizioni con mezzi meccanici.

In questi ultimi anni urbanisti e associazioni legate al mondo delle costruzioni hanno creduto fortemente nella necessità di risanare le aree più deteriorate delle città attraverso imponenti progetti di rinnovo urbano con operazioni ad ampio raggio che superano i pochi casi isolati di abbattimento registrati fino a pochi anni fa. Tra gli altri Finco (Federazione Industrie Prodotti Impianti e Servizi per le Costruzioni) da tempo stimola il dibattito sulla demolizione di costruzioni obsolete, insicure ed inadeguate sotto il profilo tecnico ed ambientale (oltre 3 milioni, il 12 per cento del totale su tutto il territorio) per sostituirli con edifici più moderni e funzionali.



Figura 3.1: Centrale Enel nel porto di Palermo (1987) sinistra - Ex caserma dei vigili del Fuoco Genova (1992) destra

La demolizione della vecchia centrale Enel (ceduta dall'Enel all'Ente Porto) ubicata nel porto di Palermo ed avvenuta nel 1987 rappresenta la prima demolizione con esplosivo di grande importanza in Italia (figura n. 3.1), la demolizione fu decisa affinché l'ex centrale, da tempo non più in funzione in quanto ubicata in piena città e perciò estremamente inquinante, lasciasse posto ad un parco container.

I lavori sono consistiti principalmente nella demolizione dei basamenti in cemento armato delle turbine, nella demolizione del fabbricato costituente l'ex centrale termoelettrica, la cui cubatura ammontava a circa 150.000 m³ vuoto per pieno, con strutture portanti costituite da travi e pilastri in c.a. e tamponatura in muratura di conci di tufo e mattoni pieni, nella demolizione di n. 3 ciminiere in struttura mista di mattoni refrattari e c.a.

Risale al 1992 la demolizione dell'ex Caserma dei Vigili del Fuoco di Genova (figura 3.1), già ex Albergo Popolare, quasi centomila metri cubi di volume per un edificio in cemento armato e muratura, distante un metro dalla sopraelevata e dieci metri da un condominio in muratura. Con 840 microcariche di esplosivo gelatinato, 550 detonatori microritardati, 1000 metri di miccia alla pentrite e 3000 metri di connessioni elettriche, l'edificio si è adagiato su se stesso senza danni alle strutture adiacenti.

Nel 1996 si registra la demolizione in ambito urbano dell'ex mulino Assisi, un fabbricato industriale di Civitavecchia (figura 3.2) alto 27, largo 11.5 e lungo 77 metri. Particolare attenzione fu posta in quella occasione al controllo della demolizione con valutazione preliminare e successiva del micro-sisma causato dall'impatto al suolo della struttura [12].



Figura 3.2: Edificio industriale a Civitavecchia (1996) sinistra - Torre Hammon di Bolzaneto (1996) destra

Nel settembre del 1996 viene demolita la torre di Hammon di Bolzaneto alta 65 metri con un diametro di base di 35 metri (figura 3.2).

Particolarmente interessante per l'ubicazione è la demolizione della torre dell'AEM di Torino (agosto 1998). Il corridoio di caduta per la torre alta 25 metri tollerava errori di 40 centimetri in larghezza e di 2 metri in lunghezza (figura 3.3).

I lavori di demolizione dei Silos Granari di Ponte Parodi a Genova iniziarono a gennaio del 2002. Una operazione monumentale che ha richiesto 10 fasi distinte di brillamenti. Le condizioni geomeccaniche del molo su cui il manufatto insisteva, l'altezza delle strutture, la vicinanza di manufatti da salvaguardare e l'ambiente logisticamente complesso hanno reso quel lavoro una pietra miliare delle demolizioni (figura 3.3).

Con le torri 1, 2 e 3 abbattute in contemporanea al Villaggio Coppola (febbraio 2003) inizia la stagione degli abbattimenti italiani contro gli "ecomostri" (figura 3.4). Nell'aprile dello stesso anno viene abbattuto un altro ecomostro, si trattava del complesso delle Vele di Scampia (composto complessivamente da sette costruzioni), periferia di Napoli (figura 3.4), emblema del fallimento delle utopie urbanistiche basate sui quartieri – città.

Avvicinandoci ai nostri anni, il 28 dicembre 2003 a Torino nel quartiere di via Artom, area residenziale operaia ai margini della città cresciuta negli anni sessanta, è stata fatta implodere una torre di 10 piani, con quattro scale e 80 alloggi.

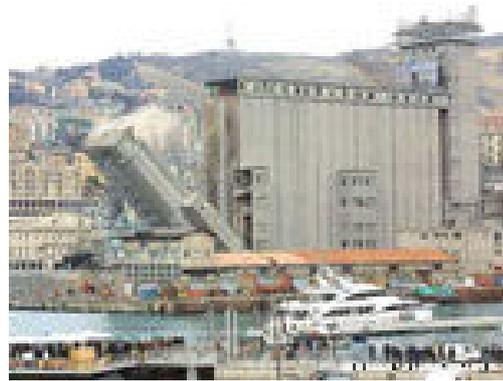


Figura 3.3: Ciminiera dell'AEM di Torino (1998) sinistra - Silos Granari di Ponte Parodi a Genova (2002) destra



Figura 3.4: Villaggio Coppola (2003) sinistra - Vele di Secondigliano Na (2003) destra

La demolizione dell'edificio, inserito in un complesso che comprende altri otto casermoni, rientrava in un programma di recupero urbano che comprendeva una serie di interventi, primo fra tutti l'abbattimento di una seconda torre in via Garrone, alta 36 metri (gemella della prima). L'operazione ha avuto una durata di circa quattro mesi ed è stata completata con il livellamento dell'area esterna.

Nel maggio del 2004, si registra la prima demolizione in ambito urbano di questo tipo a Roma, in particolare viene demolito il vecchio edificio denominato "mensa A.V.V.A" (i militari di leva) presso la gloriosa scuola dei Vigili del Fuoco di Capannelle, cinquanta anni dopo la sua costruzione. La costruzione, a un piano seminterrato e tre fuori terra, era costituita da più corpi di fabbrica separati da giunti di dilatazione per una superficie coperta complessiva di 2800 m².

Molte ancora sono state le demolizioni che si sono succedute negli ultimi anni, ma la demolizione del complesso edilizio di Punta Perotti (Ba), avvenuta nel 2006, rappresenta la più spettacolare demolizione mai effettuata in Italia (figura 3.5): un

evento mediatico trasmesso in diretta TV e seguito da oltre 240 giornalisti di tutto il mondo. La fondamentale importanza di tale demolizione riguarda non solo il raggiungimento degli obiettivi di ripristino del territorio e di legalità ma viene attestata dal notevole interesse scientifico nazionale suscitato.

Molto attiva è stata la partecipazione della Facoltà di Ingegneria della Università di Bologna (figura 3.5), in particolare i dipartimenti del DICASM e del DISTART hanno svolto interessanti ricerche relative alla possibilità di riutilizzo delle macerie, trattate preliminarmente, nel calcestruzzo, sulla durabilità del calcestruzzo esposto in ambiente severo per un lungo periodo e sull'effetto dinamico procurato dall'esplosione e dal crollo del fabbricato di Punta Perotti sulle adiacenti costruzioni.

Questa breve rassegna storica delle demolizioni con esplosivo avvenute in Italia a partire dalla fine degli anni ottanta del secolo scorso, mette in evidenza tra l'altro come la composizione delle macerie, che rappresentano il prodotto delle demolizioni, può essere estremamente variabile: tecniche costruttive locali, attività economica e sviluppo tecnologico della zona, materie prime e materiali da costruzione locali sono fattori che influenzano inevitabilmente la composizione delle macerie. Tuttavia con adeguati pretrattamenti le parti provenienti da materiali diversi dal calcestruzzo possono essere ridotte consentendo così di poter essere convenientemente utilizzate come materie prime secondarie. Se poi si aggiunge l'abbondanza di macerie da strutture in calcestruzzo rinforzato e precompresso o provenienti in generale dalla prefabbricazione, si capisce come si possa trovare nel campo del riciclaggio una risorsa per aggregati con caratteristiche notevoli.

Così come avviene per le nuove costruzioni per la cui realizzazione è necessario un progetto anche per la demolizione di costruzioni esistenti è necessario un progetto, che deve curare aspetti diversi ma non di minore difficoltà, (demolizioni controllate) questo oltre a garantire la corretta esecuzione dei lavori al fine di salvaguardare la sicurezza delle persone ed eventuali danni alle costruzioni adiacenti, si ritiene debba prevedere lo smaltimento delle macerie e possibilmente tutte quelle operazioni preliminari attraverso le quali è possibile ridurre l'inquinamento delle macerie stesse, in altre parole la progettazione di un intervento di demolizione deve prevedere anche lo studio delle macerie e il loro recupero.



Figura 3.5: Complesso edilizio di Punta Perotti (2006) destra - Ing. A.B. Costantino; Prof. Ing. P.P. Diotallevi; Prof. Ing. F. Sandrolini; Prof. Ing. C. Mazzotti; sig. Bianchi sinistra

3.2 IL CANTIERE DI PUNTA PEROTTI

Il cantiere di Punta Perotti è situato a sud della città di Bari, ed è delimitato a nord-est da corso Trieste (proseguimento del lungomare Nazario Sauro e del lungomare Armando Perotti), a sud da viale Imperatore Traiano (tangente alla ferrovia) e ad ovest da viale dei Caduti del 28 Luglio (figura 3.6).

Il lotto ha una forma allungata (circa 800 m per 120 m), disposta parallelamente alla costa, da nord-ovest a sud-est per una superficie complessiva di circa 99500 m².

Esso ospitava il complesso di edifici incompiuti, costituito da tre stabili denominati A, B e N (figura 3.6) il cui volume è stato stimato in 218000 m³ vuoto per pieno: i primi due erano stati progettati a scopo residenziale mentre il terzo a scopo terziario. Gli edifici A e B, di forma rettangolare e paralleli tra loro, erano disposti con il fronte ortogonalmente al mare (su idea di Renzo Piano), l'edificio N (più a nord), era invece disposto con la facciata parallelamente alla costa.

Erano ancora evidenti le fondazioni di un quarto edificio mai realizzato, che sarebbe dovuto sorgere tra l'edificio A e l'edificio N.

L'abbattimento degli edifici A e B è avvenuto in tre date, il 2, il 23 e il 24 aprile (figura 3.7); il primo edificio, fatto esplodere parzialmente con l'esplosione del 2 aprile, è stato l'edificio A, la prima «saracinesca» che si incontrava uscendo da Bari in direzione sud. Il vano scala non interessato da questa prima esplosione, quello più vicino al mare, è stato fatto brillare successivamente con l'esplosione del 23 aprile insieme a due blocchi dell'edificio B.

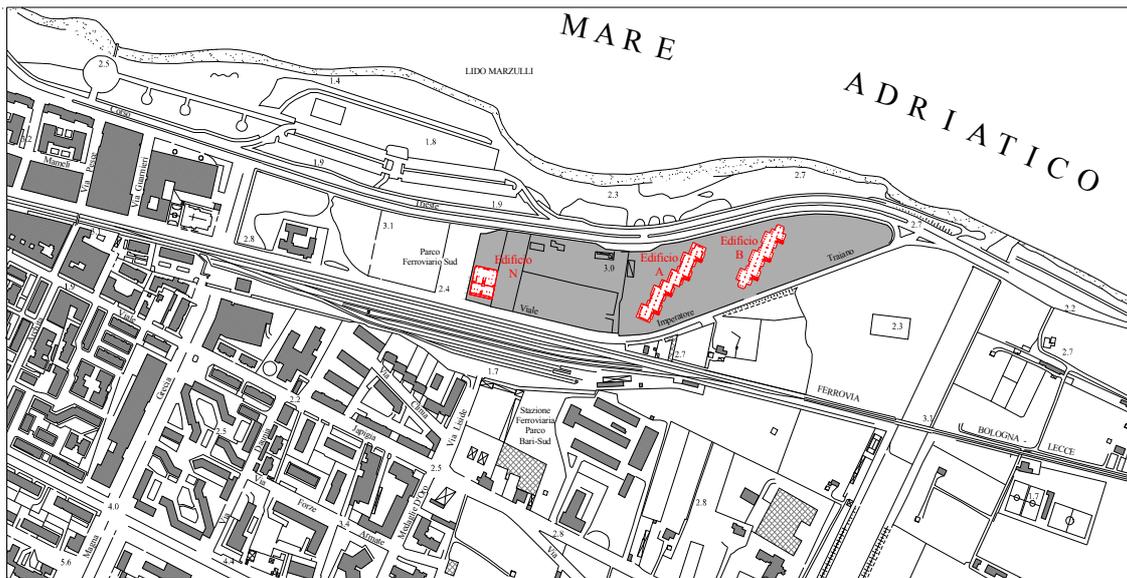


Figura 3.6: Ubicazione e planimetria del lotto

Il 24 aprile è stata completata la fase di demolizione con esplosivo dell'ultimo blocco dell'edificio B, quello più vicino al mare, mentre il terzo palazzo, l'edificio N, è stato demolito meccanicamente. L'abbattimento è avvenuto in tre fasi per ottemperare alla nuova legge sul terrorismo - in vigore da agosto 2006 - che consente l'attivazione contemporanea di non più di 150 detonatori.

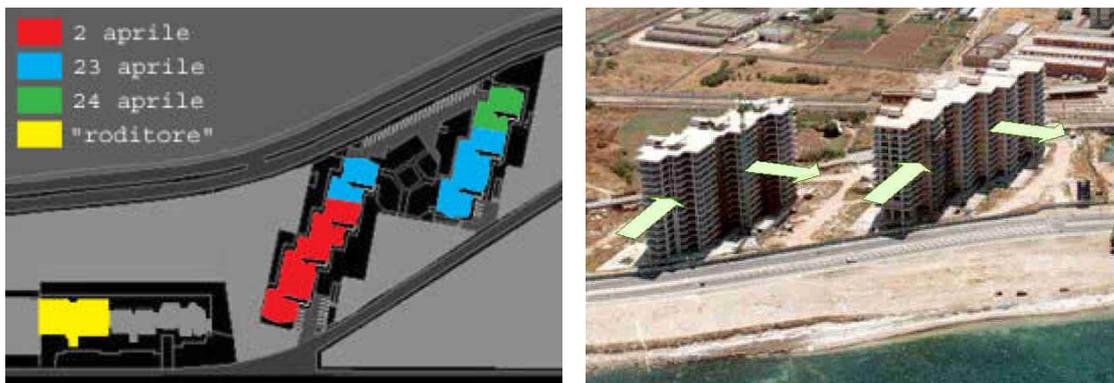


Figura 3.7: Date e dinamica delle demolizioni avvenute con esplosivo

3.3 EFFETTI DELLA DEMOLIZIONE

È stato studiato l'effetto del micro-sisma, cagionato dall'esplosione e dal crollo dell'edificio A (sorgente), abbattuto parzialmente il 02.04.2006, su un edificio a torre

identificato da porzione dell'edificio B, corrispondente al primo vano scala, e distante da questo, nel punto più vicino, circa 55 – 60 m (figura 3.8).

L'edificio B, con pianta modulare "a gradoni", si articola in tre vani scala resi indipendenti strutturalmente per mezzo di giunti di dilatazione termica in altrettanti moduli, ciascuno con configurazione in pianta compatta di larghezza massima 26 m per una lunghezza di 30 m circa. L'edificio A, con configurazione in pianta simile all'edificio B, si differenzia da questo per la presenza di un ulteriore vano scala.

L'edificio strumentato, della tipologia edilizia a torre e struttura a telaio in c.a., è costituito da 14 piani fuori terra e un ulteriore piano interrato che si allarga oltre il sedime del fabbricato (con parete di contenimento di spessore pari a 25 cm). L'altezza estradosso - intradosso solaio era di 2,90 m con spessore del solaio pari a 30 cm; l'altezza totale della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione è di 48.10 m, escludendo le torri del vano scala, che svettano di un ulteriore piano.



Figura 3.8: Planimetria di Punta Perotti ed immagine dell'edificio a torre strumentato

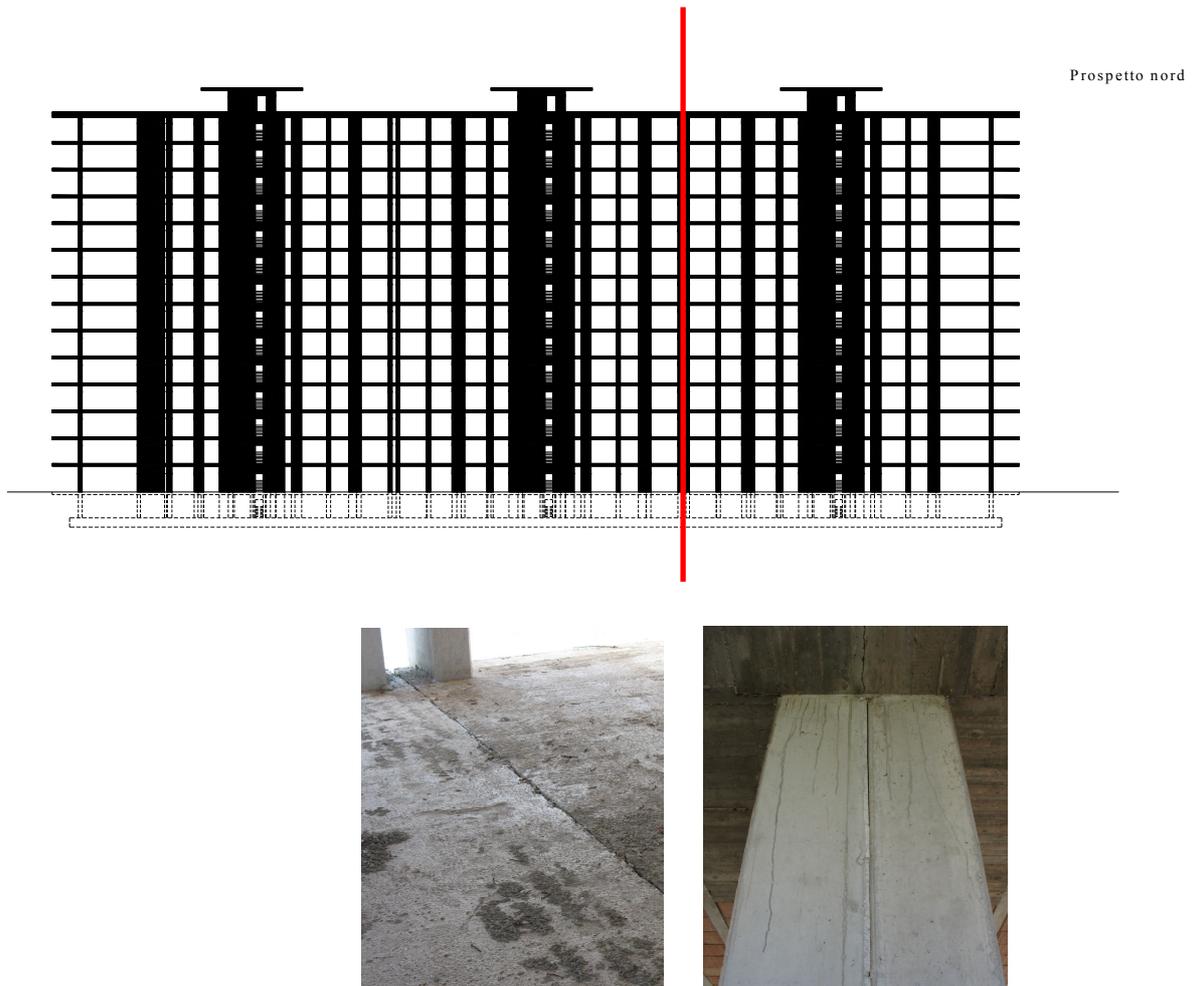


Figura 3.9: Giunto strutturale tra il primo e il secondo vano scala dell'edificio B

L'edificio si presenta al rustico, quindi privo di elementi strutturali "secondari" (tamponatura esterna e d interna), rendendolo così particolarmente affine con l'ipotesi di calcolo che prevede di ignorare la rigidezza e la resistenza di tali elementi nell'analisi della risposta delle costruzioni alle azioni dinamiche. La struttura a telaio in conglomerato cementizio armato gettato in opera, al momento della demolizione aveva una vita di esercizio di 11 anni, i solai di piano, del tipo laterocementizi, possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali.

Il vano scala, a struttura scatolare in calcestruzzo armato con spessore 25 cm ed esterno al corpo di fabbrica, definisce una configurazione in pianta della costruzione non simmetrica in relazione alla distribuzione delle rigidezze.

Lungo il perimetro esterno sono numerosi i solai a sbalzo in lastre di calcestruzzo con interposto strato di polistirolo.

3.4 TECNICA DI DEMOLIZIONE

La tecnica di demolizione, all'avanguardia in Italia, consiste nel disarticolare opportunamente la struttura attraverso l'indebolimento di un adeguato numero di colonne utilizzando delle microcariche alloggiare all'interno degli elementi strutturali e fatte esplodere in sequenza (diversi tempi di innesco) nonché direzionando la caduta favorendo la formazione di "cerniere plastiche" in determinati pilastri non interessati dalle cariche.

Preliminarmente nell'edificio A, demolito in 02-04-2006, è stato effettuato il taglio, in corrispondenza del giunto, tra la porzione di edificio (primi tre vani scala verso ovest) che sarebbe dovuta crollare in un primo tempo e la parte che in quella occasione sarebbe rimasta in piedi per essere abbattuta successivamente.

Nel caso in esame la costruzione in parte è crollata verso l'interno (implosione) e in parte in avanti in direzione nord, con una proiezione di circa 25÷30 m (per un'altezza degli immobili di 45 m fuori terra).

Per poter pilotare la caduta verso un versante prestabilito (nord) sono stati effettuati dei lavori di preparazione e predisposizione al crollo adottando i seguenti accorgimenti:

- **indebolimento, nella direzione di crollo, delle pareti rigide del vano scala:** la struttura scatolare dei vani scala è stata indebolita attraverso l'asportazione di conci nelle pareti in conglomerato cementizio armato parallele alla direzione di crollo per i primi sei piani (figura 3.10);
- **indebolimento dei pilastri,** ottenuto asportando cunei di calcestruzzo in prossimità della base con conseguente riduzione della sezione trasversale (figura 3.11);
- **esplosione in sequenza** delle mine, sia rispetto alla direzione ortogonale al lato del crollo (prima è esplosa la parte centrale dell'edificio poi i blocchi laterali), che rispetto alla direzione parallela al versante di caduta (i primi a crollare sono i pilastri sul versante prestabilito al ribaltamento, mentre nella stilata sul lato opposto, non tutti interessati dalle mine, si attiva la plasticizzazione che innesca il ribaltamento).

Tutte queste operazioni di indebolimento strutturale possono essere eseguite solo a seguito di un accurato progetto finalizzato a garantire la stabilità dell'opera nella nuova situazione caratterizzata da una redistribuzione degli sforzi.

Nei fabbricati sono stati minati il piano terra, il primo, il terzo e il sesto, nei vani scala il piano terra, il primo, il secondo, il terzo e il sesto. Pertanto il piano sesto infatti risultava il più debole della struttura (tanto è vero che dal sesto all'ultimo piano i vani scala sono rimasti integri, nonostante l'altezza di caduta, e sono stati demoliti solo successivamente meccanicamente con escavatore meccanico).

Per garantire il ribaltamento della porzione di vano scala non indebolita (dal settimo piano in su) questo è stato reso solidale al resto della struttura attraverso dei cavi in acciaio posti in sommità ed ancorati ai pilastri, assicurando così che il vano scala venisse trascinato dal resto della struttura nella caduta (figura 3.11).

Le microcariche (candelotti di Goma 2, l'ecogelatina di dinamite) sono state alloggiare in appositi fori disposti in maniera asimmetrica e protette con tavolame (figura 3.12). I fori sono stati caricati e collegati da un'unica miccia detonante (figura 3.12), protetta anch'essa per evitare che i frammenti di altre parti strutturali rovinassero il circuito.

A terra, ai piedi dei pilastri, sono stati depositi i detonatori, strumenti che danno sia l'innesco che il tempo di esplosione (20 microritardi, ciascuno di 25 millesimi di secondo, per uno sparo della durata totale di 0,5 secondi).

Per rallentare la proiezione dei detriti durante lo sparo e garantire la sicurezza è stata posizionata una rete molto sottile al piano terra, mentre un secondo sistema di reti paramassi è stata posta vicino alla ferrovia; le macerie si sono accumulate per un'altezza di sette metri circa a partire dalla quota del solaio del piano interrato.



Figura 3.10: Indebolimento delle pareti in c.a. del vano scala



Figura 3.11: Asportazione di un cuneo di calcestruzzo e cavi di solidarizzazione vano scala - struttura

L'energia potenziale, relativa a ciascun modulo, considerando l'ipotesi di massa concentrata a livello di piano e riferita alla quota + 3,10 m dal piano di fondazione, è stata stimata in 1,2 GJ.

Pertanto l'energia potenziale complessiva relativa agli edifici fatti brillare con l'esplosione del 2 aprile è sostanzialmente di 3,6 GJ.



Figura 3.12: stesura dei cavi di detonazione

3.5 CONOSCENZA ACCURATA DELL'EDIFICIO STRUMENTATO

Le fonti considerate per l'acquisizione dei dati necessari sono state il rilievo strutturale geometrico accompagnato da prove in sito e in laboratorio per la qualificazione dei materiali. Non è stato possibile consultare documenti di progetto (relazioni geologiche, geotecniche e strutturali ed elaborati grafici strutturali).

L'identificazione dell'organismo strutturale è stato ottenuto sulla base di una pianta architettonica opportunamente verificata in sito con un rilievo ex-novo degli elementi strutturali (figura 3.15). Le strutture di fondazione sono del tipo trave su suolo elastico.

Un accurata analisi visiva ha scongiurato la presenza di danni subiti dalla struttura in precedenza.

Il fabbricato si articola strutturalmente in tre porzioni corrispondenti a ciascun vano scala, la presenza di giunti garantiscono il comportamento indipendente di ciascuna porzione (figura 3.9).

La misura delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo è stata ottenuta mediante estrazione di carote ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura (vedi capitolo 5).

Ad integrazione dei risultati ottenuti sono state effettuate prove non distruttive (prova sclerometrica) in accordo alla norma UNI EN 12504-2.

Le prove sono state svolte su 3 livelli: piano -1 (interrato), piano 4 e piano 9.

In particolare, per ogni piano, sono stati testati (figura 3.13):

- quattro pilastri: il numero 10 e il numero 4 sul lato ovest mentre il numero 11 e il numero 24 sul lato est (mare),
- due setti del vano scala: setto A sul lato ovest e setto B su quello est.

Ogni prova consiste in nove risultati (tranne per il setto B al piano -1, per cui la prova è doppia).

In figura 3.14 sono stati riportati i risultati ottenuti.

Interpretando i risultati in base ai parametri dello sclerometro, emerge che la resistenza meccanica del calcestruzzo che costituiva l'edificio B risulta:

- 40 MPa per i pilastri,
- 35 MPa per i vani scala.

Non è stata riscontrata molta differenza tra i risultati delle prove effettuate sul calcestruzzo esposto direttamente verso il mare (lato est) e quelle effettuate sul lato rivolto a ponente: l'azione corrosiva dell'aerosol marino non ha avuto praticamente effetto ai fini deperimento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

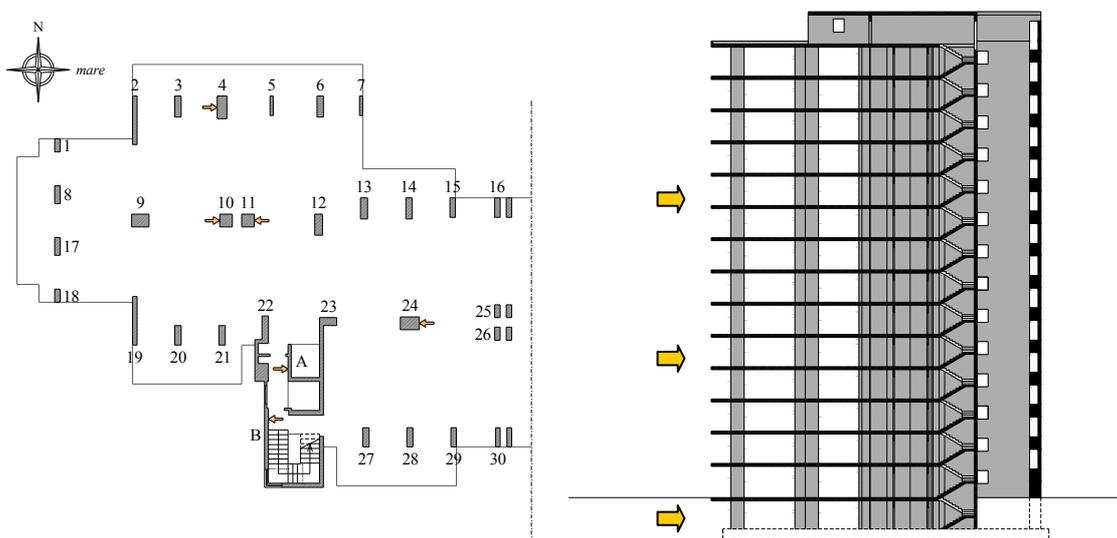


Figura 3.13: Posizione in pianta ed in altezza delle prove sclerometriche

	PIL 10 (W)	PIL 11 (E)	PIL 4 (W)	PIL 24 (W)	SETTO A (W)	SETTO B (E)
PIANO -1	40, 40, 42,	36, 36, 34,	34, 34, 36,	41, 36, 40,	40, 42, 40,	33, 33, 34, 34, 33, 35, 34, 35, 33
	36, 42, 40,	35, 35, 36,	36, 36, 34,	40, 36, 41,	40, 38, 40,	34*
	40, 42, 40	34, 38, 36	35, 33, 33	36, 42, 42	40, 38, 39	35, 38, 35,
	41*	35*	35*	39*	40*	36, 40, 40, 39, 36, 38 37*
PIANO 4	43, 45, 42,	47, 44, 44,	43, 45, 42,	43, 43, 43,	37, 38, 37,	35, 35, 36,
	42, 44, 44,	42, 40, 42,	44, 44, 44,	44, 42, 42,	36, 34, 38,	34, 34, 35,
	41, 44, 45	42, 44, 42	43, 44, 42	42, 43, 42	36, 37, 38	33, 37, 36
	43*	43*	43*	43*	37*	35*
PIANO 9	41, 41, 37,	40, 43, 45,	38, 36, 35,	40, 42, 41,	33, 31, 31,	30, 32, 32,
	36, 38, 36,	44, 40, 46,	38, 38, 39,	42, 42, 45,	30, 30, 32,	33, 33, 33,
	34, 39, 35	42, 45, 44	39, 39, 34	38, 41, 41	32, 32, 32	34, 33, 33
	37*	43*	38*	41*	32*	32*

Figura 3.14: Risultati delle prove sclerometriche effettuate sull'edificio B [indice di rimbalzo]

* Media aritmetica effettuata sui risultati delle diverse misurazioni, togliendo il valore maggiore e il minore

	n. PIANO								
	-1	0	1	3	5	7	9	11	13
1	40X90	35X80	30X80	30X70	30X60				
2	30X220	30X300	30X300	30X300	30X140				
3	40X130	40X130	35X120	35X105	35X95	35X85	35X75	35X75	35X70
4	65X130	60X140	35X210	30X210	30X185	30X150	30X130	30X130	30X130
5	25X120	20X130							
6	65X130	60X130	35X190	30X190	30X170	30X150	30X130	30X130	30X130
7	30X130	30X130	30X80	30X80	30X80				
8	40X100	35X100	30X90	30X100	30X90	30X75	30X60	30X60	30X60
9	100X90	100X80	110X70	110X60	110X50	110X40	90X40	80X35	80X40
10	70X90	80X80	80X70	80X60	60X60	50X60	40X60	40X60	40X60
11	70X90	80X80	80X70	80X60	60X60	50X60	40X60	40X60	40X60
12	50X135	50X130	50X120	45X105	45X90	40X80	35X80	35X80	35X80
13	45X130	45X130	30X150	30X130	25X130	25X110	25X90	25X90	25X90
14	40X130	40X130	35X120	35X105	35X95	35X85	35X75	35X75	35X75
15	35X120	35X120	30X120	30X120	30X120				
16	30X120	30X120	30X120	30X120	30X120				
17	40X100	35X100	30X90	30X100	30X90	30X75	30X60	30X60	30X60
18	40X90	35X80	30X80	30X70	30X60				
19	30X225	30X300	30X300	30X300	30X140				
20	40X130	40X120	40X105	40X90	40X80	40X70	40X60	40X60	40X60
21	35X120	35X120	35X105	35X90	35X80	35X70	35X60	35X60	35X60
22	40X170	40X190	30X150	30X150	30X150	30X135	30X135	30X135	30X135
23	80X60	85X60	100X55	100X50	100X45	100X40	100X35	100X35	100X35
24	130X80	120X80	120X70	120X60	120X50	100X50	100X40	100X40	100X40
25	36X225	36X80	37X65	36X60	36X55	36X50	36X40	35X40	34X40
26		36X80	37X65	36X60	36X55	36X50	36X40	35X40	33X40
27	40X120	40X120	40X105	40X90	40X80	40X70	40X60	40X60	40X60
28	40X120	40X120	40X105	40X90	40X80	40X70	40X60	40X60	40X60
29	35X120	35X120	30X105	30X120	30X120				
30	30X120	30X120	30X105	30X120	30X120				

Figura 3.15: Rilievo strutturale in sito

3.6 MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

Il comportamento del fabbricato è stato colto facendo ricorso ad un modello strutturale spaziale nel quale travi e pilastri sono stati modellati con elementi finiti tipo “beam” (figura 3.16).

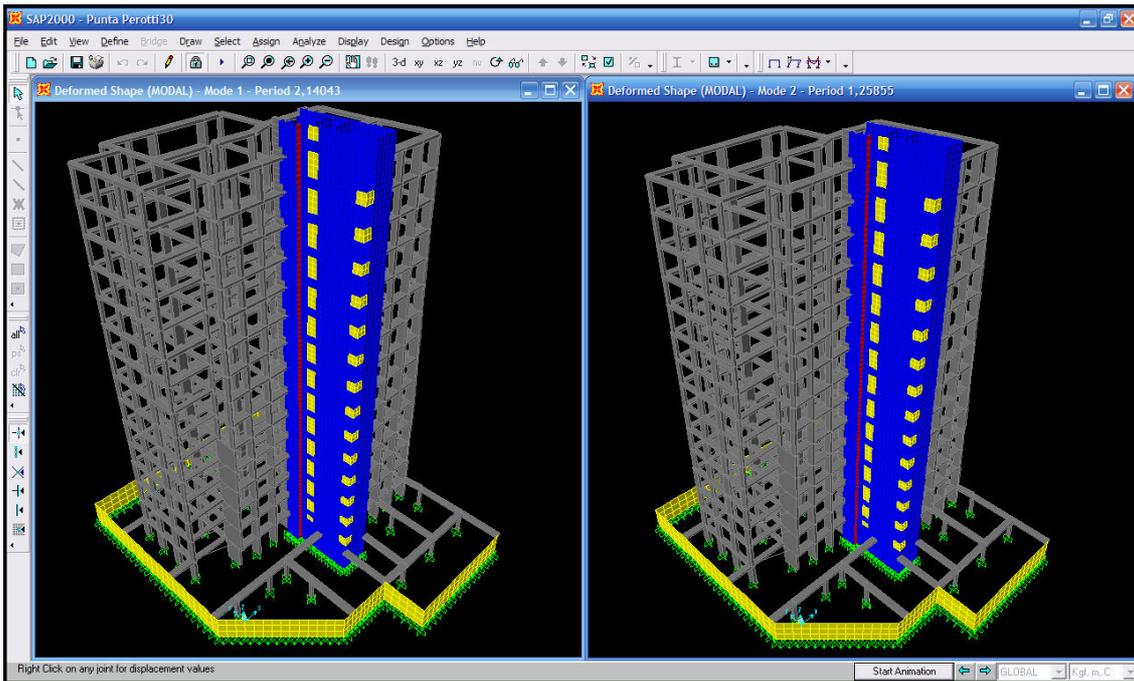


Figura 3.16: Modello strutturale spaziale agli elementi finiti

Le pareti in cemento armato del vano scala e quelle delle pareti contro terra del piano interrato, dopo aver operato una opportuna suddivisione delle stesse, sono state modellate attraverso elementi tipo shell. Il comportamento di piano infinitamente rigido, descritto da due traslazioni rigide del piano lungo due direzioni ortogonali tra loro e una rotazione di piano, è stato simulato imponendo ai nodi di ciascun piano l'appartenenza ad un diaframma, cosicché ad ogni solaio di piano corrisponde un diverso diaframma. La definizione meccanica del calcestruzzo è avvenuta utilizzando i valori ottenuti dalle prove sperimentali condotte su carote estratte dalla struttura reale (vedi capitolo 5). Il modello è stato reso solidale al terreno assegnando ai nodi di base il vincolo di incastro.

3.7 ACQUISIZIONE DEL SEGNALE

Al fine di determinare gli effetti del micro-sisma cagionato dall'esplosione e dal crollo dell'edificio A, demolito parzialmente il 02-04-2006, sulle costruzioni adiacenti, la risposta strutturale dell'edificio B (primo vano scala), sotto forma di storie di

accelerazione, è stata colta attraverso il posizionamento di accelerometri in un numero opportuno di punti. In particolare, l'edificio è stato strumentato, in ciascuno dei cinque livelli monitorati, attraverso 3 accelerometri posizionati con l'asse principale orizzontale e disposti in due direzioni ortogonali tra loro, per un totale di 15 accelerometri. Adottando un sistema di riferimento globale (x,y) con l'asse delle x disposto ortogonalmente al vano scala la disposizione in pianta degli accelerometri vede una coppia di accelerometri orientati secondo l'asse delle y e il terzo secondo l'asse delle x (figura 3.17).

Sono stati utilizzati accelerometri modello 393B12 della PCB Piezotronics con una sensibilità di 10V/g e un fondo scala di 0.5g con un intervallo di frequenza da 0.15 a 1000 Hz .

I tre accelerometri posizionati nel piano interrato sono stati volutamente scelti con fondo scala di 5g.

Gli accelerometri sono stati collegati a due centraline di acquisizione Modello 483A10 a dodici canali della PCB Piezotronics dotate di amplificatore, convertitore analogico - digitale e quindi ad un elaboratore elettronico dedicato.

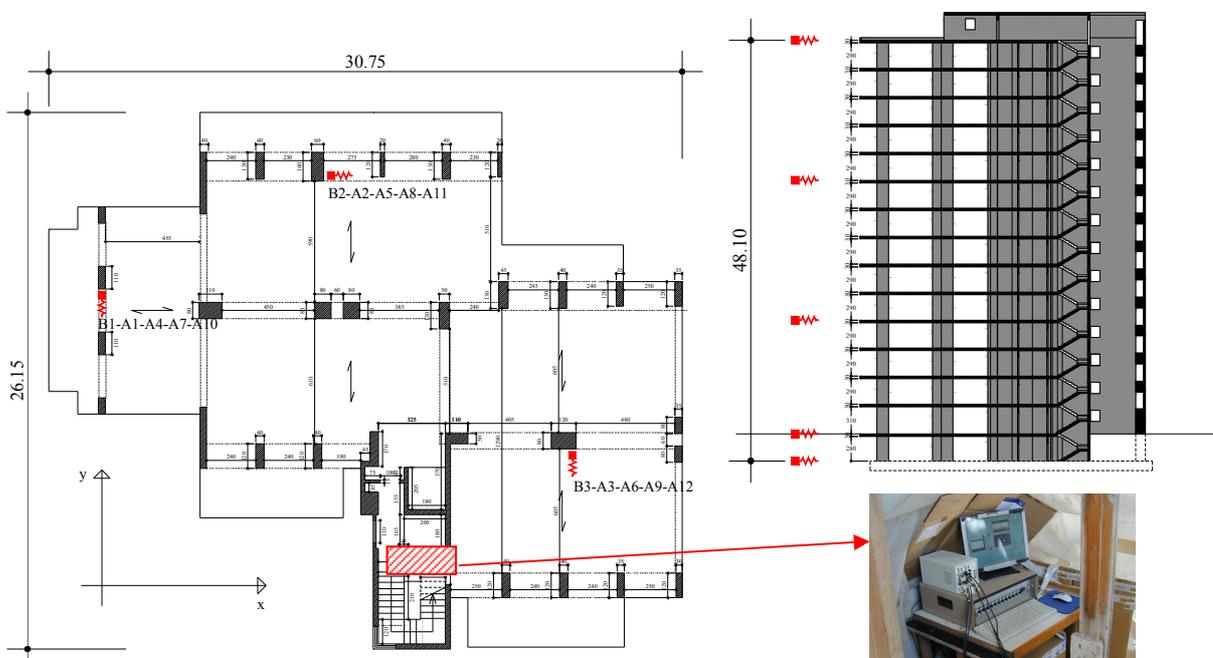


Figura 3.17: Posizione in pianta e in altezza degli accelerometri



Figura 3.18: Freccia del tempo

È stata imposta una frequenza di campionamento (f_c) pari a 1kHz, per un intervallo di campionamento pari a 1ms, pertanto è stato possibile cogliere il segnale per una banda di frequenze compresa nell'intervallo 0-500Hz.

La registrazione (per ovvie ragioni di sicurezza) è durata circa cinquanta minuti in quanto è stato necessario attivare la centralina molto tempo prima che avvenisse l'esplosione e solo a operazioni concluse è stato possibile ritornare sul posto (figura 3.18). I dati raccolti sono stati ordinati in una matrice $M(3041000 \times 16)$, in cui la prima colonna indica il tempo e le successive si riferiscono ciascuna ad un accelerometro, per cui ciascun elemento a_{ij} rappresenta il valore di accelerazione, della storia accelerometrica, rilevata dall'accelerometro j all'istante i .

3.8 ANALISI DEL SEGNALE

Con riferimento al posizionamento delle microcariche è possibile dividere il fabbricato in due parti, la prima parte denominata "A" si riferisce ai primi sette piani fuori terra (porzione minata), la seconda parte "B" è compresa tra l'ottavo piano e la copertura (porzione non minata).

Con il brillamento delle cariche, durato ricordiamo 0,5 s in ragione di 20 micro - ritardi ciascuno di 25 millesimi di secondo, si ha l'implosione della porzione A che favorisce il ribaltamento pressoché rigido della porzione B, rimasta indenne fino a quel istante.

L'analisi dei tracciati accelerometrici mostra due distinti e significativi treni di onde orizzontali corrispondenti a due separati intervalli temporali, il primo della durata di circa 0,5 sec probabilmente relativo all'esplosione e al martellamento dei primi piani in

cui erano alloggiate le mine (porzione A), ed il secondo di circa 2,5 sec relativo all'impatto al suolo della porzione di struttura non minata (porzione B), separati da un intervallo temporale di circa 2 sec. Pertanto, la durata complessiva dell'evento è stata stimata in circa 5 sec (figura 3.19).

Il confronto tra i segnali registrati nel dominio fisico del tempo e le immagini dell'esplosione confermano questa ipotesi consentendo di riconoscere tre momenti significativi nella dinamica dell'esplosione e del crollo (figura 3.20).

Il primo momento corrisponde all'esplosione e conseguente crollo del blocco A caratterizzato da un insieme di martellamenti di piano, il secondo al ribaltamento pressoché rigido del blocco B, il terzo al crollo del blocco B caratterizzato dall'impatto con il terreno e conseguente schiacciamento anche ad opera dei vani scala rimasti sostanzialmente intatti, in virtù della importante rigidità nella direzione di impatto.

L'osservazione delle macerie dopo l'evento ed in particolare delle gabbie dei vani scala, rimaste intere per gli ultimi sette piani, segnalano con chiarezza il ribaltamento del blocco B, solidale ad essi fino al momento dell'impatto con il terreno.

L'intensità delle accelerazioni registrate in fondazione relative alla prima fase sono nettamente inferiori a quelle misurate durante la seconda fase. La prima fase è infatti caratterizzata da un'implosione della porzione di fabbricato denominata "A", così che

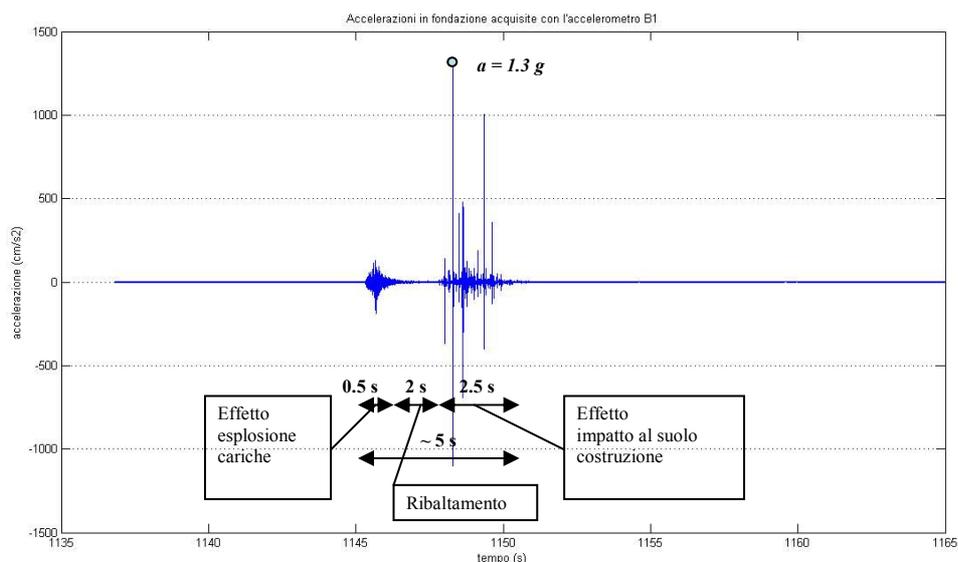


Figura 3.19: Tracciato accelerometrico accelerometro B1

imploendo non si è schiantata al suolo nella sua interezza e nello stesso istante bensì si accartoccia su se stessa in maniera graduale formando man mano uno strato di maceriedi spessore crescente nel tempo che svolgendo l'utile funzione di "cuscinetto" attenua la propagazione delle vibrazioni all'immediato sottosuolo per discontinuità.

Inoltre, in questa fase, l'energia sviluppata dall'esplosione è in parte restituita per deformazione elastica al sottosuolo: le vibrazioni trasmesse provengono presumibilmente solo da alcuni fori, pensando ad un pilastro del piano terra è lecito ipotizzare che le vibrazioni trasmesse al terreno siano dovute al 1° foro in basso, in quanto quelle provenienti dai restanti e sovrastanti fori non riescono a propagarsi all'ingù a causa della discontinuità nel pilastro creata proprio dall'esplosione del 1° foro in basso. Considerando invece i fori dei restanti piani, le vibrazioni da essi provenienti non si sommeranno a quelle dei fori del piano campagna in quanto verranno innescati con microritardi successivi.

La seconda fase è invece caratterizzata dal ribaltamento della porzione di fabbricato denominata "B", così che l'energia gravitazionale dovuta alla caduta al suolo della struttura non subirà attenuazioni e sarà in gran parte assorbita dall'immediato sottosuolo per deformazione elastica e quindi come innesco vibrazionale.

In figura 3.21 sono riportati tutti i tracciati accelerometrici registrati limitati alla durata dell'evento con l'indicazione della direzione e del piano.

Dall'analisi si osserva un primo aspetto significativo, nel primo tratto, relativo all'esplosione e crollo del blocco A, le accelerazioni alla base (accelerazioni di ingresso) vengono amplificate dalla costruzione mentre nel secondo tratto, relativo al crollo del blocco B, il fabbricato smorza le accelerazioni registrate in ingresso. Pertanto l'eccitazione della costruzione, qualificata attraverso l'esaltazione dell'ampiezza della vibrazione in ingresso, è più rilevante nel primo tratto. Attraverso la definizione del coefficiente di amplificazione D , definito dal rapporto tra i valori assoluti delle accelerazioni di picco registrate ai diversi piani e la corrispondente accelerazione in ingresso, si è saggiato l'amplificazione delle accelerazioni nella costruzione relativamente al primo treno di vibrazioni cagionate dall'esplosione del blocco A (figura 3.22).

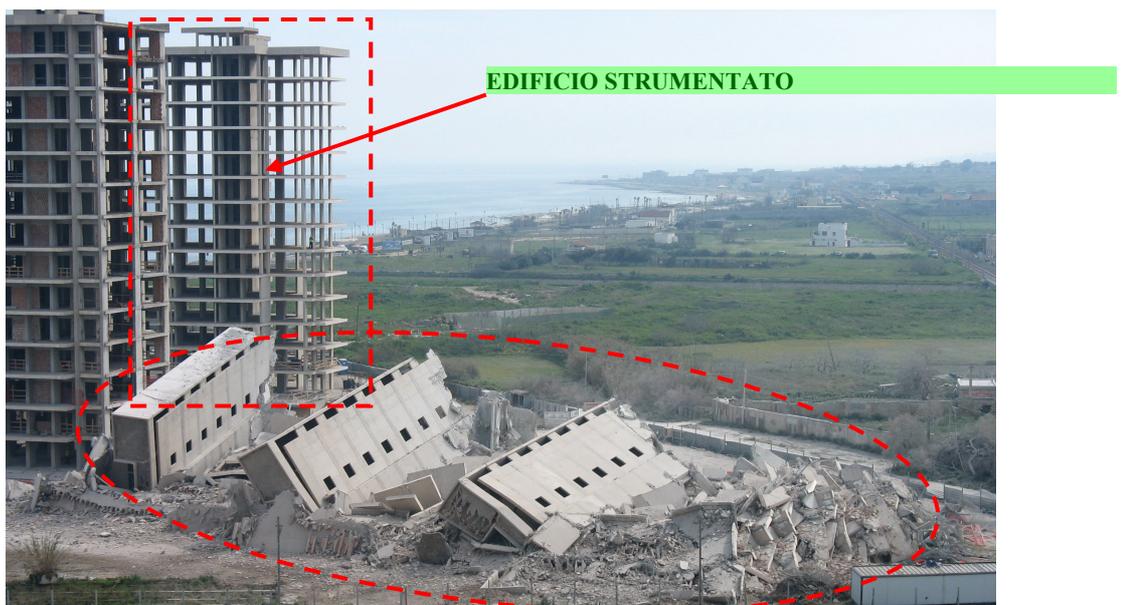
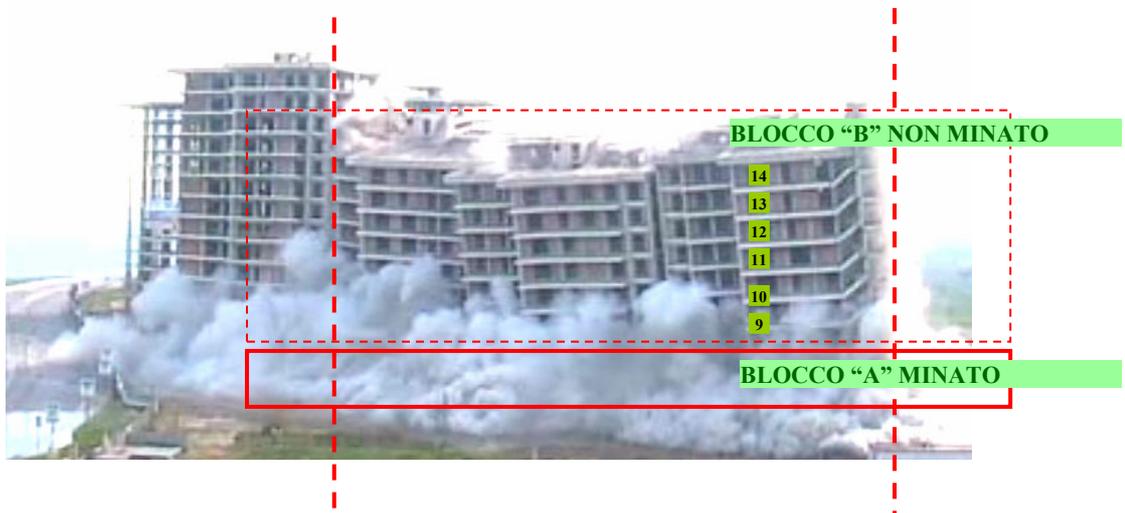
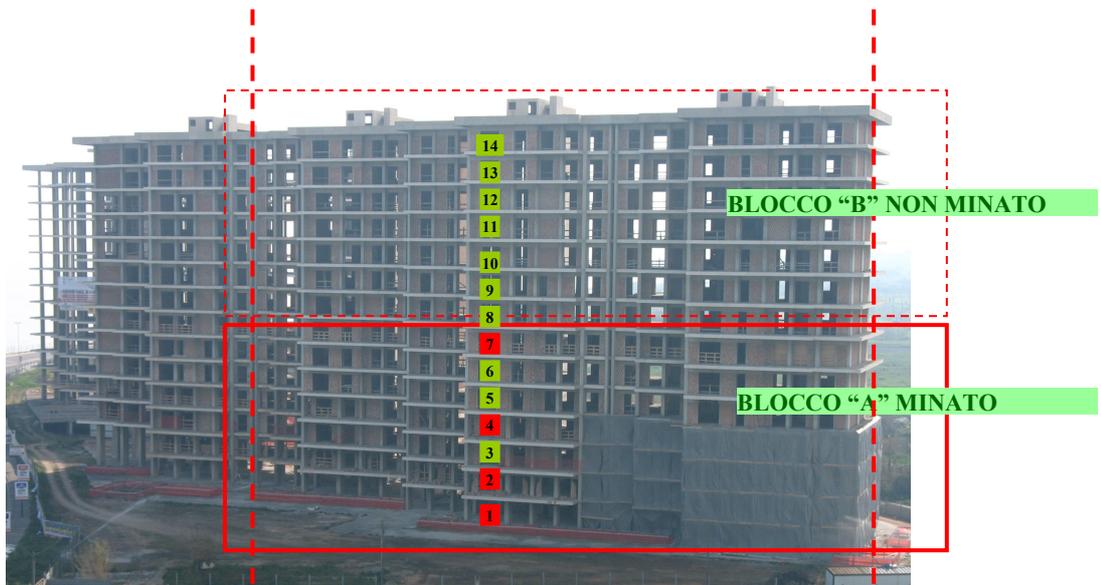


Figura 3.20: Dinamica dell'esplosione e del crollo

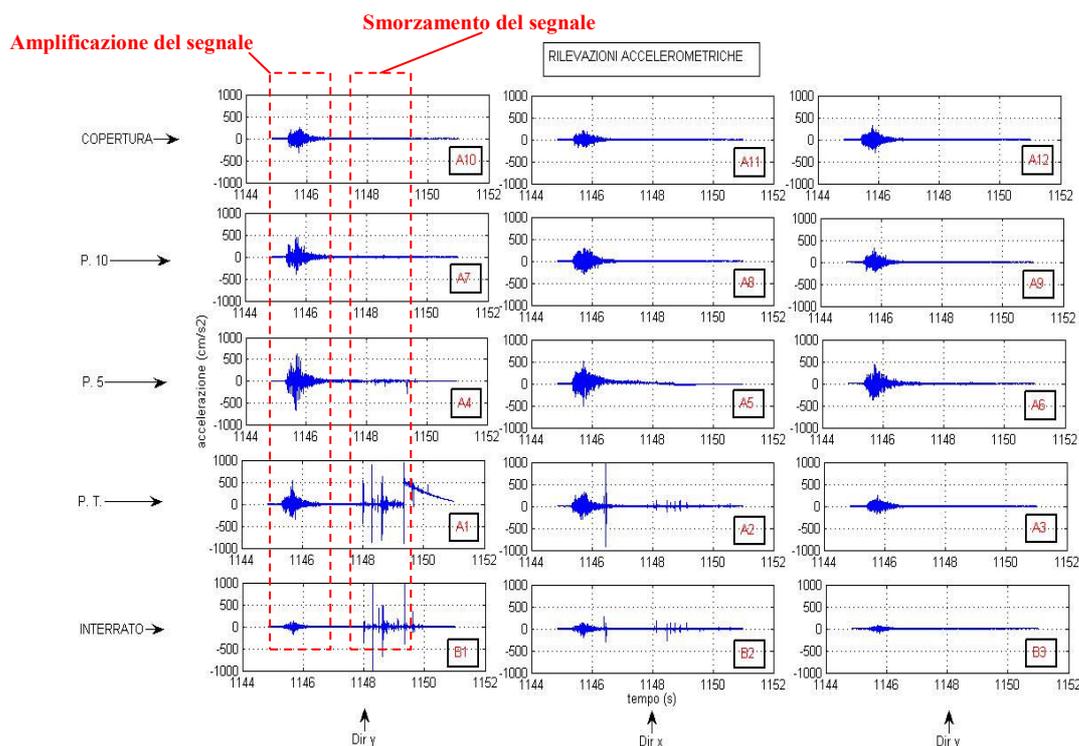


Figura 3.21: Acquisizioni accelerometriche

Si osserva infine un secondo aspetto significativo, l'intensità delle accelerazioni in fondazioni sono alquanto trascurabili, nel primo tratto si è registrato un valore di accelerazione pari a 0,2g mentre nel secondo tratto valori fino a 1,3g, a tal proposito si pensi che il valore di accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A riportato dall' OPCM 3274 per comuni il cui territorio ricade in zona sismica 1 è di 0,35g. D'altro canto l'intervallo di tempo durante il quale tali accelerazioni si manifestano perturbando la costruzione è molto limitato.

dir y	a_{max} (cm/s^2)	D	dir x	a_{max} (cm/s^2)	D	dir y	a_{max} (cm/s^2)	D
B1	-187,10	1,0	B2	-209,40	1,0	B3	-98,09	1,0
A1	541,30	2,9	A2	332,10	1,6	A3	253,00	2,6
A4	684,30	3,7	A5	503,00	2,4	A6	428,70	4,4
A7	447,80	2,4	A8	297,60	1,4	A9	333,20	3,4
A10	-312,90	1,7	A11	203,10	1,0	A12	329,30	3,4

Figura 3.22: Coefficiente di amplificazione

3.9 ANALISI SPETTRALE

Le funzioni accelerazione $\ddot{u}(t)$, acquisite nel dominio del tempo, sono state proiettate nel dominio della frequenza attraverso la funzione $\ddot{U}(f)$ (trasformata di Fourier).

Le funzione $\ddot{u}(t)$, discretizzate con passo di discretizzazione pari a 0.001s, sono state trattate attraverso la fft (Fast Fourier Transform).

Per consentire la rappresentazione grafica dei risultati, che sono numeri complessi, si è determinato il modulo e la fase.

I segnali nel dominio del tempo sono stati inizialmente ordinati in una $M(3041000 \times 16)$ in cui la prima colonna indica il tempo e le restanti si riferiscono ciascuna ad un accelerometro. La durata complessiva della registrazione è stata di 45 minuti.

Si sono considerati tre distinti tratti della registrazione, corrispondenti a tre sottomatrici della matrice M e di seguito chiamate M_1 , M_2 ed M_3 .

Il primo tratto, precedente all'esplosione e al crollo, ha consentito di individuare una frequenza propria della costruzione f_0 , pari a 0.79 Hz ($T_0 = 1.3$ s).

Il terzo tratto, successivo all'esplosione e al crollo, ha consentito di riconoscere nuovamente la frequenza propria di 0.79 Hz della struttura e pertanto, considerando la massa e le caratteristiche elastiche del materiale invariate nel tempo, anche la rigidità non è potuta cambiare e pertanto è lecito, perlomeno con riferimento a questi primi approfondimenti, accantonare possibili ipotesi di danno significativo.

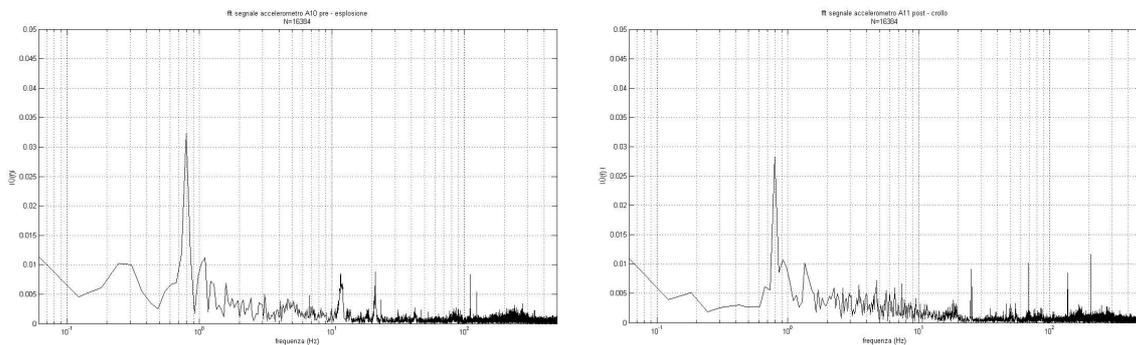


Figura 3.22: fft del segnale acquisito con l'accelerometro A10 prima dell'esplosione e del segnale acquisito con l'accelerometro A11 dopo il crollo

3.10 VALIDAZIONE DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

È stata eseguita sul modello agli elementi finiti, che descrive l'edificio strumentato nella condizione di applicazione dei soli pesi propri, l'analisi modale individuando i primi modi di vibrare della struttura.

La figura 3.23 mostra i primi due modi di vibrare, che risultato prevalentemente flessionali, in particolare il secondo modo di vibrare appare caratterizzato da una frequenza propria comparabile con la frequenza di picco restituita dall'analisi spettrale dei segnali acquisiti nel dominio del tempo.

Sono state confrontate, per tre nodi, la forma modale restituita dal modello e relativa al secondo modo di vibrare con la forma modale sperimentale colta congiungendo in corrispondenza di ciascun punto di misura, lungo lo stesso pilastro, il contributo di spostamento relativo all'armonica di frequenza 0,79 Hz del segnale acquisito in quel punto.

Pertanto a partire dallo spettro di frequenza di ciascun accelerometro si sono ricostruite in termini di spostamento le armoniche relative alla frequenza indagata per tutti i punti monitorati (figura 3.24).

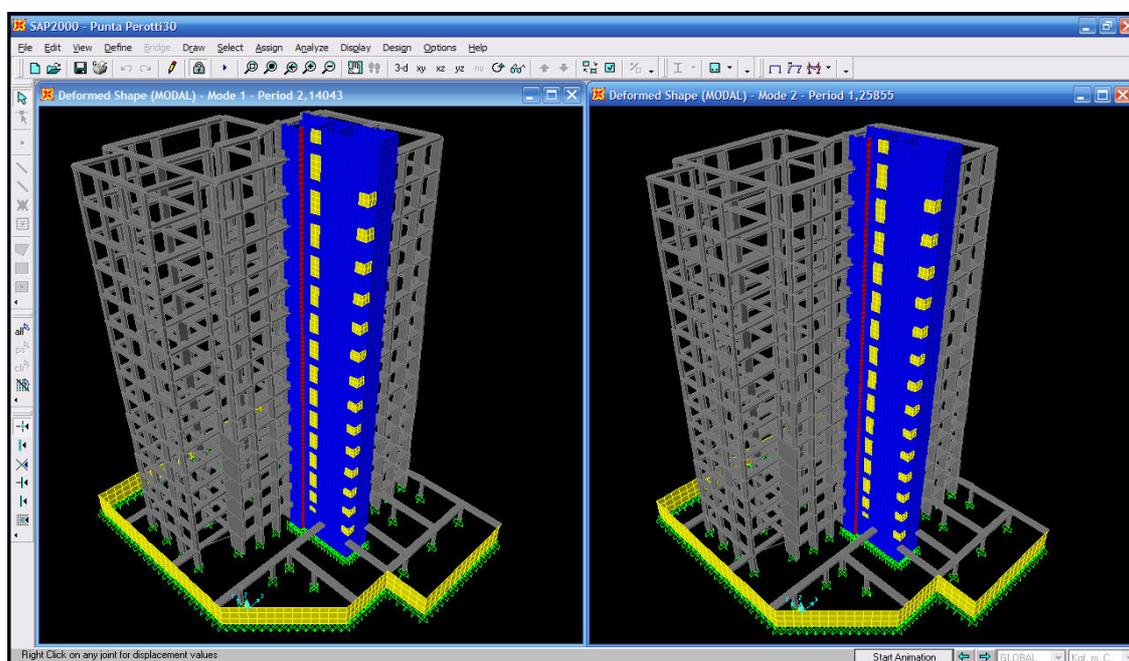


Figura 3.23: Primi modi di vibrare del modello agli elementi finiti

Le figure 3.25, 3.26, 3.27 mostrano sia le forme modali relative al modello sia quelle costruite partendo dai risultati sperimentali, dal confronto appare la comparabilità delle stesse.

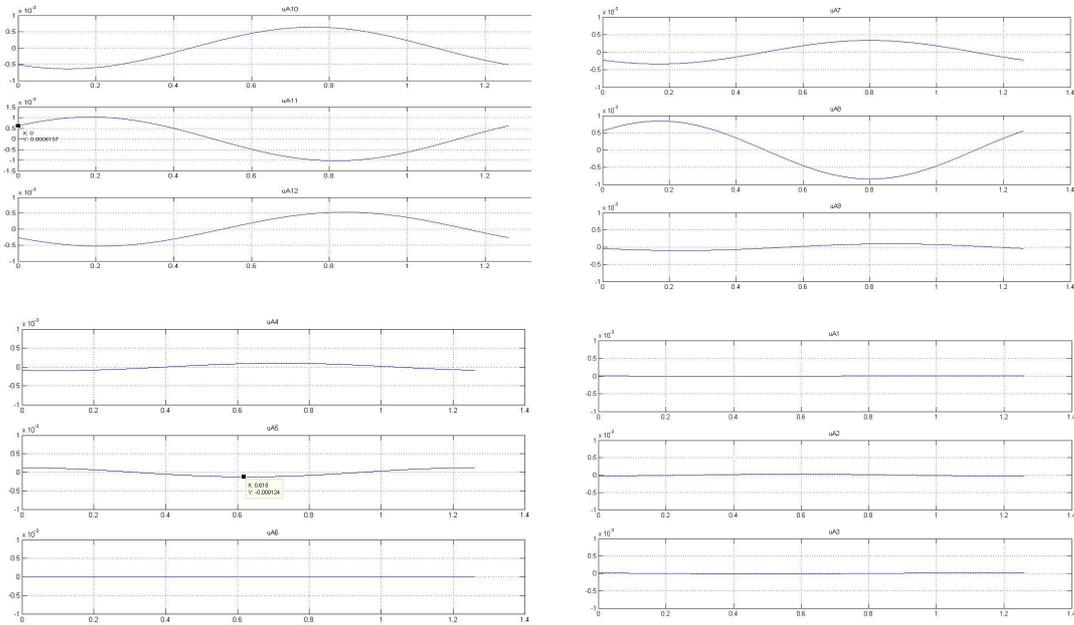


Figura 3.24: Contributo di spostamento, per ciascun punto di misura, riferito al contenuto armonico del segnale a frequenza 0.79 Hz

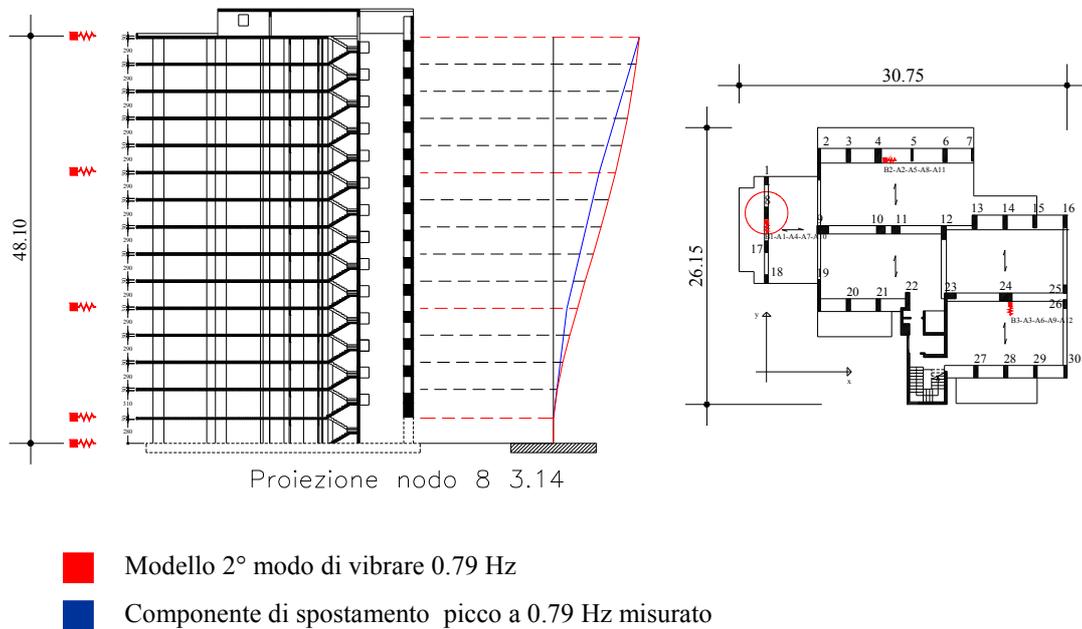


Figura 3.25: Forma modale del modello e sperimentale relativa al nodo 8

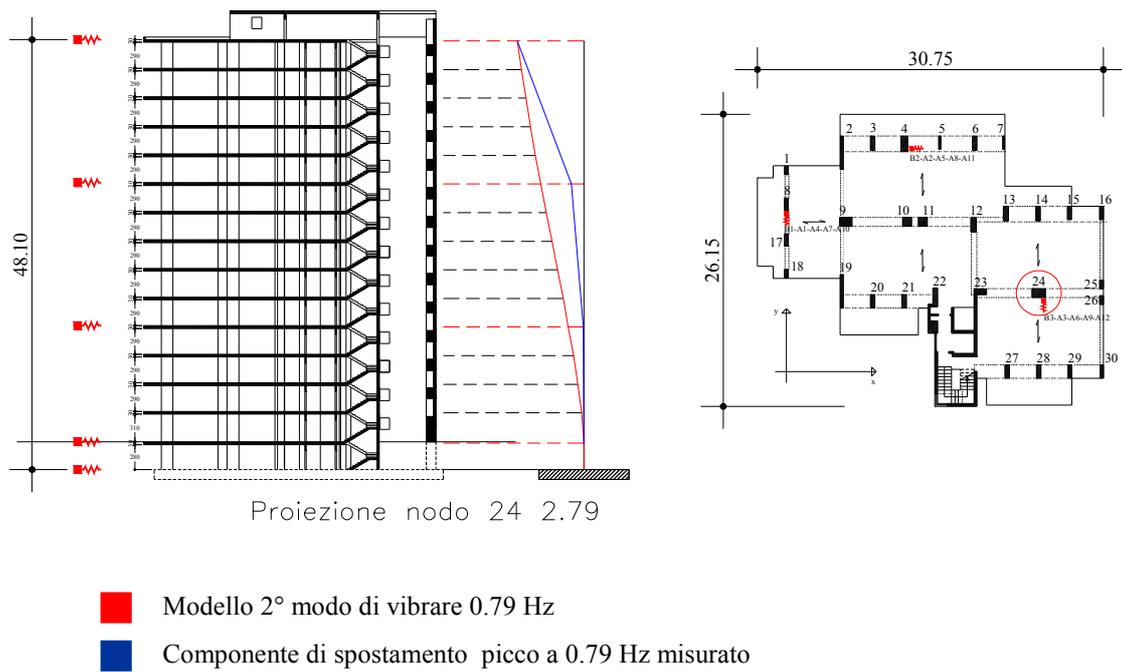


Figura 3.26: Forma modale del modello e sperimentale relativa al nodo 24

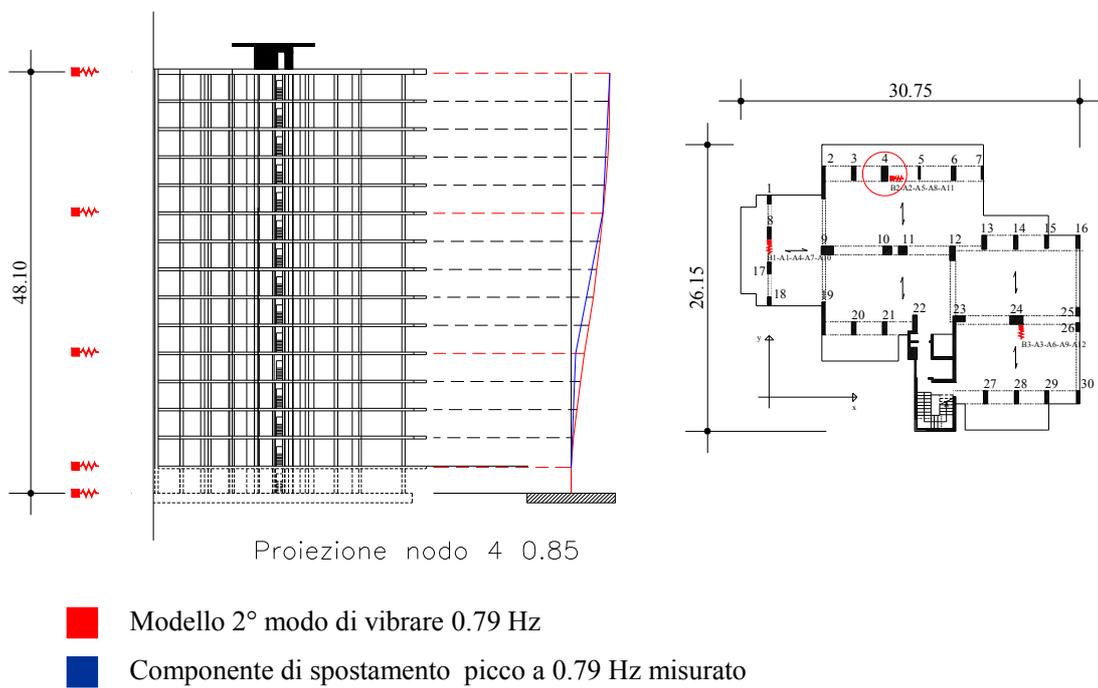


Figura 3.27: Forma modale del modello e sperimentale relativa al nodo 4

4. SUL CALCESTRUZZO CONFEZIONATO CON AGGREGATI DI RICICLO

A partire dalla metà degli anni settanta, alcuni ricercatori iniziarono ad occuparsi di calcestruzzo sostenibile confezionato utilizzando aggregati provenienti dal trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D waste). I risultati di questi primi studi spinsero la RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherche sur les Matériaux et les constructions*) a istituire nel 1981 un comitato tecnico 37-DRC (*Demolition and Reuse of Concrete*), sostituito nel 1989 dal comitato RILEM 121-DRG (*Demolition and Reuse Guidelines*) che nel 1994 pubblicò “*Guidance for Demolition and Re-use of Concrete and Masonry. Specification for Concrete with Recycled Aggregates*” [13] fornendo un primo riferimento per l'utilizzo degli aggregati di riciclo nel calcestruzzo.

La RILEM nel documento del 1994 aveva proposto una classificazione in aggregati di:

- Tipo 1: aggregati composti principalmente da muratura demolita;
- Tipo 2: aggregati composti principalmente da calcestruzzo demolito;
- Tipo 3: aggregati composti da un mix di aggregati di riciclo e naturali, con almeno l'80% in peso di aggregato naturale ed un massimo del 10% in peso di aggregato tipo 1.

Le linee guida definite dalla RILEM hanno dato un importante incentivo all'utilizzo degli aggregati di riciclo per confezionare calcestruzzi e posto le basi per i successivi studi sviluppati a livello internazionale.

4.1 GLI AGGREGATI DI RICICLO

Il buon risultato di un calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo, così come per un calcestruzzo confezionato con aggregati naturali, dipende da molti fattori.

Tra le difficoltà incontrate nel confezionare calcestruzzo con aggregati di riciclo si segnala la variabilità, per qualità e composizione, degli aggregati di riciclo che dipende dalle macerie di provenienza degli stessi: a seconda del periodo di edificazione e della localizzazione territoriale variano le tecniche costruttive e i materiali impiegati.

Pertanto, il primo passo per realizzare un calcestruzzo sicuro a partire da aggregati di riciclo è conoscere le caratteristiche dell'aggregato riciclato che lo compone, dove per

aggregato riciclato si intende “l’aggregato risultante dalla lavorazione di materiale inorganico precedentemente utilizzato in edilizia” [UNI-EN-12620].

Gli aggregati di riciclo sono costituiti da una miscela di grani di natura diversa (figura 4.1) presenti in quantità variabili. È opportuno distinguere tra aggregati riciclati provenienti dalla frantumazione di soli calcestruzzi e aggregati riciclati “tout venant”, provenienti da macerie ma parzialmente qualificati (sottoposti a trattamenti per l’eliminazione di terra, ferro, plastica, legno ecc.).

Un’analisi visiva degli aggregati di riciclo provenienti da solo calcestruzzo consente di riconoscere grani di solo calcestruzzo, aggregati naturali ricoperti da uno spesso strato di vecchia malta cementizia (*adhered mortar-AM*), aggregati naturali più puliti che possono avere residui di malta di cemento solo in alcuni punti ed infine aggregati naturali rigenerati dal processo di frantumazione.

Emerge subito un primo aspetto caratteristico degli aggregati di riciclo: la eterogeneità del singolo grano costituito da più fasi.

Gli aggregati riciclati provenienti da macerie sono più eterogenei per la presenza anche di impurità come elementi in laterizio o frammenti di piastrelle.

Generalmente entrambi i tipi di aggregati riciclati hanno un peso specifico inferiore a quello degli aggregati naturali (2500-2800 kg/m³), a causa della presenza della malta cementizia (materiale poroso la cui porosità dipende dal rapporto a/c del calcestruzzo originario o dalla malta utilizzata per la realizzazione delle murature, figura 4.2) che vi rimane attaccata.

Gli aggregati “tout venant” hanno un peso specifico leggermente inferiore a quello degli aggregati di riciclo provenienti da solo calcestruzzo. Il peso specifico apparente è compreso tra 2150-2350 kg/m³ per i primi e tra 2200 e 2400 kg/m³ per i secondi; il peso specifico degli aggregati saturi a superficie asciutta è compreso tra 2200-2300 kg/m³ per i primi e tra 2400-2500 kg/m³ per i secondi. Il minor peso degli aggregati provenienti da macerie può essere correlato alla presenza di elementi più leggeri quali laterizi e altre impurità.

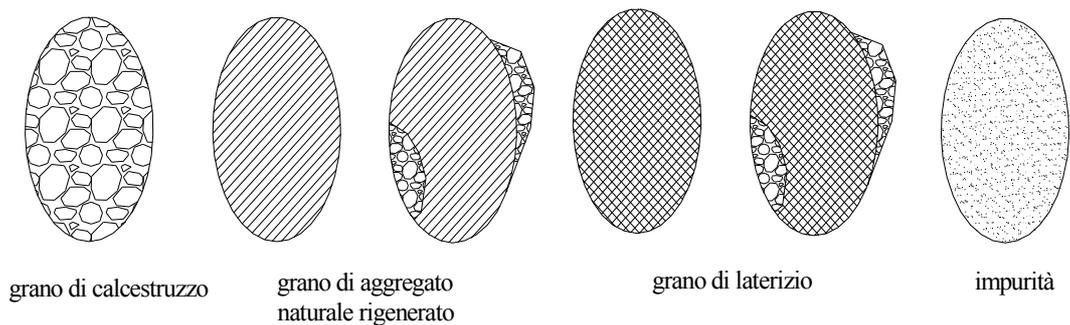


Figura 4.1: tipi di aggregato di riciclo

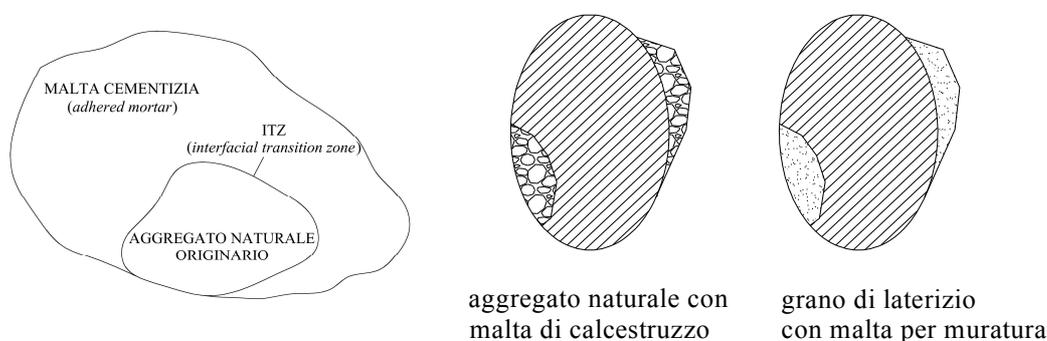


Figura 4.2. Composizione di un aggregato di riciclo.

La presenza della malta cementizia (*adhered mortar*) gioca un ruolo fondamentale poiché, costituendo una diversa fase con proprietà differenti rispetto all'aggregato naturale, modifica alcune delle proprietà più critiche degli aggregati.

Il quantitativo e la qualità della malta cementizia che aderisce all'aggregato naturale originario sono dunque importanti indicatori della qualità dell'aggregato di riciclo. In particolare maggiore è il quantitativo di malta cementizia nell'aggregato di riciclo, minore è la sua qualità. La stima di questo parametro viene effettuata prevalentemente su aggregati derivanti dal trattamento di macerie in calcestruzzo.

La stima di malta cementizia aderente all'aggregato, calcolata convenzionalmente in percentuale sul peso totale degli aggregati, può essere effettuata [14, 15] attraverso ricognizione visiva e indagine al microscopio, dissoluzione in acido cloridrico.

Il quantitativo di malta cementizia attaccata all'aggregato naturale originario è proporzionale alla resistenza meccanica del calcestruzzo originario. Un altro fattore che

può influenzare il quantitativo di malta cementizia nell'aggregato di riciclo è la scelta del processo di frantumazione. Alcuni studi hanno infatti dimostrato che se il demolito viene sottoposto ad una frantumazione in più fasi si riscontra una riduzione del quantitativo di malta cementizia [14].

L'assorbimento d'acqua è la proprietà che differenzia maggiormente gli aggregati naturali da quelli di riciclo e dipende principalmente dalla presenza e dalla qualità della malta cementizia attaccata all'aggregato originale naturale [16] determinando un aumento dell'assorbimento d'acqua complessivo degli aggregati di riciclo (aumento dell'ordine del 5% nel caso di aggregati grossi, del 10% per quelli fini).

L'assorbimento d'acqua, che generalmente per le sabbie è circa 1,50 - 3,50 %, per il pietrisco 1 - 4,50 %, per il granito 0,80-1,20 %, per le pietre calcaree 0,50 - 0,75 %, negli aggregati di riciclo assume valori compresi prevalentemente tra 3-8% per la frazione grossa e tra 8-15% per la frazione fine.

In fase di preparazione del calcestruzzo se il quantitativo d'acqua, definito dal rapporto a/c, non viene adeguatamente corretto, gli aggregati di riciclo, per raggiungere la condizione satura su superficie asciutta, generalmente assorbono acqua sottraendola alla miscela e alterando così il rapporto a/c. Per limitare i problemi conseguenti ad un così alto assorbimento d'acqua alcuni autori suggeriscono di bagnare gli aggregati prima di miscelarli agli altri componenti: Exteberria et al. (2007) suggeriscono di rendere umidi gli aggregati all'80% [17], Evangelista & de Brito (2007) suggeriscono invece di miscelare gli aggregati con 2/3 dell'acqua di miscela e con il quantitativo di acqua necessario a portarli in condizione SSA [18], Topçu & Sengel (2004) sostengono invece che gli aggregati debbano essere miscelati per 30 minuti con il solo quantitativo di acqua necessario a portarli in condizione SSA prima di miscelarli con gli altri componenti [19], Zaharieva et al. (2004), infine, affermano che si ottengono migliori risultati dalle miscele realizzate con aggregati di riciclo se questi vengono sottoposti a pre-saturazione [20].

Le proprietà fisiche degli aggregati di riciclo (peso specifico e assorbimento d'acqua), peggiori rispetto agli aggregati naturali, vengono amplificate nella frazione fine per la maggior quantità di malta cementizia presente. Pertanto per la produzione di

calcestruzzi con aggregati di riciclo viene consigliato l'utilizzo della sabbia naturale in sostituzione di quella di riciclo.

Un uso alternativo della frazione fine ottenuta dalla frantumazione di aggregato riciclato può essere quello di impiegarla nella produzione di malta. Corinaldesi ed altri [21] hanno condotto sperimentazioni in questo senso e affermano che l'utilizzo della frazione fine di materiali di riciclo permette di realizzare malte che presentano buone caratteristiche meccaniche e di aderenza ai mattoni.

Un punto debole degli aggregati riciclati rispetto a quelli di origine naturale è la presenza di microfratture dovute alle operazioni di frantumazione. Una tecnica di indagine è quella visiva al microscopio, che indaga la superficie del granulo, appositamente preparata sezionando un piano, levigando con polvere di diamante e trattando con liquido fluorescente [14].

Nel caso di aggregati provenienti da solo calcestruzzo, le fessure possono interessare (figura 4.3):

- il vecchio aggregato;
- la vecchia matrice cementizia;
- l'interfaccia aggregato-matrice (ITZ - Interfacial Transition Zone).

Gli aggregati di riciclo normalmente contengono quantità molto maggiori di polveri rispetto agli aggregati naturali. Da esami al microscopio elettronico è emerso che la superficie esterna risulta disseminata di piccole particelle (da pochi micron a centinaia) blandamente saldate al granulo di calcestruzzo (figura 4.4).

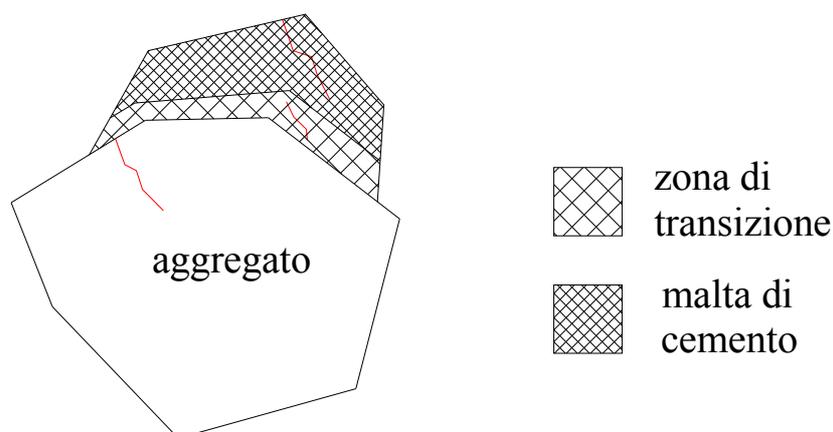


Figura 4.3: Possibili fratture in un aggregato di riciclo dovute alla frantumazione

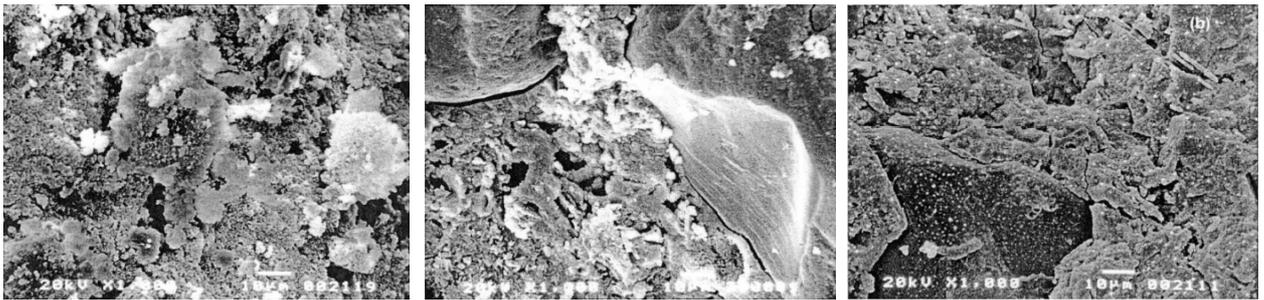


Figura 4.4: Superficie sporca degli aggregati riciclati; superficie pulita degli aggregati riciclati in prossimità di un aggregato naturale; superficie pulita degli aggregati riciclati, particolare della matrice cementizia [22]

Queste particelle, risultato della frantumazione del calcestruzzo, in particolare della pasta cementizia, ridurrebbero la qualità dell'aggregato riciclato. È possibile pulire la superficie dell'aggregato attraverso bagni ad ultrasuoni [22].

È possibile riscontrare la presenza di cemento non idratato che può rappresentare una riserva di resistenza per la residua capacità legante.

Sono state messe a punto alcune tecnologie per migliorare le prestazioni degli aggregati di riciclo provenienti dalla frantumazione di solo calcestruzzo, in particolare l'obiettivo è quello di staccare la malta cementizia dagli aggregati del calcestruzzo demolito attraverso frantoi disposti in sequenza [14] o per collisione tra gli stessi aggregati [15].

Katz ha condotto uno studio sul trattamento di impregnazione dell'aggregato di riciclo con una soluzione di fumi di silice, il sottile strato di particelle di fumi di silice che va a ricoprire l'aggregato (figura 4.5) reagisce nella reazione di idratazione con l'idrossido di calcio formando uno strato denso che dà resistenza maggiore agli aggregati e al calcestruzzo con essi confezionato. Il trattamento consiste nel porre gli aggregati, asciugati in forno e riportati a temperatura ambiente, in una soluzione di acqua (con disperdente) e fumi di silice per 24 h e nell'asciugare in forno gli aggregati trattati. Si stima che l'assorbimento dei fumi di silice sia $0,5 \div 0,8\%$ del peso a secco degli aggregati [22].

Nella figura 4.6 è illustrata in modo schematico la composizione del calcestruzzo confezionato una volta con gli aggregati di riciclo "tout venant" e l'altra con aggregati di riciclo di solo calcestruzzo.

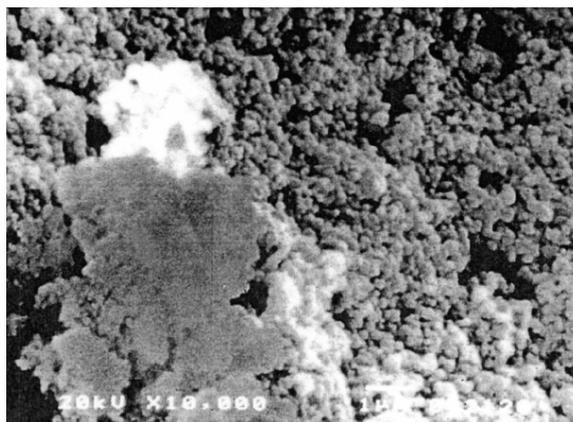


Figura 4.5: Superficie degli aggregati riciclati dopo il trattamento ai fumi di silice, foto al microscopio elettronico [22]

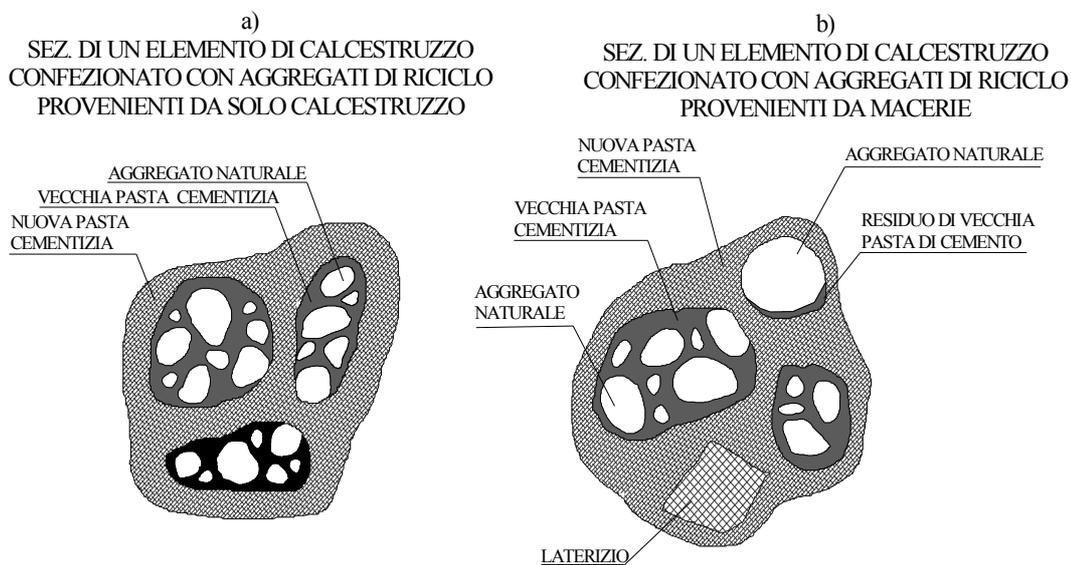


Figura 4.6: Calcestruzzi confezionati con aggregati di riciclo da solo calcestruzzo (a) e da macerie (b) [23]

4.2 PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO ALLO STATO FRESCO

4.2.1 Lavorabilità del calcestruzzo con aggregati riciclati

La lavorabilità è influenzata principalmente dalle caratteristiche degli aggregati: in particolare, il forte grado di assorbimento che caratterizza gli aggregati riciclati è responsabile della diminuzione della lavorabilità del calcestruzzo al crescere della percentuale di aggregati di riciclo utilizzati. Se non si adottano misure correttive del

quantitativo d'acqua, ovvero se non viene introdotto nella miscela il quantitativo d'acqua necessario a portare gli aggregati in condizione SSA, gli aggregati tenderanno (se il tasso di umidità reale è inferiore al valore di assorbimento d'acqua SSA) ad assorbire, e quindi a sottrarre, acqua all'impasto, che oltre a non essere più caratterizzato dal rapporto a/c definito, risulterà meno fluido e a ridotta lavorabilità.

Tra le tecniche più immediate per la risoluzione del problema vi è la sostituzione nel calcestruzzo del solo aggregato riciclato grosso o l'uso di additivi superfluidificanti, che hanno il pregio di non richiedere altra acqua d'impasto.

Topçu & Sengel (2004) riportano che si riscontra una progressiva perdita di lavorabilità con l'aumentare della percentuale di sostituzione degli aggregati naturali con quelli di riciclo. Nel caso di calcestruzzo confezionato con il 100% di aggregato di riciclo si ha una perdita di lavorabilità (riduzione dello slump) del 15–20% rispetto alla lavorabilità della miscela di riferimento, confezionata con solo aggregato naturale; inoltre gli autori riportano che la riduzione dello slump aumenta nel caso la percentuale di aggregato di riciclo sia $\leq 50\%$ [24].

Kathib (2005), che ha sostituito la sola frazione fine (inferiore a 5mm) di aggregato comune con aggregato di riciclo, ed ha confezionato calcestruzzi con rapporto a/c pari a 0,5 e senza l'aggiunta di fluidificante, ha riportato che le miscele finali mostrano una buona lavorabilità (slump compreso tra 170 e 190 mm) con progressivo miglioramento all'aumentare della percentuale di sostituzione dell'aggregato fine naturale con quello di riciclo [25].

Gli studi svolti da Poon e altri [26] hanno valutato la lavorabilità iniziale e la perdita di lavorabilità nel tempo. L'aggregato riciclato è stato sostituito in proporzioni del 20, 50, 100%. Le sostituzioni degli aggregati si sono basate sull'unità di volume e il rapporto acqua/cemento è stato mantenuto costante a 0,57. Benché il contenuto d'acqua sia stato modificato per tener conto della capacità di assorbimento degli aggregati, al fine di mantenere costante il rapporto acqua/cemento, le diverse formulazioni hanno evidenziato una diversa consistenza. Si è riscontrato, nel breve periodo, un abbassamento al cono maggiore per i calcestruzzi con un'alta percentuale di sostituzione a causa dell'aumento di acqua aggiunta rispetto agli aggregati naturali. Questo comportamento evidenzia la dipendenza della consistenza dal contenuto d'acqua

libera nel calcestruzzo iniziale. Con il tempo l'abbassamento al cono diminuisce tanto più velocemente quanto più gli aggregati utilizzati presentano un elevato grado d'assorbimento.

Anche il grado di umidità degli aggregati influisce sulla lavorabilità [27]: aggregati essiccati in forno richiedono un contenuto d'acqua iniziale maggiore pertanto presentano un abbassamento al cono iniziale maggiore, che però diminuisce molto velocemente a causa del maggior grado di assorbimento degli aggregati stessi. Al contrario se gli aggregati sono saturi a superficie asciutta, la sostituzione degli aggregati naturali con riciclati porta solo a piccole modificazioni della consistenza iniziale. Il problema risiede nel tempo (Δt) necessario agli aggregati di riciclo per portarsi dalla condizione di umidità reale (U_r) alla condizione saturi su superficie asciutta (SSA), durante questo periodo è presente nella miscela un quantitativo d'acqua diverso da quello definito dal rapporto a/c (figura 4.7). Molto difficile risulta la stima di questo tempo a causa della eterogeneità che caratterizza gli aggregati di riciclo.

Infine bisogna tener conto della forma degli aggregati: generalmente gli aggregati riciclati, provenienti dalla frantumazione meccanica di macerie, presentano una forma spigolosa ed irregolare, che influenza negativamente la lavorabilità.

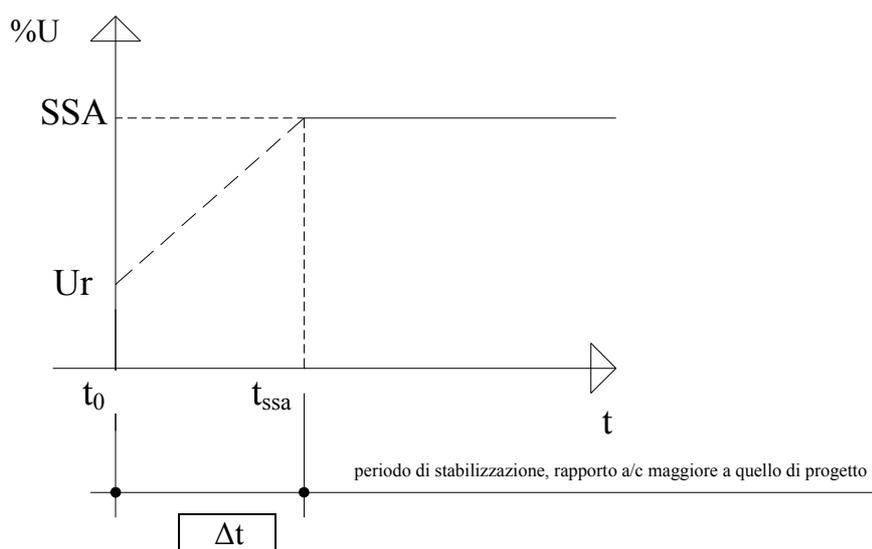


Figura 4.7: Condizioni di umidità dell'aggregato

Prove sperimentali condotte su calcestruzzo con aggregati di riciclo con l'utilizzo di aggregati provenienti da solo calcestruzzo appositamente confezionato e ridotto ad aggregato, dimostrano che l'età del calcestruzzo al momento della frantumazione non influenza la lavorabilità [28].

Trattamenti di lavaggio degli aggregati di riciclo [29] dimostrano che l'utilizzo di aggregati di riciclo non lavati aumenta l'abbassamento al cono iniziale, come se si facessero aggiunte (ceneri volanti, fumi di silice) ma si ha calo di resistenza.

Trattamenti di saturazione degli aggregati di riciclo migliorano notevolmente la lavorabilità del calcestruzzo [30], in conseguenza ad una maggiore disponibilità di acqua, non assorbita dagli aggregati.

Trattamenti sugli aggregati di riciclo con fumi di silice migliorano la lavorabilità del corrispondente calcestruzzo con aggregati di riciclo, probabilmente perché la loro presenza sulla superficie dell'aggregato impedisce che esso assorba acqua, lasciandone di più all'impasto [22].

4.2.2 Contenuto d'aria

Non sono molti i dati presenti in letteratura riguardo al contenuto d'aria dei calcestruzzi confezionati con aggregati di riciclo. Alcuni autori riportano valori del contenuto d'aria pari a circa il 4÷5,5% più elevato rispetto ad un calcestruzzo confezionato con aggregati comuni e questo per la maggiore porosità degli aggregati di riciclo [14, 31, 32].

4.3 PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO INDURITO

4.3.1 Massa volumica

Normalmente il calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo, sia allo stato fresco che indurito, ha un peso specifico inferiore all'intervallo di valori 2300 e 2450 kg/m³, tipico di un calcestruzzo con aggregati naturali. Lo scostamento cresce con la percentuale di aggregati naturali sostituiti con aggregati di riciclo: la diminuzione di

massa volumica è in relazione al più basso peso specifico degli aggregati di riciclo rispetto agli aggregati naturali.

Questa differenza dipenderà anche dalla composizione degli aggregati di riciclo utilizzati per confezionare il calcestruzzo: se si utilizzano aggregati di riciclo *tout venant* si avrà un calcestruzzo meno denso rispetto alla scelta di aggregati di riciclo provenienti da solo calcestruzzo.

4.3.2 Resistenza a sforzo normale di compressione

Generalmente il calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo ha resistenza a sforzo normale di compressione inferiore rispetto al calcestruzzo confezionato con aggregati naturali.

La composizione dell'aggregato di riciclo, nonché la quantità utilizzata, sono molto importanti per lo sviluppo di resistenza del corrispondente calcestruzzo [33]: se si utilizzano aggregati riciclati *tout venant* si avrà un calcestruzzo meno resistente rispetto alla scelta di aggregati di riciclo di solo calcestruzzo.

La risposta varia a seconda della frazione granulometrica che si sostituisce nel calcestruzzo: la resistenza a sforzo normale di compressione diminuisce utilizzando la frazione fine di aggregato di riciclo; la sola sostituzione di sabbia di riciclo proveniente da *tout venant* comporta cali del 20% [34].

È emerso che a bassi rapporti *a/c*, il calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo, provenienti dalla frantumazione di solo calcestruzzo, sviluppa una resistenza meccanica migliore, maggiore è la classe del calcestruzzo di origine; ad alti rapporti *a/c* la resistenza del vecchio aggregato non influisce su quella del calcestruzzo con aggregati di riciclo che da esso deriva [35].

Pertanto, la scelta progettuale del rapporto *a/c* può determinare il meccanismo di rottura del calcestruzzo, per rapporti *a/c* alti (> circa di 0,6) il lato debole è la pasta cementizia per cui la resistenza a sforzo normale di compressione è pressoché la stessa indipendentemente dal tipo di aggregato usato; per rapporti *a/c* bassi (< circa di 0,4) la pasta cementizia è più resistente, pertanto la resistenza a compressione dipende significativamente dal tipo di aggregato usato (figura 4.8).

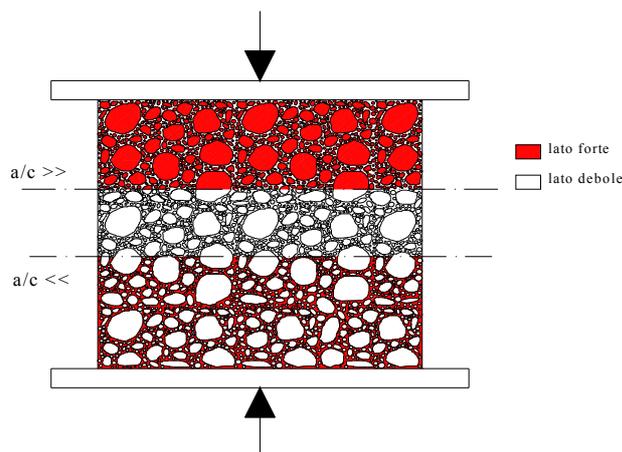


Figura 4.8: Possibile criterio di resistenza del calcestruzzo [23]

Aggregati di riciclo provenienti dalla frantumazione di calcestruzzi di scarsa qualità, se meno resistenti rispetto alla pasta cementizia, diminuiscono la resistenza a compressione del calcestruzzo riciclato rispetto a quello naturale.

Aggregati di riciclo provenienti da calcestruzzo di buona qualità (macerie di solo calcestruzzo, a/c più bassi del calcestruzzo di riferimento, resistenza a compressione uguale o maggiore del calcestruzzo di riferimento) portano ad un calcestruzzo con valori di resistenza anche maggiori di quello di riferimento con aggregati naturali.

La maggior capacità resistente del calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati provenienti dalla frantumazione di calcestruzzi HPC (High Performance Concrete) rispetto ad un calcestruzzo di riferimento confezionato con aggregati naturali, può essere attribuita allo sviluppo di un miglior legame all'interfaccia tra matrice cementizia e aggregato.

È possibile migliorare la resistenza a sforzo normale di compressione del calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo aggiungendo ceneri volanti [36], trattando gli aggregati con fumi di silice [22], attraverso il lavaggio normale [29] o ad ultrasuoni [17] degli aggregati (la pulizia dell'aggregato di riciclo dalla polvere che lo ricopre migliora il legame tra la matrice cementizia e l'aggregato).

L'utilizzo dell'intera frazione fine di riciclo se da un lato risulta svantaggioso per lo sviluppo di resistenza del calcestruzzo dall'altro, se la frazione fine viene opportunamente tagliata, può rappresentare una riserva di resistenza per la presenza di cemento (idratato e non) che contribuisce ad aumentare il quantitativo di cemento complessivamente presente nella miscela [37].

Pertanto, si può concludere che i fattori che influenzano maggiormente la resistenza a compressione del calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo sono il rapporto a/c , la presenza o meno della frazione fine di riciclo, la qualità del calcestruzzo di origine, la percentuale di sostituzione degli aggregati naturali con quelli di riciclo.

4.3.3 Resistenza a sforzo normale di trazione

La tendenza generale che si registra vede il calcestruzzo con aggregati riciclati meno resistente rispetto al calcestruzzo con aggregati naturali.

Per i calcestruzzi realizzati con aggregati provenienti da solo calcestruzzo la resistenza a trazione non subisce significativi cali con l'aumento della percentuale di aggregato riciclato [14, 24, 27, 28], segno che esiste un buon legame tra la matrice cementizia e l'aggregato riciclato. Per i calcestruzzi confezionati con aggregati provenienti da macerie si riscontra, invece, una diminuzione della resistenza a trazione con l'aumento della percentuale di aggregati riciclati, correlata alla presenza di elementi di laterizio e impurità che presentano un legame con la pasta cementizia più debole.

Nel caso di riciclaggio di aggregati di riciclo provenienti da strutture in calcestruzzo è emerso che a bassi rapporti a/c la resistenza del calcestruzzo di origine influenza la resistenza (prova a flessione) della miscela (il calcestruzzo con aggregati di riciclo provenienti da calcestruzzo ad alte prestazioni può arrivare a superare la resistenza a trazione del calcestruzzo con aggregati naturali [14]); ad alti rapporti a/c la resistenza cala notevolmente e la resistenza del vecchio calcestruzzo non influisce sul risultato finale. Il lavaggio degli aggregati e una minore percentuale di malta aderente all'aggregati sono accorgimenti che contribuiscono allo sviluppo di resistenza a trazione del calcestruzzo.

4.3.4 Modulo elastico

Il modulo elastico del calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo risulta generalmente inferiore di quello del calcestruzzo tradizionale, può subire riduzioni

comprese tra il 10÷30% fino a raggiungere il 40% nel caso venga utilizzata anche la frazione fine di riciclo sempre derivante dalla frantumazione di cls demolito.

Confrontando i diagrammi tensioni -deformazioni (figura 4.9) di un calcestruzzo con aggregati di riciclo e di un calcestruzzo con aggregati naturali si osserva che il calcestruzzo con aggregati di riciclo è più deformabile, il picco della curva σ - ϵ si sposta verso destra [38] con scostamenti, rispetto al diagramma σ - ϵ del calcestruzzo con aggregati naturali, crescenti man mano si incrementa la quantità di aggregato di riciclo utilizzata.

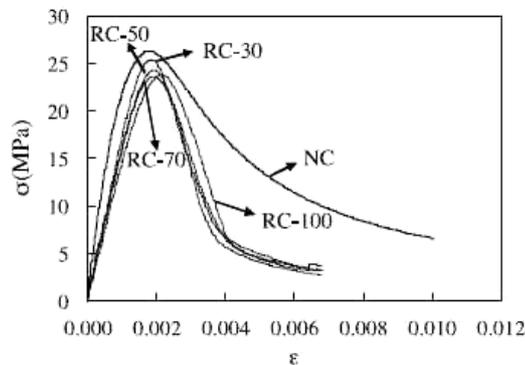


Figura 4.9: Tipiche curve tensione-deformazione del calcestruzzo con aggregati di riciclo [38].

Di seguito analizziamo un'equazione proposta per la determinazione del modulo elastico partendo dalla conoscenza della resistenza caratteristica cilindrica del calcestruzzo [39].

$$E_{cm} = 9100 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} \cdot \alpha^2 \cdot \beta$$

con:

$\alpha = \frac{\rho}{2400}$ coefficiente che tiene conto della densità del calcestruzzo fresco;

$\beta = \left(1 - \frac{A}{500}\right)$ con $A = \%$ di laterizio presente negli aggregati riciclati.

Come si può osservare il modulo elastico degli aggregati riciclati, secondo questa formulazione, è direttamente proporzionale alla densità del calcestruzzo fresco e indirettamente proporzionale alla presenza di laterizio, risulta essere inoltre più piccolo rispetto a quello dei calcestruzzi con aggregati naturali, notiamo infatti che l'espressione del modulo elastico per i calcestruzzi con aggregati riciclati differisce da quella dei calcestruzzi con aggregati naturali per la presenza dei coefficienti α e β che sono minori di 1.

4.3.5 Attacchi chimici del calcestruzzo con aggregati riciclati

In generale, si registra un comportamento agli attacchi chimici (carbonatazione, attacco solfatico, attacco dei cloruri, ecc) del calcestruzzo con aggregati di riciclo peggiore rispetto al calcestruzzo confezionato con aggregati naturali.

L'aumento della percentuale di aggregati di riciclo in sostituzione agli aggregati naturali provoca un deciso aumento della vulnerabilità del conglomerato a causa della maggiore porosità e permeabilità degli aggregati di riciclo.

L'impiego della frazione fine in malte con aggregati di riciclo, nonché la presenza di polveri, comportano un apprezzabile peggioramento dell'espansione solfatica.

L'indagine al microscopio ottico a scansione evidenzia che la permanenza in soluzione solfatica della miscela induce una maggiore quantità di prodotti aghiformi (thaumasite) e gesso, espansivi e quindi di maggior deterioramento per il conglomerato rispetto all'uso di aggregati naturali [40].

4.3.6 Prove di gelo-disgelo sul calcestruzzo con aggregati riciclati

Il comportamento del calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo sottoposto a cicli di gelo – disgelo è meno performante rispetto a quello del calcestruzzo confezionato con aggregati naturali.

Una crescente percentuale di aggregati di riciclo in sostituzione a quelli naturali porta ad un più veloce degrado del calcestruzzo sottoposto a cicli gelo-disgelo.

I fattori che rendono le miscele di riciclo suscettibili agli effetti del gelo sono:

- la maggior permeabilità e porosità;
- la presenza della vecchia malta cementizia negli aggregati di riciclo;
- la presenza di particelle non perfettamente solidali [30].

Zaharieva et al. (2004) hanno studiato la resistenza al gelo di una miscela confezionata con aggregato grosso di riciclo e fine naturale e di miscele confezionate con solo aggregati di riciclo (pre-saturati e non). In tutti e tre i casi la resistenza al gelo, valutata determinando la resistenza a compressione dei provini dopo 300 cicli gelo-disgelo, non si è dimostrata soddisfacente e per questo viene sconsigliato l'uso di calcestruzzi confezionati con aggregati di riciclo in climi severi [30]. Altri autori hanno osservato che la resistenza al gelo risulta paragonabile a quella dei calcestruzzi convenzionali, se vengono utilizzati i soli aggregati grossi di riciclo [37].

4.3.7 Permeabilità e porosità

La durabilità del calcestruzzo dipende essenzialmente dalla sua porosità e permeabilità, in quanto a queste proprietà è legata la possibilità da parte degli agenti aggressivi (acqua, ioni salini, gas, etc.) di penetrare nel materiale e quindi di deteriorarlo (figura 4.10).

Olorunsogo & Padayachee (2001) hanno studiato l'andamento della permeabilità, attraverso l'indice OPI (*oxygen permeability index*) che decresce con il decrescere della



Figura 4.10: Interazione materiale – ambiente: microstruttura del calcestruzzo

qualità del calcestruzzo saggiato, in tre miscele per diversi quantitativi dell'aggregato grosso di riciclo (0%, 50% e 100%) e per diversi tempi di stagionatura dei campioni (dischi di calcestruzzo ottenuti da cubetti opportunamente tagliati). Gli autori hanno osservato che all'aumentare del quantitativo di aggregato di riciclo si ha un aumento di permeabilità e che nel tempo si ha un leggero miglioramento delle prestazioni di permeabilità delle miscele confezionate con aggregato di riciclo.

L'aumento di permeabilità viene spiegato considerando che il processo di frantumazione tende a creare fratture nella malta cementizia, generalmente più debole rispetto all'aggregato comune [41].

Altri autori legano la permeabilità al rapporto a/c della miscela e riportano che per alti rapporti a/c, non si riscontrano differenze significative, mentre per bassi rapporti a/c la permeabilità può essere anche tre volte più alta rispetto ad un calcestruzzo convenzionale.

Si registra una maggiore porosità nelle miscele di riciclo rispetto a quelle naturali, con progressivo aumento all'aumentare della percentuale di aggregato di riciclo (figura 4.11) [42]. Ciò è dovuto alla presenza della vecchia malta cementizia la cui porosità fa aumentare il volume totale dei pori della miscela.

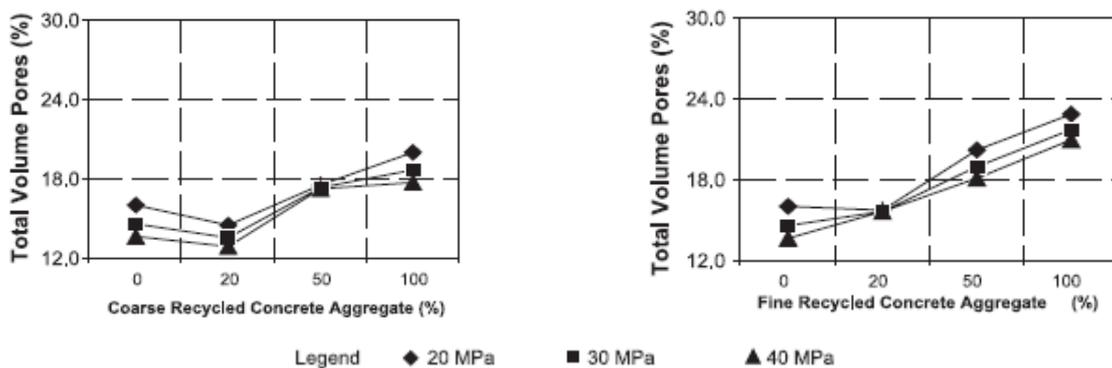


Figura 4.11: Andamento della porosità in base alla % di aggregato di riciclo e alla resistenza meccanica della miscela [42]

4.3.8 Comportamento al fuoco

I dati su prove effettuate sul calcestruzzo con aggregati di riciclo per verificarne la resistenza alle alte temperature non sono numerosi. È stato osservato che l'eventuale presenza di laterizi dà ottime prestazioni al corrispondente conglomerato, che, per elevati tenori di laterizio entro gli aggregati di riciclo, può arrivare a resistenze alle alte temperature anche migliori rispetto al calcestruzzo con aggregati naturali [43].

4.3.9 Rigonfiamento, ritiro idrometrico e deformazioni viscosi

Il calcestruzzo con aggregati di riciclo è caratterizzato da un aumento del ritiro anche del 35-45% rispetto ad un calcestruzzo confezionato con aggregati naturali [44] [45]. Si segnala invece una tendenza opposta per quanto riguarda lo scorrimento viscoso del calcestruzzo sottoposto a un carico costante (creep): per provini con parziale o totale presenza di aggregati riciclati lo scorrimento viscoso dopo un anno è del 20% minore di quello del calcestruzzo ordinario. Pertanto l'azione congiunta del ritiro idrometrico e dello scorrimento viscoso sembrerebbe portare a valori complessivi di deformazione di poco superiori a quelli del calcestruzzo ordinario.

4.3.10 Zona di transizione: interfaccia pasta-aggregato

La zona di transizione, molto importante per le proprietà meccaniche di un calcestruzzo, assume ancora più importanza per il calcestruzzo con aggregati di riciclo, perché in esso è possibile distinguere due zone di transizione: quella vecchia (calcestruzzo di origine) e quella nuova (calcestruzzo nuovo). Pertanto, a livello microstrutturale, la principale differenza tra le miscele di riciclo e quelle naturali è la presenza di un'ulteriore zona di transizione (*interfacial transition zone-ITZ*).

L'ITZ è una zona di transizione tra l'aggregato e la pasta cementizia, generalmente spessa tra i 10 e i 50 μm (figura 4.12), la cui morfologia, composizione, densità differiscono da quelle della pasta cementizia mano a mano che ci si avvicina alla superficie dell'aggregato; è caratterizzata da un minor contenuto di grani di cemento e

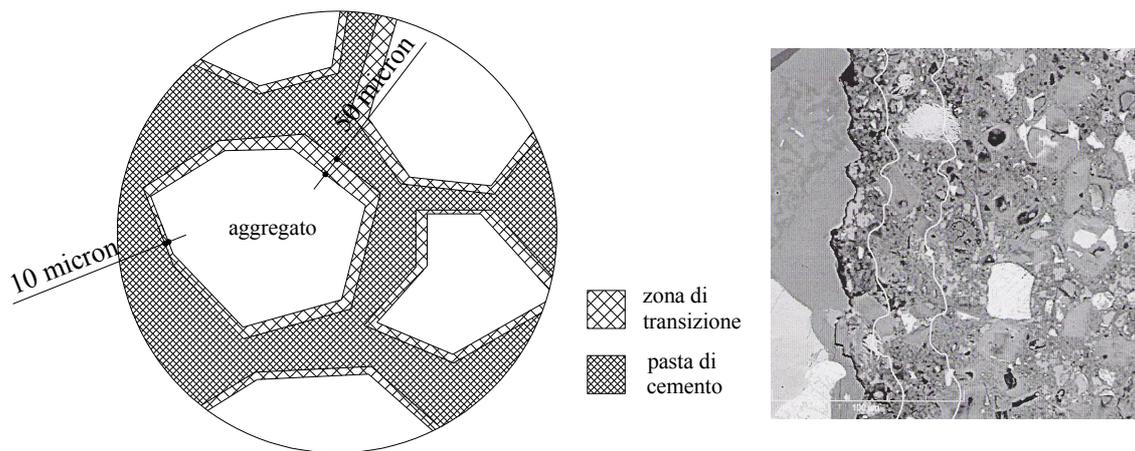


Figura 4.12: Immagine al microscopio dell'interfaccia: l'aggregato è sulla sinistra, le due linee bianche indicano la distanza di 20 e 50 μm dall'aggregato [46]

da una maggiore porosità rispetto alla pasta cementizia. Sebbene sia presente in volume minore rispetto alle altre due fasi, influenza notevolmente le proprietà meccaniche e di durabilità del calcestruzzo.

Un primo fattore responsabile della formazione di tale zona d'interfaccia è "l'effetto muro". Gli aggregati, di dimensioni molto maggiori dei grani di cemento (1-100 μm), ostacolano la normale distribuzione delle particelle di cemento lungo la superficie dell'aggregato [47, 48, 49]. Pertanto in queste zone ci sono meno grani di cemento e di dimensioni più piccole rispetto alla restante matrice cementizia con conseguente accelerazione della velocità di idratazione.

Durante la stagionatura gli aggregati essudano acqua cosicché il rapporto acqua/cemento locale, intorno agli aggregati, aumenta. Aumentano così i vuoti che vengono in parte riempiti dai prodotti di idratazione. Pertanto anche l'essudazione di acqua da parte degli aggregati, in particolare quelli più grossi, è causa di un innalzamento del rapporto a/c [50].

Durante l'idratazione si formano principalmente silicato di calcio idrato, CSH, e idrossido di calcio, CH. A causa del più elevato rapporto a/c locale per la minore presenza di particelle di cemento, i prodotti cristallini in prossimità degli aggregati nella zona interfase sono più grandi rispetto ai prodotti cristallini nella pasta cementizia, e lasciano maggiori vuoti, perché la costipazione è minore [50]. Il CSH si deposita sui

grani di cemento, mentre il CH nei pori poiché la concentrazione di calcio nella soluzione è molto alta. La zona intorno agli aggregati ha meno grani di cemento per cui dovrebbe presentare meno prodotti di idratazione.

Ma gli ioni di calcio, che sono caratterizzati da una certa mobilità, si diffondono dalla matrice cementizia all'ITZ più porosa, dove si forma idrossido di calcio che precipita sulla superficie dell'aggregato stesso [51, 52]. La presenza di CH sulla superficie degli aggregati non è uno strato uniforme, ma si accumula laddove la porosità è localmente più elevata. Al contrario i silicati sono molto meno mobili, pertanto il silicato di calcio tende a formarsi vicino ai grani di cemento [46].

Si può dire che la zona di transizione all'interfaccia comprende due strati: un sottile e discontinuo film sulla superficie dell'aggregato di pochi μm di spessore, costituito da cristalli di CH e gel di CSH, e una zona di transizione porosa alcune decine di micron di spessore, che contiene altri cristalli di CH e prodotti di idratazione (CSH ed ettringite) intorno ai grani idratati [50].

Il fenomeno di deposito di prodotti di idratazione dalla pasta cementizia all'interfaccia durante l'idratazione ne riduce la porosità col passare del tempo.

A causa dell'elevata porosità l'ITZ è considerata una zona che facilita la diffusione di ioni e liquidi nel calcestruzzo, con effetto negativo sulla durabilità. Alcuni studi hanno evidenziato che l'assorbimento di CO e CO₂ è maggiore negli strati più vicini all'aggregato. In teoria la pasta di cemento più lontana dall'aggregato dovrebbe essere esposta a un più alto grado di carbonatazione perché più soggetta agli agenti provenienti dall'esterno, e l'assorbimento di CO e CO₂ dovrebbe diminuire negli strati più interni. Invece i risultati sperimentali mostrano l'opposto: sembra che l'assorbimento di CO e CO₂ segua vie preferenziali lungo le fessure giungendo a interessare le zone porose più vicine all'aggregato [53].

La densità della ITZ diminuisce in prossimità dell'aggregato per poi aumentare fino ad avere andamento costante nella zona centrale tra due aggregati[54]. La larghezza della regione in cui la densità varia definisce convenzionalmente lo spessore della ITZ.

I fattori che maggiormente influenzano le caratteristiche dell'ITZ sono le proprietà degli aggregati e il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo.

Riducendo la dimensione degli aggregati, si ha una diminuzione della porosità e un aumento dei prodotti di idratazione nell'ITZ [47]. Questo accade poiché un aggregato di grosse dimensioni essuda più acqua intorno a sé e aumenta così il rapporto a/c locale; si avranno col tempo meno grani di cemento, meno prodotti di idratazione e più vuoti.

Un altro fattore che influenza la qualità del legame è la morfologia della superficie dell'aggregato: una superficie liscia e arrotondata degli aggregati peggiora l'adesione tra aggregati e pasta.

Un basso rapporto a/c migliora la microstruttura dell'interfaccia poiché ne diminuisce la porosità e la rende più sottile [55, 56]. Tale influenza è maggiore per gli aggregati più piccoli: gli studi effettuati da Elsharief [57] hanno mostrato che ridurre il rapporto a/c da 0,55 a 0,40, per aggregati di dimensioni 150-300 μm , riduce lo spessore dell'ITZ del 75%. Con a/c pari a 0,4 la zona più porosa rispetto alla matrice cementizia si estende solo per 10 μm dall'aggregato, mentre con a/c pari a 0,55 le porosità permangono fino a 35 μm . Tuttavia nella zona 0-10 μm la porosità rimane comunque alta. Mentre per aggregati di 2-5 mm l'influenza della riduzione d'acqua è minore e la porosità rimane comunque maggiore di quella della matrice cementizia fino a 35 μm .

Le proprietà dell'interfaccia influenzano lo sviluppo delle fessure e dei meccanismi di danneggiamento del calcestruzzo. Grandi differenze tra il modulo di elasticità e il ritiro della pasta cementizia e dell'aggregato inducono tensioni tangenziali e di taglio all'interfaccia tra le due fasi, che favoriscono l'insorgere di fessure [55, 56].

L'interfaccia ha un ruolo significativo nel determinare la resistenza a trazione, mentre influenza solo in minima parte la resistenza a compressione [55, 56].

La presenza della nuova zona di interfaccia influenza, come del resto la presenza della vecchia malta cementizia aderente all'aggregato naturale originario, le proprietà del calcestruzzo di riciclo e ha un ruolo fondamentale per la resistenza meccanica.

Le caratteristiche della zona di transizione, tra aggregato e pasta di cemento, cambiano se vengono utilizzati aggregati di riciclo provenienti da calcestruzzo di resistenza normale (NC) o calcestruzzo ad alte prestazioni (HPC) [58].

L'interfaccia tra aggregato naturale e matrice cementizia appare poco compatta, sono presenti pori di grandi dimensioni (10-20 μm) e anche molti micropori (5 μm) e prodotti di idratazione, in particolare CH sulla superficie dell'aggregato.

La microstruttura dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregati riciclati NC è simile a quella osservata nel calcestruzzo di riferimento, è molto porosa e presenta prodotti di idratazione poco compatti in prossimità dell'aggregato.

L'ITZ del calcestruzzo confezionato con aggregati riciclati, provenienti dalla frantumazione di calcestruzzo HPC, presenta rispetto al calcestruzzo naturale, strati più densi di prodotti di idratazione e una minor porosità.

Anche se sono presenti alcuni pori di 10 μm , il volume totale dei pori è inferiore a quello di entrambi i casi precedenti (figure 4.13, 4.14, 4.15).

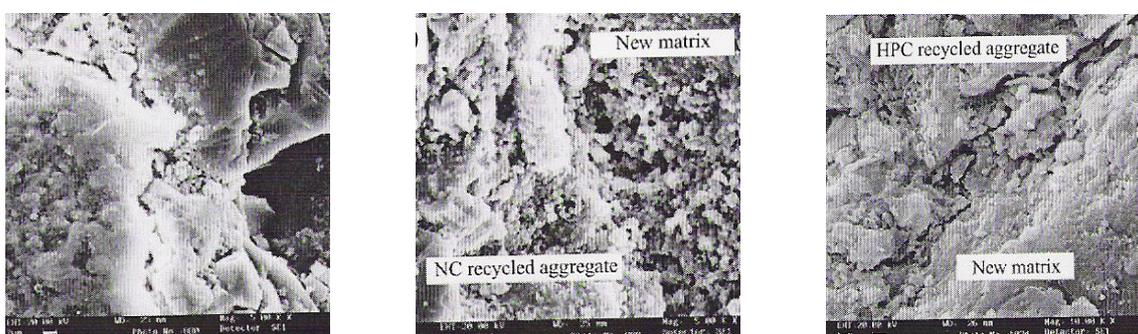
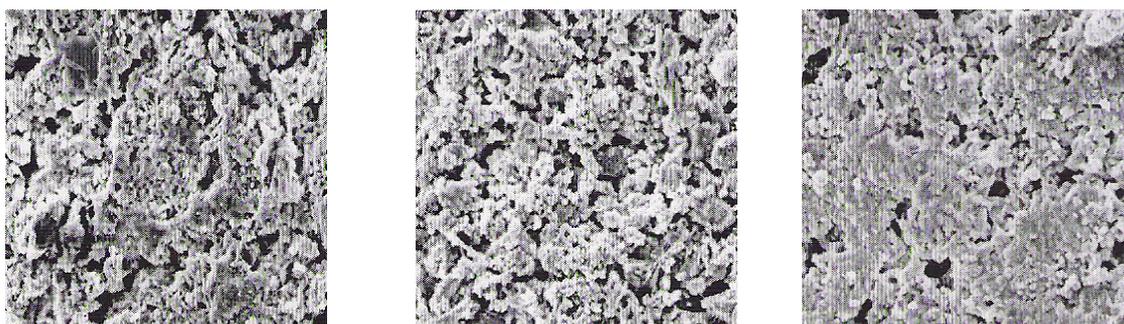


Figura 4.13: Microstruttura del calcestruzzo con aggregati naturali 5000x (a sin la pasta di cemento a destra l'aggregato); Microstruttura del calcestruzzo con aggregati riciclati NC; Microstruttura del calcestruzzo con aggregati riciclati HPC [58]



**Figura 4.14: Morfologia dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregato naturale sin 1000x
Morfologia dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregato riciclato NC sin 1000x
Morfologia dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregato riciclato HPC sin 1000x [58]**

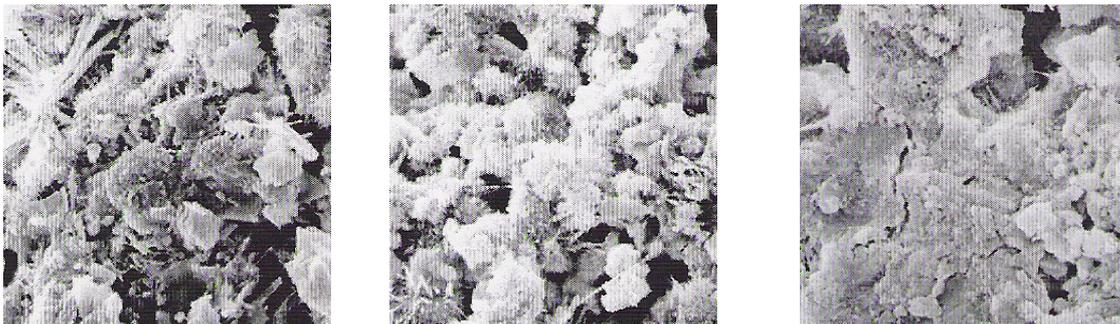


Figura 4.15: Morfologia dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregato naturale sin 5000x
Morfologia dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregato riciclato NC sin 5000x
Morfologia dell'interfaccia tra pasta cementizia e aggregato riciclato HPC sin 5000x [58]

Nelle zone in cui l'aggregato di riciclo non è ricoperto da pasta cementizia si sviluppa una zona di transizione simile a quella che si forma nel caso dell'aggregato naturale. L'elevata capacità di assorbimento d'acqua e la porosità che caratterizza gli aggregati di riciclo fa sì che la nuova zona di transizione non sia sempre efficace, ovvero caratterizzata dalla perfetta aderenza tra la nuova pasta cementizia e l'aggregato di riciclo. Riportano inoltre che per ottenere una migliore zona di transizione è necessario premiscelare gli aggregati con il quantitativo d'acqua necessario a renderli umidi all'80% della loro capacità in modo tale da consentire al cemento di aderire bene agli aggregati e creare così un'effettiva zona di transizione [59].

4.4 PRECEDENTI ESPERIENZE

Il presente lavoro si inserisce all'interno di uno studio in corso presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna [4, 34, 60], riguardante indagini teoriche e sperimentali sul calcestruzzo strutturale con aggregati di riciclo. Lo scopo della sperimentazione è quello di valutare le caratteristiche del calcestruzzo ottenibile da aggregati provenienti da demolizioni in funzione della qualità e della quantità degli stessi, con l'obiettivo di ottenere calcestruzzi che possano essere utilizzati in impieghi strutturali. Il comportamento meccanico del calcestruzzo è stato saggiato valutando anche l'aderenza acciaio - calcestruzzo ed eseguendo prove su elementi strutturali tipo trave (figura 4.16).

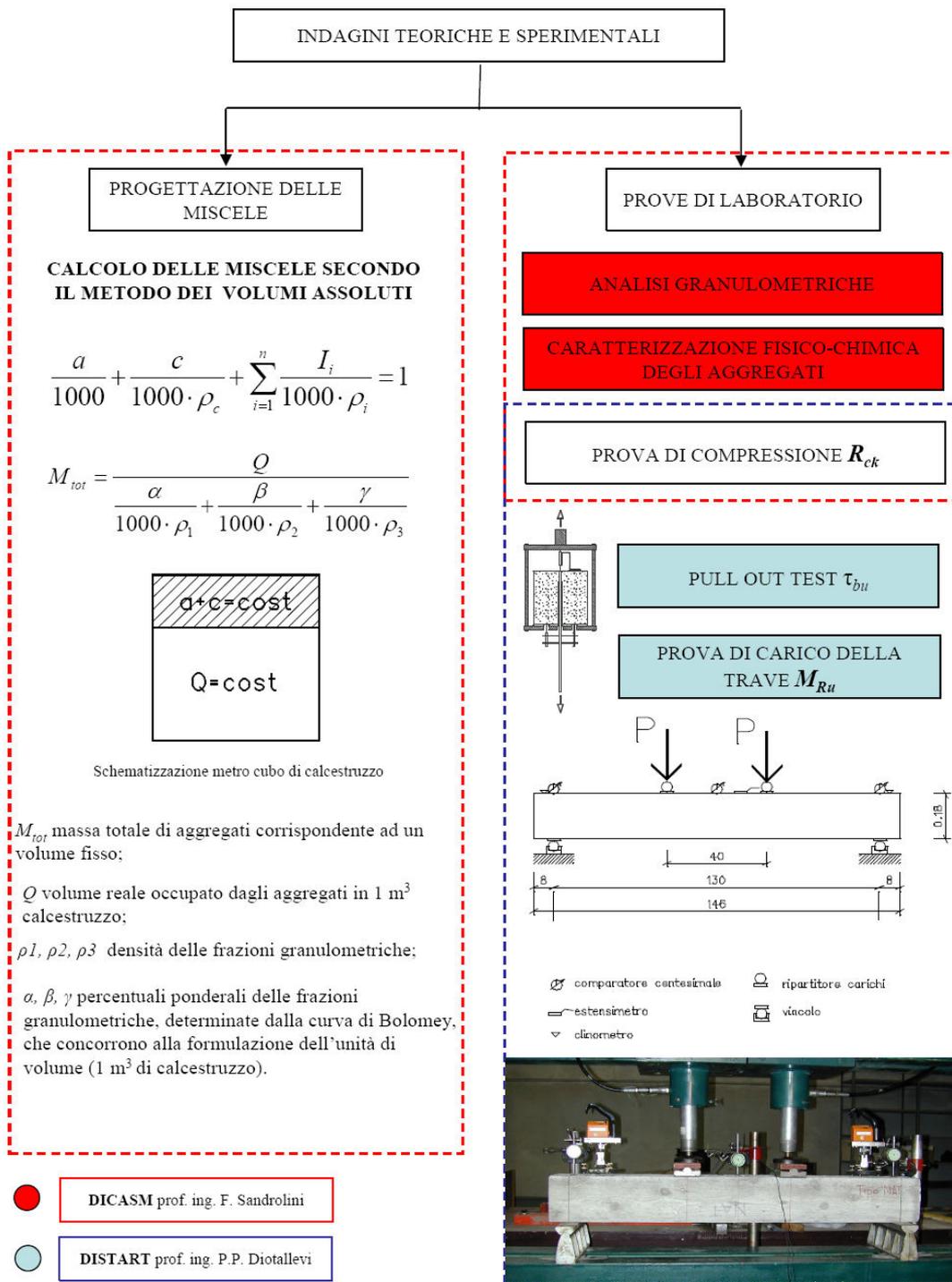


Figura 4.16: Impianto metodologico delle sperimentazioni effettuate presso i dipartimenti del DICASM e DISTART sui calcestruzzi con aggregati di riciclo



Figura 4.17: Aggregati tout-venant da demolizione ordinaria

Gli studi effettuati hanno avuto lo scopo di studiare l'effetto di diversi tipi di aggregati da costruzione e demolizione nel calcestruzzo. In una prima fase si sono studiati aggregati *tout-venant* selezionati da demolizione ordinaria, in una seconda fase aggregati qualificati da demolizione di traversine ferroviarie (figura 4.17). In entrambi i casi il confronto è stato effettuato con calcestruzzi preparati con aggregati qualificati naturali tradizionali.

4.4.1 Formulazioni dei calcestruzzi realizzati

Per la confezione dei calcestruzzi si è fatto riferimento all'impianto fisso di riciclaggio R.O.S.E. di Villa Musone (AN), che fornisce materiale in tre diverse granulometrie: 0/8 mm (sabbia), 7/15 mm (pietrischetto), 15/30 mm (pietrisco). L'effetto degli aggregati è stato studiato suddividendoli in diverse frazioni corrispondenti alla formulazione del calcestruzzo tradizionale con aggregati naturali di normale produzione, allo scopo di separare gli effetti delle diverse frazioni granulometriche di aggregato riciclato sulle proprietà finali. Pertanto, a partire dalla formulazione del calcestruzzo tradizionale di riferimento con soli aggregati naturali sono state progettate le altre miscele, sostituendo una per volta le diverse frazioni granulometriche naturali con le corrispondenti riciclate. La sostituzione degli aggregati è avvenuta facendo riferimento alla curva teorica di Bolomey, valutando il miglior assortimento fra le frazioni granulometriche che di volta

in volta concorrevano alla composizione del calcestruzzo, avendo come riferimento l'unità di volume di calcestruzzo prodotto.

Il parametro assunto come elemento di controllo del calcestruzzo fresco è stato la lavorabilità; per rendere le miscele tra loro paragonabili dal punto di vista della lavorabilità è stato aggiunto lo stesso additivo superfluidificante in quantità diverse.

Le quantità di cemento e di acqua sono state tenute fisse: 350 kg/m³ di cemento IIA/L 42,5 R e 210 l/m³ di acqua totale (corretta secondo s.s.a.), per un rapporto acqua/cemento pari a 0,6. L'esecuzione di tutti gli impasti è avvenuta in betoniera da 300 l, le condizioni di getto sono state identiche e la stagionatura è avvenuta nelle medesime casseforme.

Nella prima fase della sperimentazione si sono effettuate cinque formulazioni con aggregati riciclati *tout-venant*, definiti non qualificati (*nq*):

- ▶ TIPO NAT: calcestruzzo ordinario di riferimento confezionato con soli aggregati naturali.
- ▶ TIPO 1: calcestruzzo di riferimento con soli aggregati riciclati *nq*.
- ▶ TIPO 2: calcestruzzo confezionato con sabbia riciclata *nq*, pietrischetto e pietrisco naturali.
- ▶ TIPO 3: calcestruzzo confezionato con sabbia e pietrisco naturali, pietrischetto riciclato *nq*.
- ▶ TIPO 4: calcestruzzo confezionato con sabbia e pietrischetto naturali, pietrisco riciclato *nq*.

Nella seconda fase della sperimentazione si sono effettuate tre formulazioni con aggregati riciclati provenienti dalla frantumazione di traversine ferroviarie, definiti qualificati (*q*):

- ▶ TIPO Ar: calcestruzzo confezionato con sabbia riciclata *q*, pietrischetto e pietrisco naturali.
- ▶ TIPO Br: calcestruzzo confezionato con sabbia e pietrisco naturali, pietrischetto riciclato *q*.
- ▶ TIPO Cr: calcestruzzo confezionato con sabbia e pietrischetto naturali, pietrisco riciclato *q*.

La figura 4.18 mostra la densità del calcestruzzo per le diverse formulazioni.

Miscela	Nat	1	2	3	4	Ar	Br	Cr
Kg/m ³	2354	2079	2179	2260	2259	2264	2294	2277

Figura 4.18: Resa del calcestruzzo

4.4.2 Modalità di prova e risultati

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo confezionato con aggregati naturali e/o riciclati sono state valutate con modalità di prova identiche nelle due fasi della sperimentazione. Sono state eseguite le seguenti prove:

- resistenza a compressione su cubetti 15x15x15 cm;
- aderenza acciaio - calcestruzzo;
- prove di carico su travi di 18x18x146 cm, armate con 2 ϕ 8 in zona tesa, 2 ϕ 8 in zona compressa e staffe ϕ 8/8'', di acciaio FeB 44K.

In figura 4.19 è indicato il dispositivo di prova per le travi, le caratteristiche geometriche e la disposizione dell'armatura; lo schema di prova è di trave semplicemente appoggiata sottoposta all'azione di due carichi concentrati simmetrici per avere la sola sollecitazione flessionale costante tra i due punti di applicazione dei carichi.

I risultati delle prove di resistenza a compressione sono illustrate in figura 4.20. I calcestruzzi confezionati con aggregati naturali e riciclati non qualificati (tipi 2, 3, 4) presentano valori di resistenza a compressione alquanto inferiori rispetto al calcestruzzo realizzato con inerti naturali, con cadute prestazionali dal 10% al 20%, al diminuire della dimensione media delle frazioni di aggregato sostituite.

La sostituzione di tutte le frazioni granulometriche (tipo 1) ha mostrato le maggiori diminuzioni della resistenza a compressione (30% circa).

I calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati qualificati (tipi Ar, Br, Cr) hanno presentato un comportamento migliore, con una diminuzione della resistenza a compressione dal 5% al 7%, al diminuire della dimensione media delle frazioni di aggregato sostituite.

In entrambi i casi la sostituzione della sola frazione fine naturale con l'equivalente frazione fine riciclata comporta la maggiore diminuzione di resistenza a compressione.

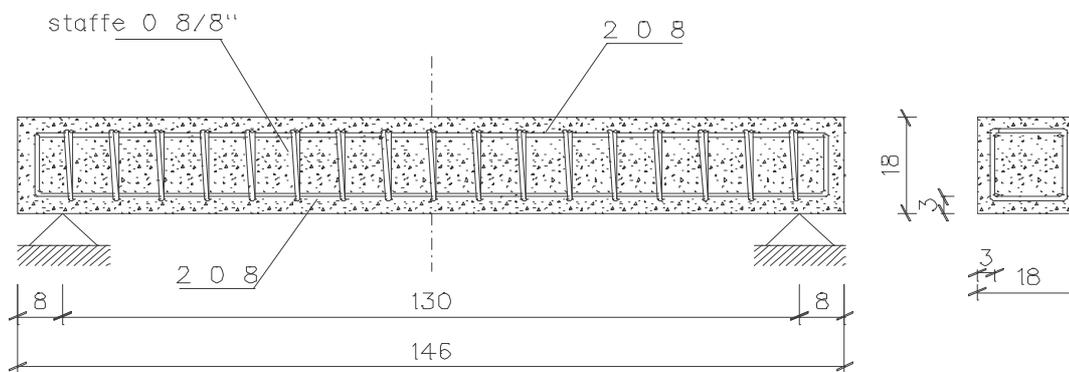


Figura 4.19: Trave di prova: caratteristiche geometriche e disposizione dell'armatura

A ciò è accompagnata una diminuzione della lavorabilità dell'impasto fresco, dovuto alla notevole presenza di pasta cementizia aderente all'aggregato, che determina una maggiore richiesta d'acqua.

I risultati delle prove di pull-out sono mostrati in figura 4.21. I calcestruzzi con aggregati riciclati non qualificati e aggregati naturali (tipi 2, 3, 4) presentano una diminuzione dell'aderenza dal 18% al 43%, al diminuire della frazione di aggregato sostituita.

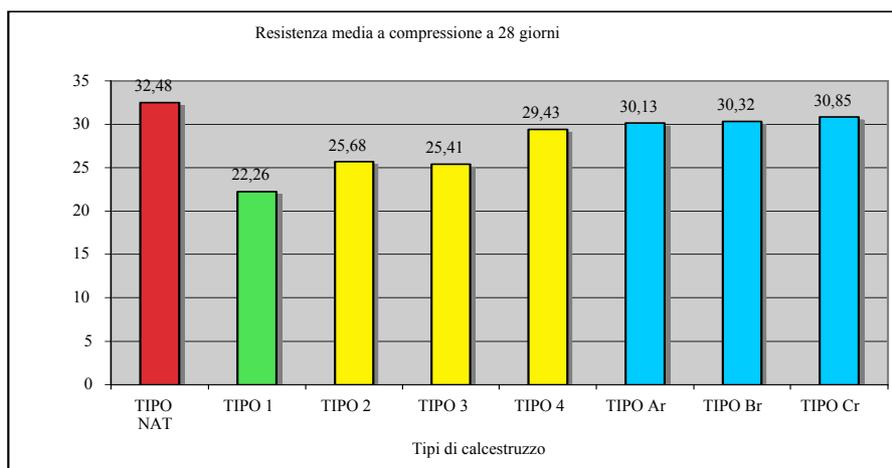


Figura 4.20: Risultati delle prove di compressione

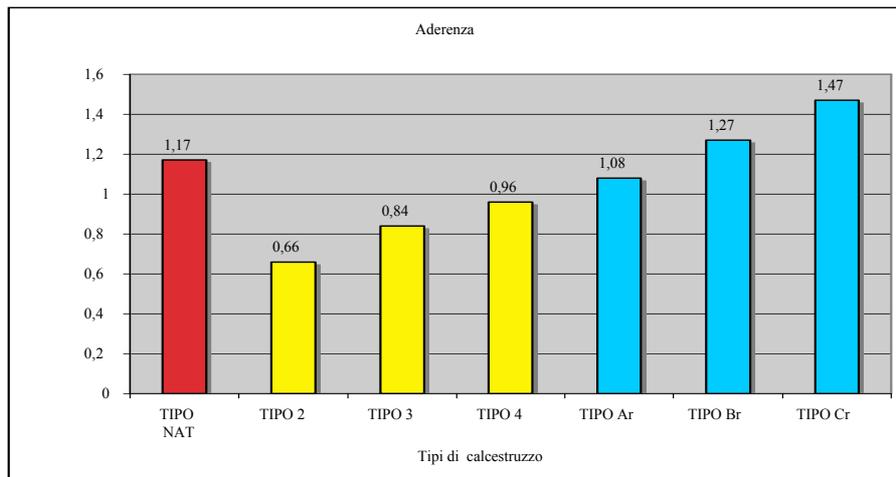


Figura 4.21: Risultati delle prove di pull-out

La sostituzione delle diverse frazioni con aggregati riciclati qualificati (tipi Ar, Br, Cr) porta ad una diminuzione dell'aderenza dell'8% quando si sostituisce la sola sabbia, e ad un aumento dell'aderenza del 1,1% e del 20% rispettivamente per pietrischetto e pietrisco riciclato.

I risultati delle prove sulle travi sono descritte in figura 4.22.

Il carico di rottura dei calcestruzzi riciclati subisce una diminuzione del 24% e del 20%, rispettivamente per sabbia riciclata e per pietrischetto riciclato, indipendentemente dall'impiego di aggregato qualificato o no. Quando si impiega pietrisco riciclato la diminuzione del carico di rottura è del 16% per aggregati riciclati non qualificati e del 12% per aggregati riciclati qualificati.

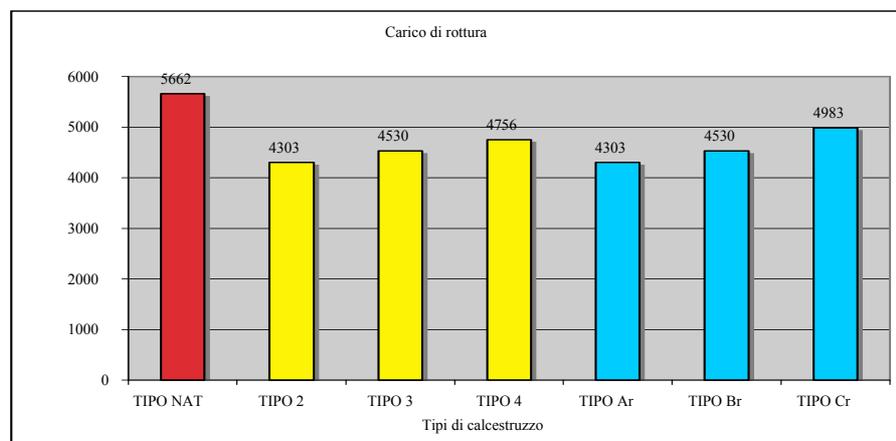


Figura 4.22: Risultati delle prove di flessione

Le prove condotte hanno evidenziato che le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo sono generalmente ridotte dall'aggregato di riciclo in sostituzione dell'aggregato naturale. La riduzione delle prestazioni è minore nei calcestruzzi in cui gli aggregati impiegati derivano dalla frantumazione di solo calcestruzzo, e pertanto in qualche modo qualificati, e in quelli in cui la frazione riciclata è il solo pietrisco.

Le prove a compressione hanno evidenziato che, qualora si utilizzino aggregati qualificati in sostituzione delle frazioni naturali di pietrischetto o pietrisco, la resistenza a compressione si può considerare paragonabile a quella del calcestruzzo naturale di riferimento (- 5/7%).

L'aderenza tra barra e calcestruzzo risulta migliorata dalla presenza di aggregati grossi qualificati di riciclo (+ 1/20%).

Per quanto riguarda le prove condotte su travi, il carico a rottura relativo al calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo diminuisce il diminuire della dimensione media dell'aggregato riciclato utilizzato, indipendentemente che sia qualificato o meno.

Studiando appositamente la formulazione dell'impasto e utilizzando aggregati qualificati, sembra possibile ottenere calcestruzzi con buone caratteristiche meccaniche.

5. CALCESTRUZZO STRUTTURALE IN AMBIENTE SEVERO: IL CASO DEL COMPLESSO DI PUNTA PEROTTI

Ampliare il campo di studio del calcestruzzo strutturale confezionato con aggregati di riciclo qualificati attraverso indagini sui materiali utilizzati nella costruzione per la quale è prevista la demolizione è un'assoluta novità e sarà tema della presente tesi.

La conoscenza approfondita della costruzione oggetto di demolizione, attraverso la caratterizzazione dei materiali utilizzati, rappresenta un aspetto fondamentale per la progettazione di un calcestruzzo strutturale confezionato con aggregati di riciclo: agli usuali e già complessi parametri da considerare durante la progettazione di un calcestruzzo confezionato con aggregati naturali, si aggiunge il forte carattere di eterogeneità che caratterizza gli aggregati di riciclo.

Il controllo di questo problema può essere ottenuto solo con un'accurata conoscenza dei materiali di origine degli aggregati di riciclo che può avvenire con accuratezza solo prima della demolizione, perché a demolizione avvenuta si perde inesorabilmente questa possibilità.

Pertanto, l'identificazione delle caratteristiche meccaniche e di degrado dei materiali costituenti la struttura, e non solo, deve essere raggiunta prima della demolizione, solo in tal modo si potrà essere in possesso dei dati necessari per una corretta valorizzazione degli aggregati provenienti dal trattamento delle macerie attraverso il loro impiego nel calcestruzzo.

Solo a questo punto il trattamento dei prodotti di demolizione attraverso operazioni di frantumazione, allontanamento dei materiali non idonei e vagliatura può utilmente essere effettuata (figura 5.1).

L'incompiuto complesso di Punta Perotti, demolito dopo undici anni dalla costruzione e situato in prossimità della battigia, si presta come un caso di studio particolarmente fecondo per valutare l'interazione calcestruzzo – ambiente marino. L'ambiente locale è stato accertato attraverso l'acquisizione nel tempo dei parametri termo-igrometrici (temperatura (T), umidità relativa (HR), piovosità) e aggressivi (SO_x , NO_x , CO , O_3 , Cl , *venti*).

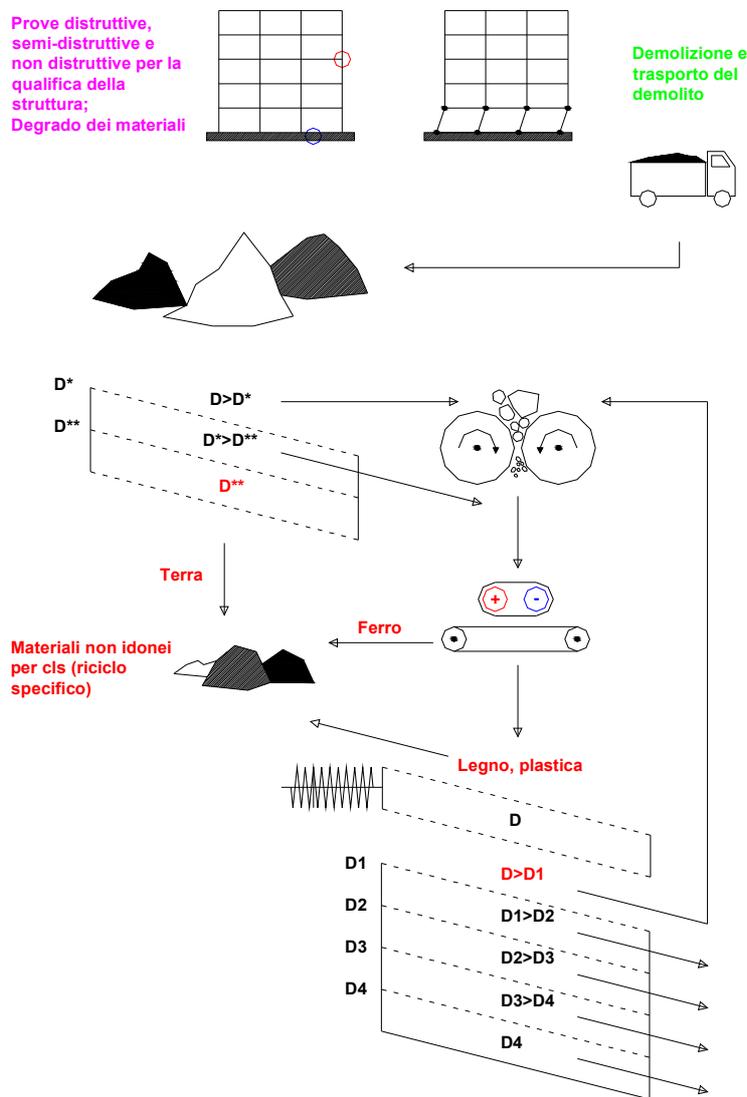


Figura 5.1: Processo di gestione e trattamento dei prodotti di demolizione

Lo stato di degrado delle strutture in conglomerato cementizio armato, in esercizio non protette per l'assenza di ogni tamponatura e degli intonaci, è stato saggiato mediante indagini sperimentali di natura meccanica e chimica sul calcestruzzo.

La caratterizzazione meccanica del materiale è consistita nella determinazione della resistenza caratteristica a compressione monoassiale (R_{ck}), del modulo elastico (E) e del coefficiente di Poisson (ν) di un adeguato numero di carote estratte in elementi

strutturali con punti di prelievo diversamente orientati. Sono state inoltre effettuate prove di carbonatazione e di determinazione del tenore dei sali idrosolubili. Infine sono in corso indagini microstrutturali del materiale attraverso approfondite osservazioni al microscopio elettronico a scansione (*SEM*) e prove di porosità.

5.1 DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO

La durabilità è la proprietà di un materiale di conservare nel tempo un adeguato livello prestazionale per garantire alla struttura il periodo di esercizio stabilito al momento della progettazione. La durabilità è correlata all'**interazione materiale-ambiente** e quindi alle proprietà microstrutturali del materiale ed alla aggressività dell'ambiente.

Il degrado delle strutture in conglomerato cementizio armato è legato anche al processo di corrosione delle armature, che si manifesta, in generale, per il raggiungimento di una, almeno, di due condizioni limite per le strutture esposte in ambiente marino: la carbonatazione del calcestruzzo e l'attacco di cloruri (figura 5.2).

La velocità di carbonatazione, cioè la velocità con la quale avanza il fronte di carbonatazione nel calcestruzzo, dipende essenzialmente dalla porosità del calcestruzzo e dal livello di umidità relativa dell'ambiente.

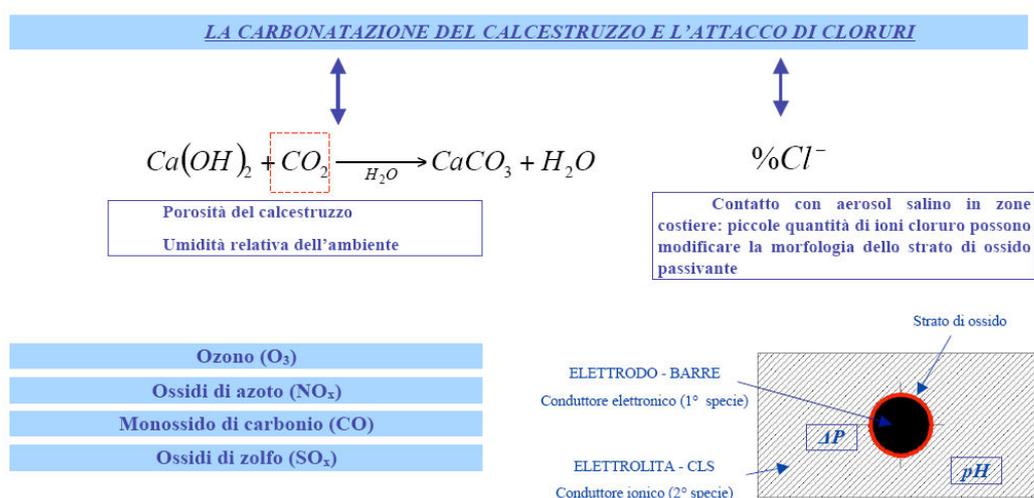


Figura 5.2: Degrado del calcestruzzo in ambiente marino

L'interazione materiale – ambiente, per ogni livello di concentrazione di anidride carbonica, è tanto maggiore quanto maggiore è la porosità del calcestruzzo e per un intervallo di umidità relativa dell'ambiente compreso tra il 40-70% [61].

La resistenza meccanica del calcestruzzo diminuisce con l'aumentare della sua porosità: per questa ragione le disposizioni normative [11] impongono una classe di resistenza caratteristica minima del calcestruzzo una volta individuata la classe di esposizione ambientale dell'opera. Pertanto, la difficoltà progettuale principale risiede nell'individuare correttamente le condizioni ambientali di esercizio del calcestruzzo.

La classe di resistenza a compressione del calcestruzzo adeguata a garantire la durabilità del materiale è funzione della classe di esposizione ambientale o combinazioni di classi di esposizione ambientale e quindi dipende dal sito di costruzione: però, essa non sempre sarà uguale alla classe di resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo sufficiente a garantire la sicurezza statica della struttura, in quanto quest'ultima dipenderà da altre considerazioni legate principalmente alla complessità dell'opera e alla sua destinazione d'uso. Pertanto la resistenza meccanica di progetto del calcestruzzo dovrà essere definita secondo un **criterio globale di sicurezza**, tenuto conto anche delle classi di esposizione ambientali assunte (figura 5.3).

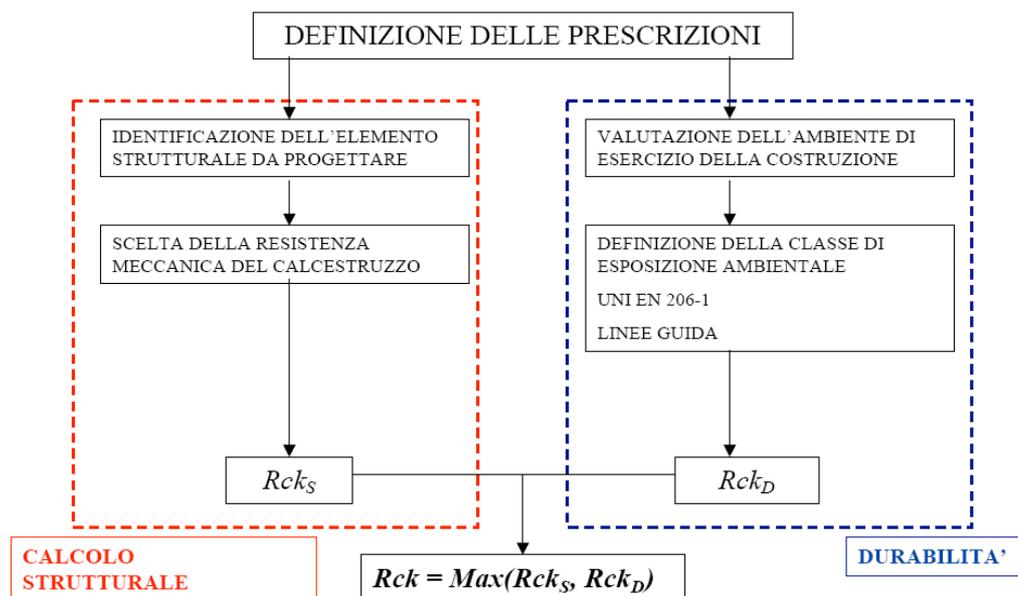


Figura 5.3: Criterio di scelta della resistenza caratteristica del calcestruzzo

5.2 CAMPIONAMENTO

I prelievi, distribuiti nei primi quattro piani fuori terra (PT, 1P, 2P, 3P) oltre il piano interrato (IT), hanno interessato i pilastri del secondo (II) e terzo (III) vano scala (figura 5.4) dell'edificio B, il secondo dei due edifici denominati "Matarrese".

I campioni sono stati classificati codificandoli secondo il seguente criterio: la prima lettera indica il piano (W IT, Z PT, X 1P, T P2, Y P3), la prima cifra indica l'elemento strutturale, la seconda lettera indica l'orientamento (A sud, B est - lato mare - , C nord, D ovest) e infine l'ultima cifra indica la posizione corrispondente alla quota di prelievo nell'elemento strutturale.

La distanza minima dal mare, misurata in corrispondenza del campione TS1, è di circa 90 m, mentre la distanza massima, misurata in corrispondenza del campione X28A/2, è di circa 145 m.

Per ogni punto di prelievo sono state estratte due microcarote ($D = 4 \text{ cm}$ circa) e una carota di diametro normale ($D = 10 \text{ cm}$ circa). Le prime sono state utilizzate per la caratterizzazione fisico-chimica del calcestruzzo, le seconde sono invece servite per la determinazione delle proprietà meccaniche.

Le microcarote (figura 5.5) sono state tagliate a cinque centimetri a partire dalla superficie esterna, ottenendo dei cilindretti, ciascuno dei quali è stato suddiviso assialmente in due parti: sulla prima parte è stata effettuata la prova di carbonatazione;



Figura 5.4: Edifici campionati

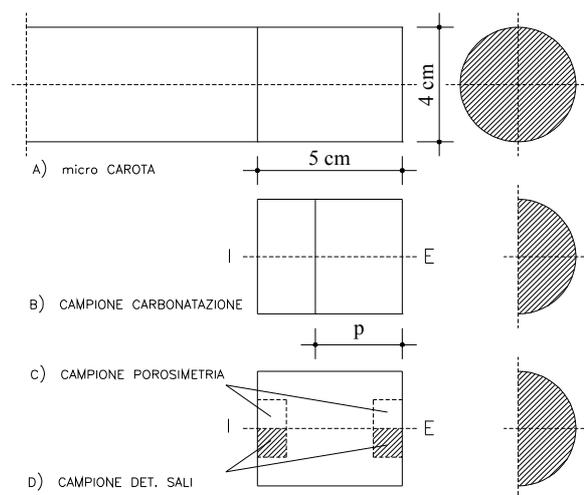


Figura 5.5: Campionamento

sull'altra parte, in corrispondenza della superficie esterna (E) ed interna (I), sono stati prelevati i campioni per la determinazione dei sali idrosolubili.

5.3 RESISTENZA MECCANICA DEL CALCESTRUZZO

La caratterizzazione meccanica del calcestruzzo ha riguardato la determinazione della resistenza meccanica attraverso la prova di compressione monoassiale di n. 8 carote, preliminarmente rettificata ad un'altezza pari al doppio del diametro (UNI EN 12390-3): in figura 5.6 sono riportate le dimensioni (rilevate in millimetri con la precisione alla seconda cifra dopo la virgola) e i risultati della prova.

La resistenza cubica di ciascun campione è stata dedotta a partire dalla resistenza cilindrica. È stata poi determinata la resistenza cubica media dei campioni (R_m) e successivamente applicando il metodo di controllo tipo A [11] la resistenza caratteristica R_{ck} pari a $39,4 \text{ N/mm}^2$: pertanto il calcestruzzo appartiene ad una classe di resistenza media [11].

PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE DELLE CAROTE GRANDI										
Carota	Diametro base superiore (mm)			Diametro base inferiore (mm)			d_m (mm)	A_c (mm ²)	P (N)	f_{ci} (N/mm ²)
	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 1	Pos 2	Pos 3				
W10C/3	103,86	103,88	103,87	103,88	103,80	103,80	103,85	8470,11	341388	40,3
W14A/2	103,78	103,81	103,74	103,80	103,80	103,84	103,80	8461,41	294300	34,8
Z12D/2	103,83	103,87	103,90	103,64	103,81	103,70	103,79	8460,87	362970	42,9
Z22D/1	103,84	103,34	103,71	103,96	103,88	103,96	103,78	8459,24	291357	34,4
Z28A/3	103,75	103,80	103,63	103,75	103,81	103,83	103,76	8455,98	315882	37,4
X28A/2	103,83	103,88	103,85	103,90	103,86	103,92	103,87	8474,19	295281	34,8
X31A/3	103,90	103,90	103,88	103,93	103,83	103,90	103,89	8476,91	286452	33,8
T1S/1	103,89	103,82	103,80	103,78	103,80	103,75	103,81	8463,31	235440	27,8
Y29C/3	104,22	104,28	104,20	104,16	104,14	104,17	104,20	8526,75	323730	38,0

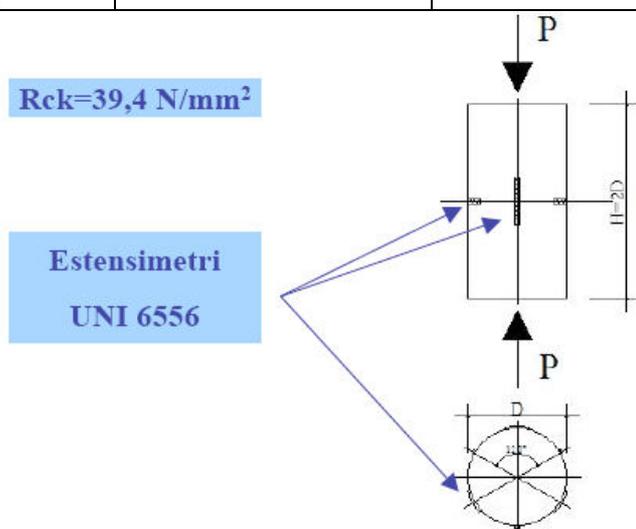


Figura 5.6: Caratterizzazione geometrica e meccanica delle carote, in grassetto i campioni sui quali è stato determinato il modulo elastico (E)

L'indagine è proseguita mediante la determinazione delle proprietà elastiche del calcestruzzo, cioè del modulo elastico secante (E) (su tre carote in accordo alla norma UNI 6556), del modulo di Poisson (ν) e quindi indirettamente del modulo di elasticità tangenziale (G).

Il modulo di Poisson, valutato a partire dalle leggi di Hooke generalizzate, è stato determinato considerando il materiale isotropo ed omogeneo.

Si sono inoltre valutate le proprietà di deformazione del calcestruzzo attraverso la determinazione della deformazione al limite elastico (ϵ_c) e la deformazione ultima (ϵ_{cu}),

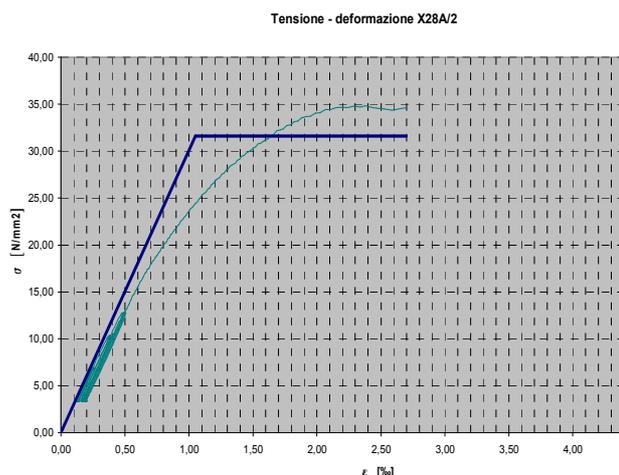


Figura 5.7: Comportamento ideale del calcestruzzo elastico – perfettamente plastico

Carota	E (N/mm ²)	ν	G (N/mm ²)	ϵ_c ‰	ϵ_{cu} ‰	μ
W10C/3	26200	0,23	10650	1,27	2,51	1,98
W14A/2	21950	0,21	9070	1,30	2,96	2,28
X28A/2	30100	0,25	12040	1,05	2,70	2,57
Valori medi	26083	0,23	10587	1,21	2,72	2,28

Figura 5.8: Proprietà elastiche e di deformazione

mentre la capacità di escursione in campo anelastico è stata saggiata attraverso la definizione convenzionale di duttilità del materiale (μ).

La deformazione al limite elastico è stata fissata facendo riferimento ad un comportamento ideale del calcestruzzo elastico – perfettamente plastico con conservazione del lavoro di deformazione compiuto durante la prova e determinato dal diagramma σ - ϵ sperimentale (figura 5.7). La figura 5.7 mostra il diagramma tensione – deformazione relativa al campione X28A/2 e il relativo modello ideale con legame costitutivo elastico – perfettamente plastico, mentre nella tabella di figura 5.8 sono raccolti i risultati ottenuti.

Il valore del modulo elastico, riferito alla media di tre campioni, risulta minore del valore ottenuto applicando le indicazioni dell'EC2 [62], valide per la determinazione del modulo elastico del calcestruzzo in assenza di dati sperimentali, di circa il 14% e pari a circa 30 GPa.

prospetto F.1 Valori limite raccomandati per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

	Classi di esposizione																		
	Nessun rischio di corrosione o attacco	Corrosione da carbonatazione				Corrosione da cloruri						Attacco gelo/disgelo				Ambienti chimici aggressivi			
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	Acqua marina			Altri cloruri (diversi dall'acqua di mare)			XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
							XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3							
Rapporto massimo a/c	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Classe di resistenza minima	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Contenuto minimo di cemento (kg/m ³)	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360	360
Contenuto minimo di aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	-	-	-	-
Altri requisiti												Aggregati conformi al prEN 12620:2000 con sufficiente resistenza al gelo/disgelo				Cemento resistente ai solfati ^{b)}			
a)	Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni dovrebbero essere verificate conformemente ad un metodo di prova appropriato rispetto ad un calcestruzzo per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo per la relativa classe di esposizione.																		
b)	Qualora la presenza di SO ₄ ²⁻ comporti le classi di esposizione XA2 e XA3, è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati. Se il cemento è classificato a moderata o ad alta resistenza ai solfati, il cemento dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA2 (e in classe di esposizione XA1 se applicabile) e il cemento ad alta resistenza, ai solfati dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA3.																		

UNI EN 206 - 1 - 2006

Figura 5.9: Valori limite delle classi di resistenza meccanica del calcestruzzo raccomandati [63] in funzione delle classi di esposizione ambientale

La classe di resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo adeguata a garantire la durata di un'opera per un periodo di esercizio di 50 anni per la combinazione XC4 – XS1 è la C30/37 [63]. Pertanto la resistenza meccanica del calcestruzzo utilizzato nel complesso edilizio di Punta Perotti appare rispondere, almeno per quanto riguarda la classe di resistenza meccanica, alle prescrizioni riportate dalla norma UNI EN 206 -1 (figura 5.9): ciò consente di poter considerare il calcestruzzo utilizzato compatibile con le classi di esposizione ambientali del sito (XC4 – XS1) e quindi molto utile per considerazioni di carattere generale. Tuttavia è utile ricordare che la norma UNI EN 206-1 è stata emanata successivamente alla costruzione del complesso edilizio di Punta Perotti.

5.4 CARBONATAZIONE E SALI IDROSOLUBILI DEL CALCESTRUZZO

È stata effettuata la prova di carbonatazione su otto campioni diversamente orientati e se ne è determinata la profondità (p). Per ciascuna profondità di carbonatazione, noto il periodo di esercizio della costruzione (t) pari a 11 anni, è possibile determinare indirettamente la costante di carbonatazione (K) della legge di Fick [61]: a partire da tali

valori si possono costruire le curve di carbonatazione relative a diverse ipotesi. In particolare sono state costruite due curve di carbonatazione, riferite ad una vita utile presunta di 50 anni, la prima ($K = 11,54$) per il campione che ha presentato la maggiore profondità di carbonatazione (TS1), mentre la seconda ($K = 9,30$) per una profondità di carbonatazione pari alla media delle misure effettuate. Una terza curva ($K = 5,66$) di confronto è stata costruita considerando ancora una vita utile della costruzione di 50 anni e una profondità di carbonatazione, a quella data, di 40 mm, pari cioè al valore di copriferro per le travi e pilastri, in presenza di salsedine marina, suggerito dal D.M. 9 gennaio 1996.

In figura 5.10 il grafico mostra per la curva di confronto e per un periodo di esercizio del fabbricato pari a 11 anni una profondità di carbonatazione di 18,80 mm; si deve tuttavia tenere presente che l'andamento di questa curva si riferisce ad un calcestruzzo utilizzato in una costruzione finita, quindi ad un calcestruzzo protetto.

Lo stato di rustico del fabbricato ha però determinato una forte accelerazione dell'avanzamento del fronte di carbonatazione: sono state infatti misurate una profondità di carbonatazione di circa 38.30 mm per il campione TS1 e una profondità media di carbonatazione, riferita a tutti i campioni, di circa 30.90 mm.

Pertanto negli elementi strutturali con valori di copriferro inferiori alla profondità di carbonatazione misurata il processo di corrosione delle armature era innescato già al momento dell'abbattimento, una ispezione visiva in cantiere ha consentito di confermare questa valutazione essendo stato possibile individuare alcuni distacchi di calcestruzzo e isolare fenomeni di corrosione delle armature (figura 5.11). Si è determinata la presenza di cloruri attraverso la tecnica della cromatografia ionica in soluzione: la percentuale di questi sali è risultata massima nei campioni prelevati in prossimità della superficie più esposta dei pilastri, diminuisce, conservando però delle concentrazioni significative, nei campioni prelevati ad una profondità di cinque centimetri, mentre è accettabile nei campioni prelevati a profondità maggiori (figura 5.12). Si è osservato che anche la presenza di solfati è molto significativa sulla superficie esposta dei campioni.

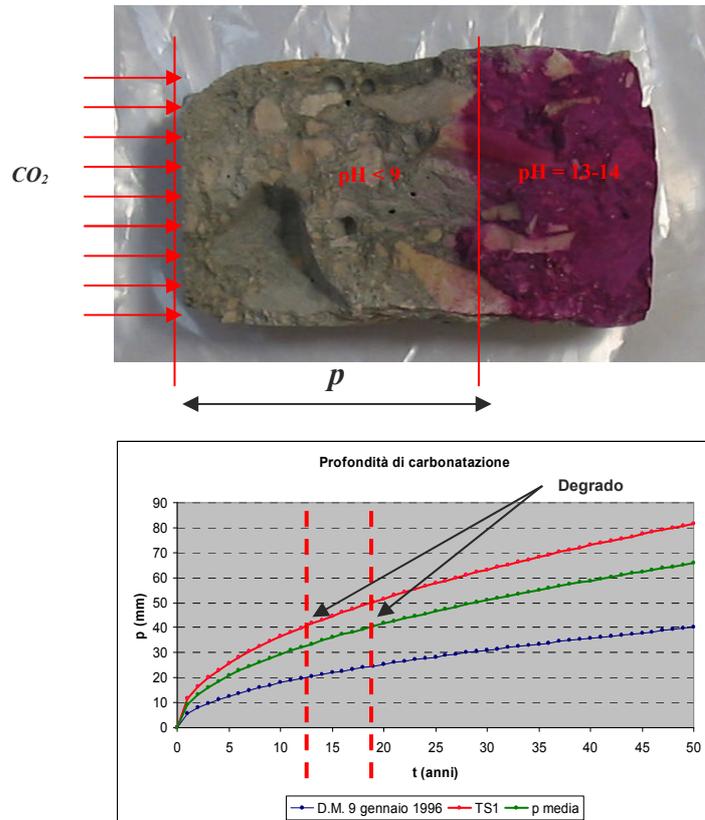


Figura 5.10: Profondità di carbonatazione in funzione del tempo



Figura 5.11: Distacco di calcestruzzo e ossidazione dell'armatura

Il massimo contenuto di ioni cloruro nel calcestruzzo ammesso dalle norme [11] in presenza di armatura d'acciaio è dello 0.4% rispetto alla massa del cemento che corrisponde a circa lo 0.06-0.065% per un calcestruzzo confezionato con una quantità di cemento pari a 350–400 Kg/m³ e massa volumica pari a 2.200 Kg/m³.

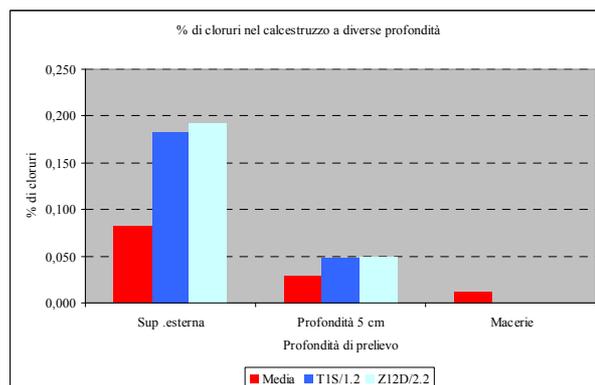


Figura 5.12: % di cloruri e solfati nel calcestruzzo a diverse profondità

5.5 RESISTENZA MECCANICA DEL CALCESTRUZZO, CARBONATAZIONE E SALI

I valori di resistenza meccanica del calcestruzzo, determinati sulle carote grandi, sono stati ordinati in maniera crescente e confrontati con i corrispondenti valori della profondità di carbonatazione.

È stata posta l'attenzione sui campioni X31A/3 e X28A/2 prelevati dai pilastri del primo piano del vano scala centrale dell'edificio B e pertanto presumibilmente riferiti alla stessa data di getto, in quanto il volume di calcestruzzo necessario per completare il getto dei pilastri di tale piano è stato stimato in circa 42 m³.

Si osserva che la profondità di carbonatazione diminuisce con l'aumentare della resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo, confermando la dipendenza della durabilità del calcestruzzo dalla resistenza meccanica dello stesso, per questo le norme impongono la classe di resistenza minima e il rapporto massimo a/c della miscela in funzione dell'ambiente di esercizio del calcestruzzo.

Un secondo grafico mette in relazione la profondità di carbonatazione con la quantità ponderale di cloruri presenti nel calcestruzzo (figura 5.13). Si osserva che l'andamento della profondità di carbonatazione è simile all'andamento del tenore di cloruri presenti nel calcestruzzo, infatti al crescere della profondità di carbonatazione cresce anche la presenza di ioni cloruro nel calcestruzzo, ciò ad indicare presumibilmente le caratteristiche di porosità del calcestruzzo e quindi le vie di ingresso per gli agenti aggressivi.

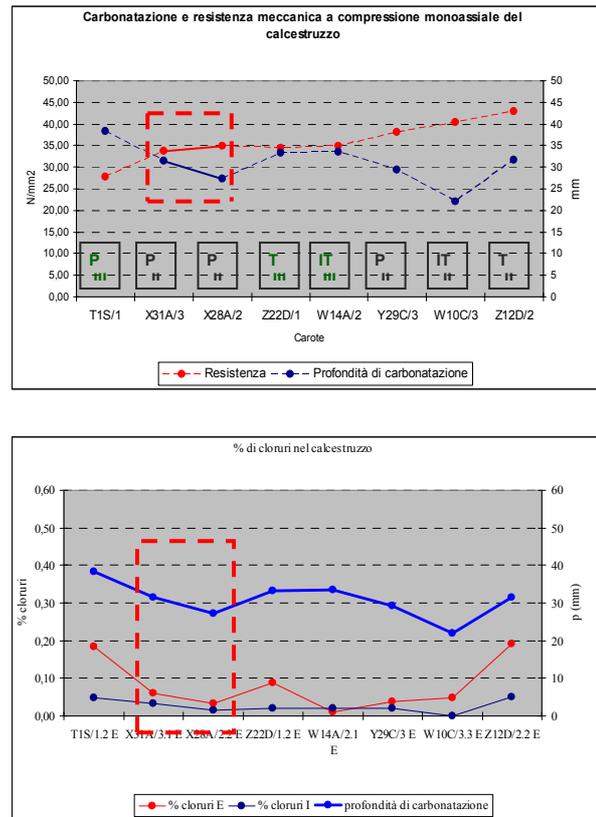


Figura 5.13: Profondità di carbonatazione e sue relazioni con la resistenza meccanica e il tenore di sali

Le prove condotte, pur limitate a primi elementi di valutazione, hanno mostrato chiaramente che il calcestruzzo utilizzato, benché di buona qualità meccanica, presenta criticità importanti sulla cortina esterna: le ragioni di questo stato di degrado sono da ricercare nell'assenza di ogni tamponatura e degli intonaci, pertanto il calcestruzzo è stato esposto alle azioni ambientali senza alcuna protezione. Proprio per questo il plesso ha costituito un caso esemplare di studio del degrado di strutture in conglomerato cementizio armato in ambiente marino. Sono state misurate profondità di carbonatazione significative fino a circa 40 mm a partire dalla superficie esposta del calcestruzzo e tenori di ioni cloruro importanti. Indagini più approfondite sono in corso per qualificare la microstruttura del materiale mediante osservazioni al microscopio elettronico a scansione (SEM) e determinazione della porosità aperta e chiusa.

5.6 MAPPE DEL DEGRADO

I risultati ottenuti dalle prove di carbonatazione e di determinazione degli ioni cloruro sono stati rappresentati attraverso la redazione di mappe del degrado di lettura immediata e riferite a ciascun piano di prelievo, sono stati riportati per ciascun campione analizzato l'identificazione e l'ubicazione.

Stabilita la soglia di degrado, rappresentata per la carbonatazione da una profondità di 30 mm (probabile valore del copriferro) e per gli ioni cloruro da una concentrazione di 0.05% sulla massa del campione, con il colore rosso sono stati segnalati i campioni caratterizzati da un avanzato degrado, al contrario il colore verde è stato utilizzato per indicare il buono stato del calcestruzzo.

Pertanto attraverso la lettura delle mappe di degrado è facile riconoscere lo stato di degrado del complesso edilizio di Punta Perotti al momento della demolizione: la costruzione complessivamente in buono stato presenta lievi, ma diffuse, note di degrado.

Le figure 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 mostrano le mappe di degrado per ciascun piano analizzato.

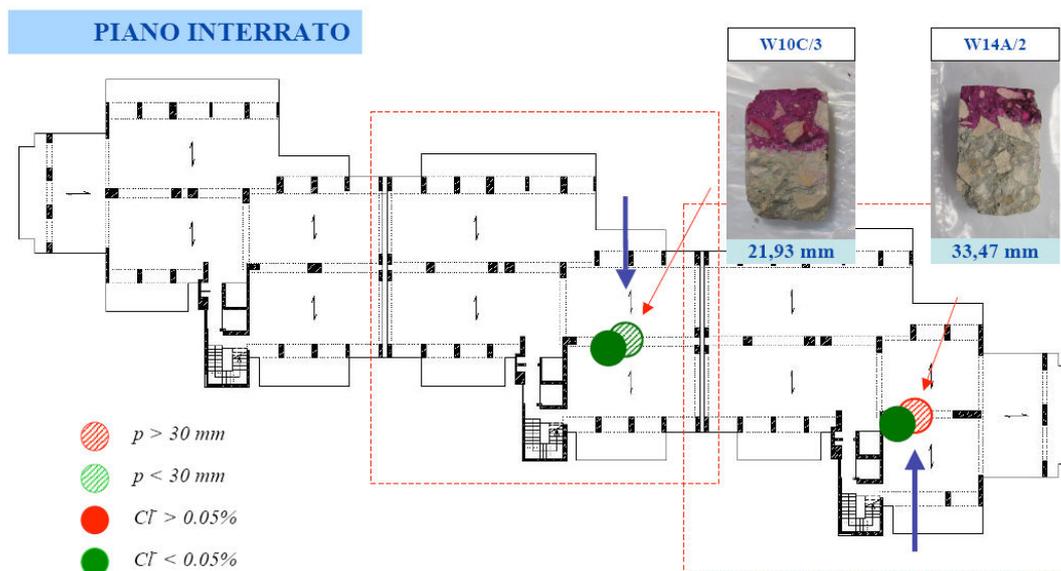


Figura 5.14: Mappa del degrado piano interrato

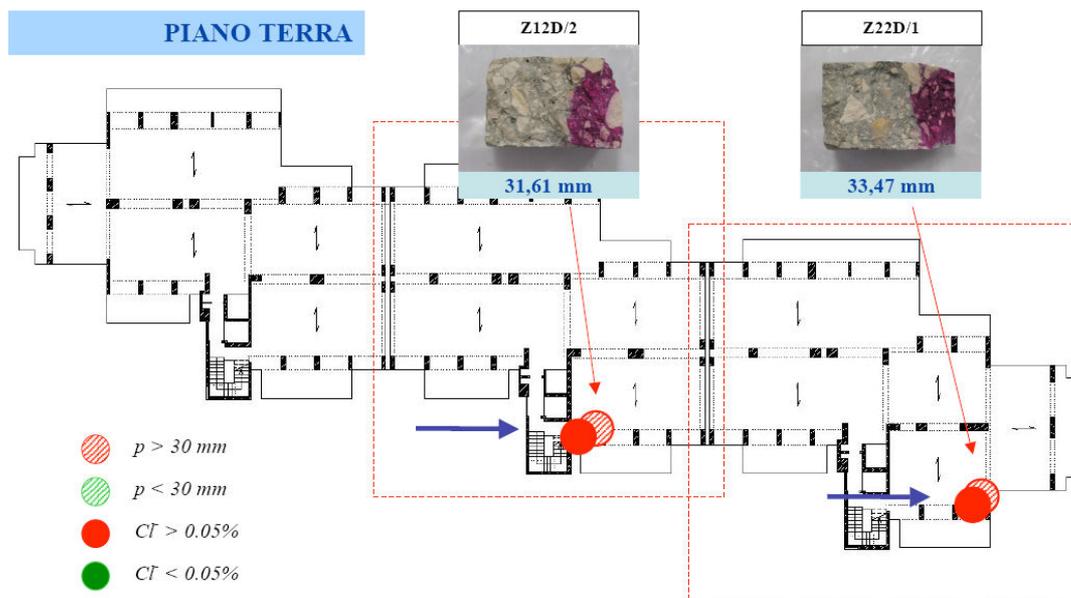


Figura 5.15: Mappa del degrado piano terra

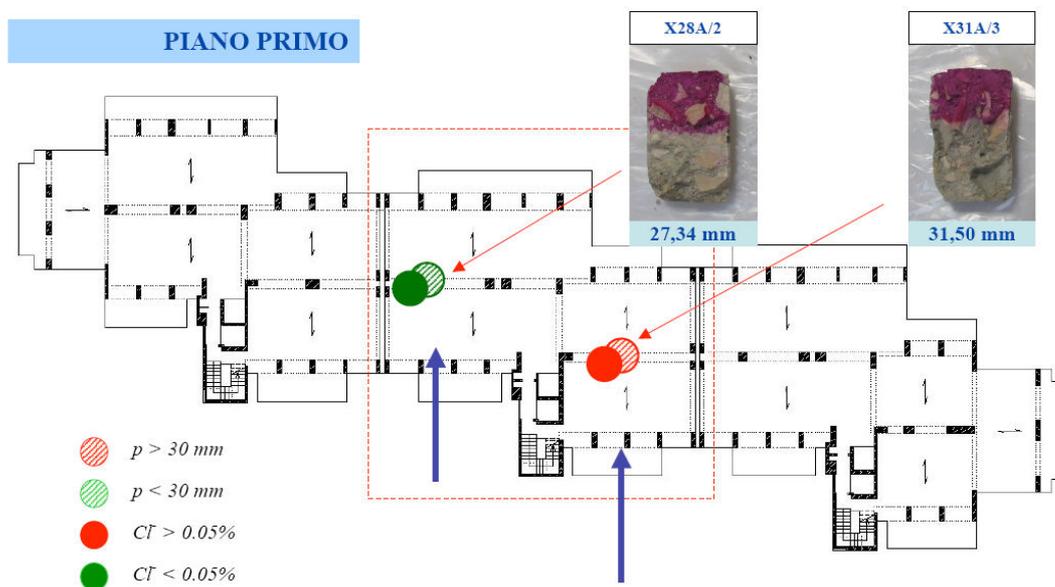


Figura 5.16: Mappa del degrado piano primo

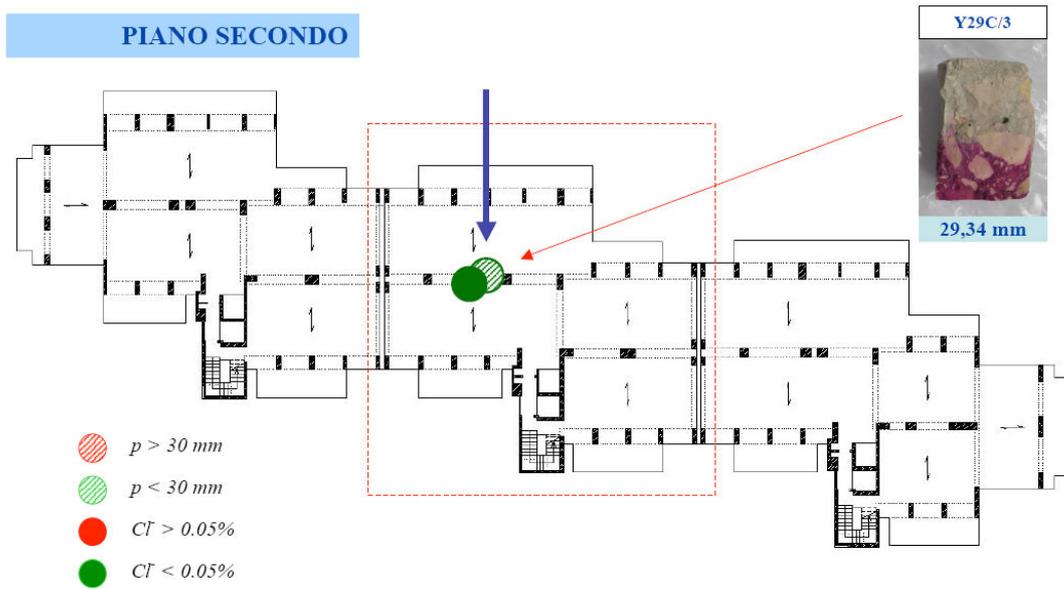


Figura 5.17: Mappa del degrado piano secondo

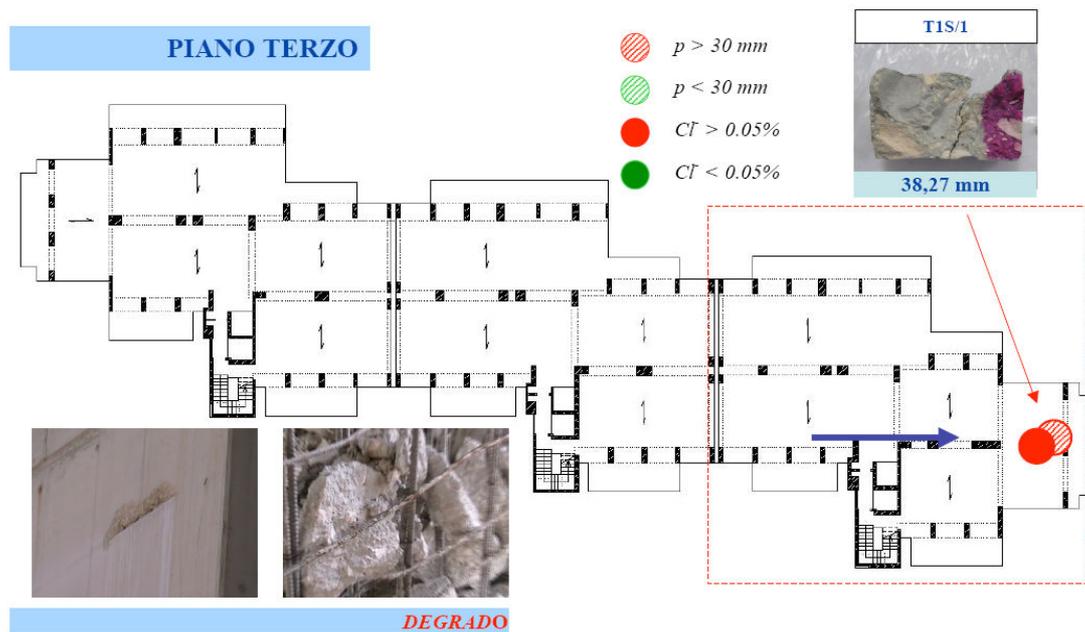


Figura 5.18: Mappa del degrado piano terzo

6. GLI AGGREGATI DI RICICLO DI PUNTA PEROTTI

Le considerevoli quantità di rifiuti provenienti dalla demolizione del complesso edilizio in località Punta Perotti (BA) rappresentano un benefico impulso verso il riciclaggio delle macerie, sottoforma di materie prime secondarie, per confezionare nuovo calcestruzzo sostenibile in un'epoca di grandi accelerazioni della tecnica e di sempre crescente consapevolezza sulla limitazione delle risorse.

Gran parte degli studi effettuati finora sul riciclaggio del calcestruzzo da demolizione, utilizzato in qualità di aggregato per nuovo calcestruzzo strutturale, prescindono dalla caratterizzazione del materiale ancora in opera, cioè prima della demolizione.

Nel presente lavoro si intende qualificare, preliminarmente al riutilizzo, gli aggregati provenienti dal trattamento delle macerie, partendo dallo stato del calcestruzzo in opera, valutato attraverso un'accurata conoscenza del materiale impiegato nella struttura oggetto di demolizione, e giungendo alle normali qualificazioni fisico-geometriche usualmente utilizzate per gli aggregati naturali.

La possibilità di recuperare parti sempre più cospicue del demolito, reinserendolo nei cicli produttivi sotto forma di materie prime seconde, non può quindi prescindere da una preliminare ed accurata indagine dell'edificio finalizzata alla conoscenza dei fattori di rischio, che minano la buona riuscita di un calcestruzzo, e alla qualificazione dei materiali (figura 6.1).

Il raggiungimento di un elevato grado di conoscenza dell'edificio è una condizione necessaria: fornisce utili informazioni per la qualificazione degli aggregati di riciclo provenienti da processi di trattamento delle macerie.

Le proprietà fisico-meccaniche degli aggregati (assorbimento d'acqua, massa volumica, resistenza meccanica, ecc.) provenienti da calcestruzzo demolito dipenderanno molto dalla classe di calcestruzzo in opera.

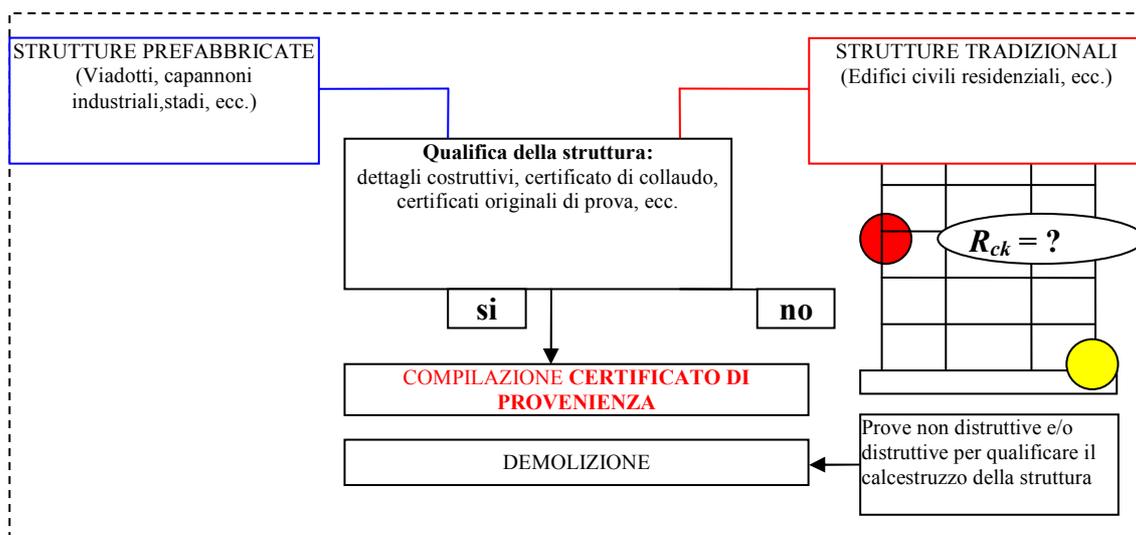


Figura 6.1: Diagramma di flusso processo di rigenerazione materiali da C-D

Gli aspetti che definiscono l'accuratezza del livello di conoscenza sono sostanzialmente i disegni costruttivi, i certificati originali di prova, le proprietà meccaniche dei materiali e il loro stato di degrado (vedi capitolo 5). Attraverso l'elaborazione del certificato di provenienza degli aggregati è possibile raccogliere questi dati che risulteranno molto importanti in fase di progettazione del calcestruzzo.

La conoscenza geometrica della costruzione consente di giungere alla stima del volume sia di demolito totale sia dei volumi corrispondenti a categorie omogenee di materiali (calcestruzzo, laterizio, gesso, ecc.). Così facendo è già possibile cogliere una prima valutazione del prossimo demolito che consenta di caratterizzarlo e quindi di individuare possibili impieghi una volta trattato.

Emerge pertanto un primo aspetto fondamentale nell'ambito degli aggregati provenienti dal trattamento delle macerie: la notevole eterogeneità dei prodotti di demolizione da cantiere a cantiere. Diverso sarà infatti il demolito proveniente dalla demolizione di una costruzione in muratura rispetto ad una costruzione in cemento armato, ed ancora diverso sarà rispetto ad una costruzione prefabbricata.

Le nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni, nel capitolo 11 "Materiali e prodotti per uso strutturale", per quanto riguarda i componenti del calcestruzzo prevedono l'uso degli aggregati grossi provenienti da riciclo, con la limitazione delle percentuali di impiego in funzione dell'origine e della classe di calcestruzzo che si vuole produrre

Origine del materiale di riciclo	Classe del calcestruzzo (N/mm ²)	Percentuale di impiego
Demolizione di edifici (macerie)	= C8/10	fino al 100%
Demolizione di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C30/37 ≤ C20/25	≤ 30% fino al 60%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati		
Da qualsiasi classe	≤ C45/55	fino al 15%
Da calcestruzzi > C45/55	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%

Figura 6.2: Percentuali di impiego dell'aggregato di riciclo in base all'origine e alla classe del calcestruzzo (D.M. 14.01.2008, tabella 11.2.III)

(figura 6.2) e subordinandone l'uso ad appropriate sperimentazioni preliminari.

In mancanza dei disegni costruttivi, o dei certificati originali di prova, attraverso estese verifiche in sito si può raggiungere l'adeguato livello di conoscenza sui materiali.

Prima della demolizione, è opportuno pertanto qualificare il fabbricato per fornire al progettista del calcestruzzo le adeguate informazioni utili per un opportuno riutilizzo degli aggregati di riciclo per confezionare del calcestruzzo con una attesa resistenza meccanica.

La possibilità di utilizzare aggregati provenienti da riciclo richiede di valutare preventivamente gli effetti dell'aggregato di riciclo sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo ottenuto.

6.1 FATTORI DI RISCHIO

La possibilità di utilizzare convenientemente gli aggregati provenienti da materiale di demolizione per il confezionamento del calcestruzzo strutturale, richiede anche un'accurata conoscenza preliminare dei fattori di rischio.

I fattori di rischio sono dei materiali che se presenti nell'impasto del calcestruzzo rappresentano dei probabili limiti per le caratteristiche prestazionali del materiale sia allo stato fresco che indurito.

I fattori di rischio individuati, durante le diverse operazioni di visita in cantiere, avvenute in più riprese, sono i seguenti:

- polveri;
- terreno vegetale;
- polistirolo;
- legno;
- plastica.

Le polveri, quando avvolgono gli aggregati di riciclo, sono particolarmente dannose per il calcestruzzo ai fini dell'adesione aggregato – pasta cementizia, la loro presenza nei prodotti di demolizione può essere legata quantitativamente al tipo di demolizione. Si è osservato che la demolizione con esplosivo determina una maggiore produzione di polveri rispetto ad una demolizione meccanica, dovuta non solo all'esplosione ma anche al forte impatto con il terreno. Tuttavia la generazione delle polveri durante le attività di demolizione è inevitabile.

Lo stato a rustico dei fabbricati A e B esclude la presenza di piastrelle e intonaco, l'edificio A presenta a differenza dell'edificio B la tamponatura esterna (figura 6.3). La scelta costruttiva di realizzare gli elementi a sbalzo in lastre in calcestruzzo con interposto materiale di alleggerimento rappresentato da polistirolo (figura 6.4) ha contaminato localmente le macerie.

Tuttavia le operazioni di frantumazione, successive alla demolizione, ne riducono fortemente la presenza per distacco.

Il terreno vegetale (figura 6.5) può facilmente essere presente se non si opera attentamente con i mezzi di movimentazione meccanici determinando anche in questo caso una pericolosa contaminazione.

Gli aggregati provenienti da questa demolizione sono per la maggior parte costituiti da calcestruzzo e in parte minore da laterizi, ciò li rende particolarmente adatti per il confezionamento del calcestruzzo per usi strutturali. Talvolta si sono incontrati tubi corrugati per impianti elettrici (figura 6.5).



Figura 6.3: Edificio A con tamponatura esterna, edificio B senza tamponatura



Figura 6.4: Elementi a sbalzo in lastre di calcestruzzo armato con interposto polistirolo



Figura 6.5: Terreno e macerie

6.2 MITIGAZIONE DEI FATTORI DI RISCHIO

Il demolito ha subito due diversi livelli di frantumazione definiti: frantumazione primaria e frantumazione secondaria.

Le operazioni di frantumazione sono orientate non solo a raggiungere un'adeguata granulometria del materiale demolito ma anche a trasformare il rifiuto in materia prima secondaria attraverso l'eliminazione dei fattori di rischio.

Le operazioni di frantumazione primaria, eseguite con escavatori attrezzati con pinze meccaniche e martelli pneumatici, hanno consentito la separazione del calcestruzzo dall'acciaio, questo è stato accatastato in grossi gomitolari pronti per essere allontanati (figura 6.6).

In questa fase sono state separate anche le plastiche, rappresentate dalle colonne montanti degli scarichi, presenti esclusivamente nell'edificio A (figura 6.6).

Le operazioni di frantumazioni secondaria, eseguite attraverso impianto di riciclaggio mobile, dotato di mulino a mascelle impostato con apertura delle mascelle pari a 7-8 cm, sono state finalizzate ad ottenere un materiale granulare omogeneo.

La frantumazione, effettuata con questo tipo di frantoio, restituisce in uscita ciotoli di dimensioni anche maggiori rispetto all'apertura massima nominale delle mascelle, in quanto la disposizione del materiale durante il passaggio tra le mascelle è casuale per cui si può verificare che durante l'apertura un ciotolo attraversi le mascelle con la sua dimensione maggiore nel senso ortogonale alla direzione di apertura.

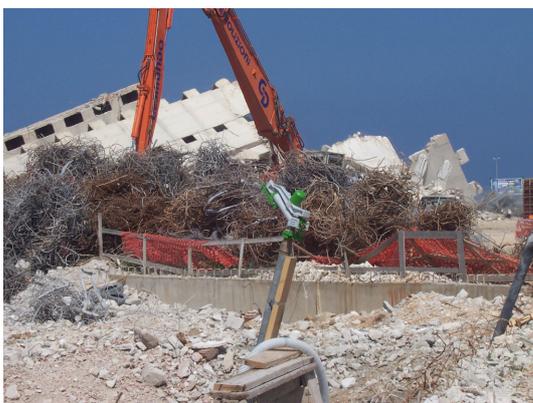


Figura 6.6: Selezione del materiale in cantiere



Figura 6.7: Punto di prelievo in cantiere del materiale utilizzato

La scelta del materiale da utilizzare per il confezionamento del calcestruzzo strutturale, oggetto della sperimentazione, è ricaduta sul frantumato dell'edificio B, come già precedentemente ricordato questo risultava essere privo della tamponatura esterna, così da poter escludere la presenza di laterizio ed avere a disposizione un materiale omogeneo costituito da solo frantumato di calcestruzzo di caratteristiche meccaniche note. La figura 6.7 mostra il punto di prelievo.

6.3 APPROVVIGIONAMENTO DEL DEMOLITO TRATTATO IN CANTIERE

Il materiale è stato approvvigionato, presso il cantiere di Punta Perotti, in 3 sacchi (figura 6.9) opportunamente sigillati, successivamente è stato trasportato presso i laboratori del DICASM (Dipartimento di Chimica Applicata e Scienza dei Materiali) a Bologna.

La quantità di materiale prelevata è di circa 6 tonnellate, questo per poter disporre di un quantitativo di materiale, non strettamente necessario alla presente sperimentazione, tale da garantire più estese indagini sul comportamento di elementi strutturali realizzati con alcune delle miscela di calcestruzzo messe a punto con questa campagna sperimentale.

Il materiale di partenza è stato preliminarmente lavato al fine di scongiurare la presenza di eventuale terreno vegetale depositato accidentalmente sulla superficie laterale dei grani durante le operazioni di movimentazione in cantiere.



Figura 6.8: Frantumazione secondaria del materiale prelevato



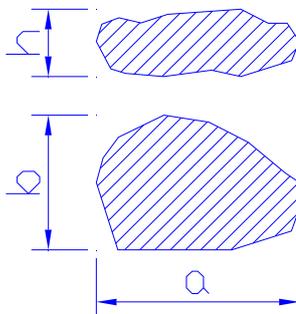
Figura 6.9: Operazioni di approvvigionamento e stoccaggio del materiale

6.4 CALIBRAZIONE DELLA FRANTUMAZIONE DI LABORATORIO

Prima di procedere alla frantumazione definitiva di laboratorio, al fine di ottimizzare il processo di frantumazione e garantire il minor sfrido di materiale, sono state eseguite delle prove per ottenere un frantumato con una distribuzione granulometrica compatibile con le distribuzioni granulometriche teoriche utilizzate in fase di progettazione per raggiungere il miglior assortimento granulometrico.

Il materiale lavato è stato sottoposto a frantumazione utilizzando, in tempi diversi, due distinti frantoi (del tipo a mascelle regolabili) in dotazione presso i laboratori del DICMA. I frantoi, denominati per semplicità A e B, sono stati regolati con apertura massima delle mascelle rispettivamente di 29 mm e 10 mm. Inizialmente, utilizzando il

frantoio tipo A, il materiale in ingresso di dimensione massima fino a circa 18 cm è stato trasformato in un materiale in uscita di dimensione massima pari a circa 3.5 – 4.5 cm. Nella tabella di figura 6.10 si riportano le dimensioni dei 28 ciottoli del campione.



ANALISI GEOMETRICA DEL CAMPIONE PRIMA DELLA FRANTUMAZIONE						
N	a	b	h	a/b	a/h	b/h
	cm					
1	17,50	11,50	7,00	1,52	2,50	1,64
2	16,80	10,00	7,00	1,68	2,40	1,43
3	13,40	10,00	6,50	1,34	2,06	1,54
4	13,80	8,50	7,00	1,62	1,97	1,21
5	14,70	11,20	6,50	1,31	2,26	1,72
6	12,50	9,00	7,00	1,39	1,79	1,29
7	14,00	11,00	9,50	1,27	1,47	1,16
8	11,00	10,00	5,50	1,10	2,00	1,82
9	12,50	6,00	4,00	2,08	3,13	1,50
10	12,00	9,00	5,50	1,33	2,18	1,64
11	18,50	8,50	7,00	2,18	2,64	1,21
12	12,50	11,50	7,50	1,09	1,67	1,53
13	13,50	7,00	5,00	1,93	2,70	1,40
14	17,00	13,00	8,00	1,31	2,13	1,63
15	11,50	8,50	7,00	1,35	1,64	1,21
16	8,50	8,00	6,00	1,06	1,42	1,33
17	10,00	7,50	7,00	1,33	1,43	1,07
18	10,00	8,50	7,00	1,18	1,43	1,21
19	11,50	8,50	5,50	1,35	2,09	1,55
20	14,00	11,50	7,50	1,22	1,87	1,53
21	14,00	7,50	5,50	1,87	2,55	1,36
22	14,00	9,50	7,00	1,47	2,00	1,36
23	7,50	6,50	4,50	1,15	1,67	1,44
24	12,50	7,00	5,50	1,79	2,27	1,27
25	11,00	7,50	7,50	1,47	1,47	1,00
26	12,50	7,00	6,50	1,79	1,92	1,08
27	16,00	8,00	7,50	2,00	2,13	1,07
28	12,50	8,00	5,50	1,56	2,27	1,45
VALORI MEDI	13,04	8,92	6,52	1,49	2,04	1,38

Figura 6.10: Geometria dei ciottoli del campione

La frantumazione, nel frantoio tipo A, restituisce un materiale prevalentemente grosso, circa il 45% viene infatti trattenuto al setaccio da 25 mm.

I ciottoli si presentano appiattiti ed allungati, quindi dimensionalmente instabili per abrasione durante le operazioni di miscelazione all'interno della betoniera.

Stabilito il diametro massimo dell'aggregato, da utilizzare per il confezionamento del calcestruzzo, pari a 25 mm si è confrontato la distribuzione del frantumato del frantoio A, separato dal trattenuto al setaccio da 25 mm, con le curve ottimali.

Scelto un punto di controllo, individuato dal diametro massimo dell'aggregato diviso due ($D_{max}/2$) si è osservato che il trattenuto a 12,5 mm è circa il 66% e si discosta il 28 % dalla curva di Fuller e il 32% dalla curva di Bolomey.

Per compensare la carenza di fini il trattenuto al setaccio da 25 mm è stato sottoposto ad una ulteriore frantumazione nel frantoio Tipo B ottenendo un materiale più ricco di frazioni fini e più vicino alle curve ottimali.

Proseguendo in questo processo di avvicinamento alla curva ottimale si è pensato di unire il materiale proveniente dalla frantumazione primaria limitato al passante il setaccio 25 mm con il materiale ottenuto dalla frantumazione del trattenuto al setaccio da 25 mm (figura 6.11).

In questa situazione il trattenuto al punto di controllo è circa il 45% e si discosta dalla curva di Fuller di circa 7-8% e dalla curva di Bolomey 8-10%.

Si è proceduto ad analizzare un secondo campione, di peso pari a circa 20 Kg, eseguendo inizialmente una frantumazione primaria più veloce.

A tal fine si è inserito il materiale all'interno del frantoio con continuità.

Nelle figure 6.12 -6.13 sono rappresentate le curve granulometriche ottenute.

Osserviamo che il passante al setaccio da 25 mm è il 65% circa, con un miglioramento rispetto al primo campione del 4,5% circa.

Più importante è invece la differenza di passante al setaccio da 16 mm, pari a circa il 7,5%. Dal setaccio di 8 mm le cose rimangono sostanzialmente invariate con differenze nell'ordine del 2-2,5%.

Con riferimento alla curva corretta, cioè rielaborata togliendo il trattenuto al setaccio a 25 mm, si osserva una variazione del passante al setaccio da 16 mm pari a circa 8,5%.

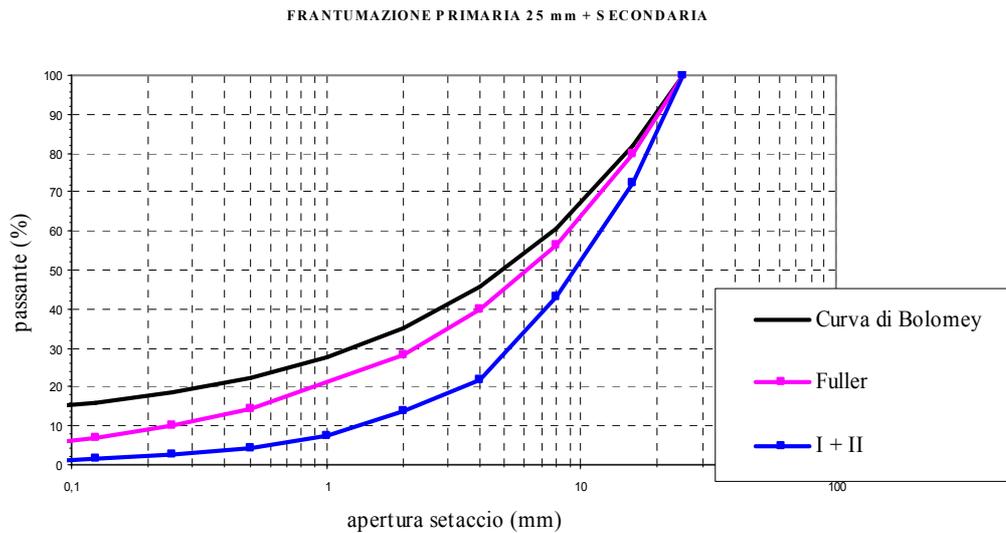


Figura 6.11: Curva granulometrica del materiale proveniente dalla frantumazione del trattenuto al setaccio 25 mm aggiunto al passante il setaccio da 25 mm della frantumazione primaria

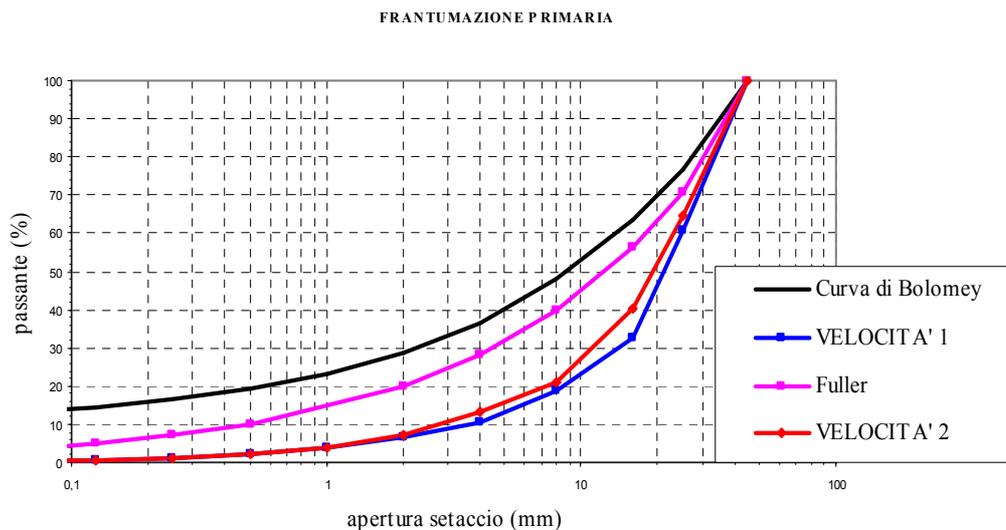


Figura 6.12: Curva granulometrica del materiale proveniente dal processo di frantumazione “veloce”

Per sopperire alla mancanza di aggregato fine, il frantumato proveniente dalla frantumazione nel frantoio tipo A è stato nuovamente frantumato nel frantoio tipo B, introducendo il materiale con flusso costante.

I risultati della doppia frantumazione di tutto il materiale prima nel frantoio uno e dopo nel frantoio due sono riportati in figura 6.14.

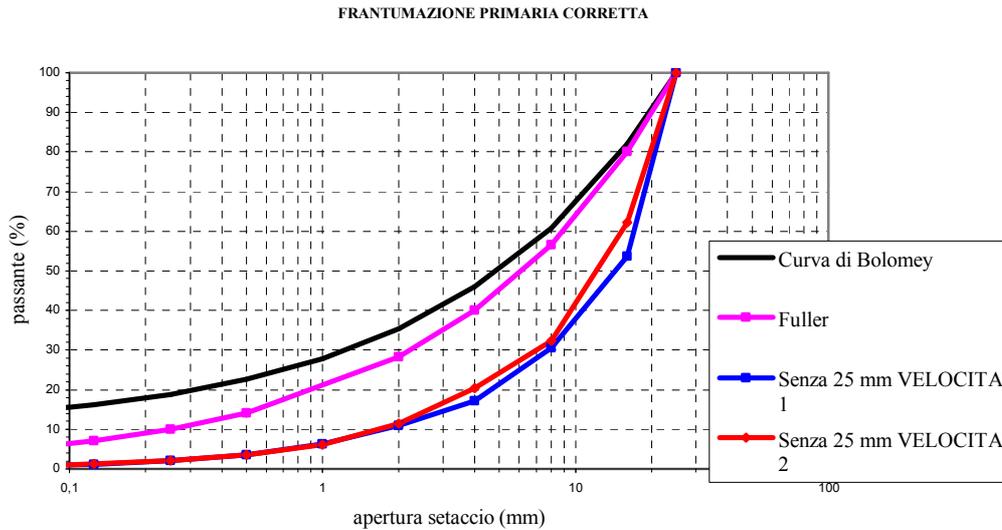


Figura 6.13: Curva granulometrica del materiale proveniente dal processo di frantumazione “veloce” tagliato a 25 mm

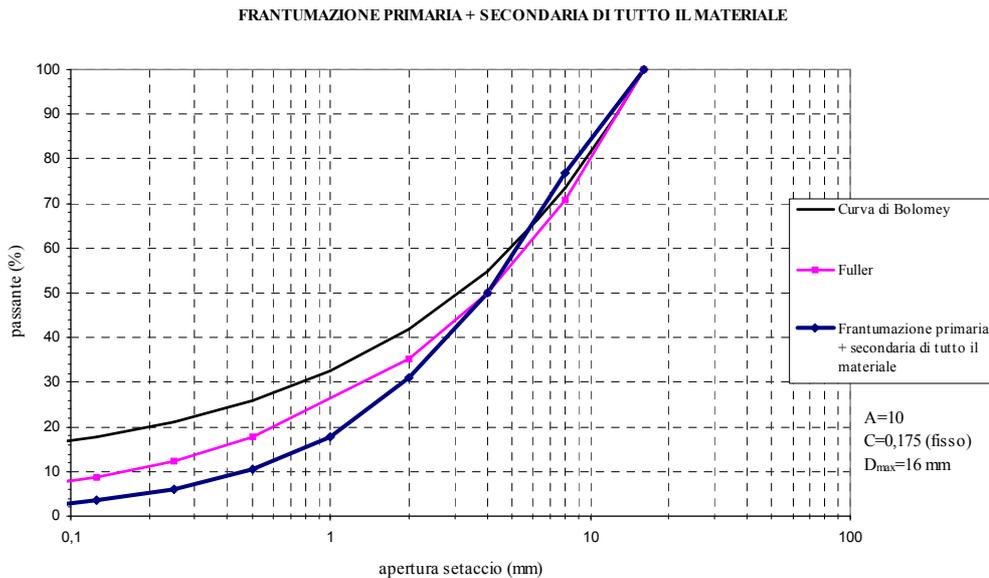


Figura 6.14: Doppia frantumazione “veloce” di tutto il materiale

Il frantumato ottenuto, presenta una conveniente distribuzione granulometrica, il limite è rappresentato dalla dimensione massima dell’aggregato (meno di 16 mm).

Componendo la curva granulometrica corretta che descrive il frantumato proveniente dalla frantumazione nel frantoio tipo A con velocità 2, tagliato a 25 mm, con la curva granulometrica che descrive il frantumato proveniente dalla doppia frantumazione (cioè

FRANTUMAZIONE PRIMARIA CORRETTA VELOCITA' 2 + TOTALE

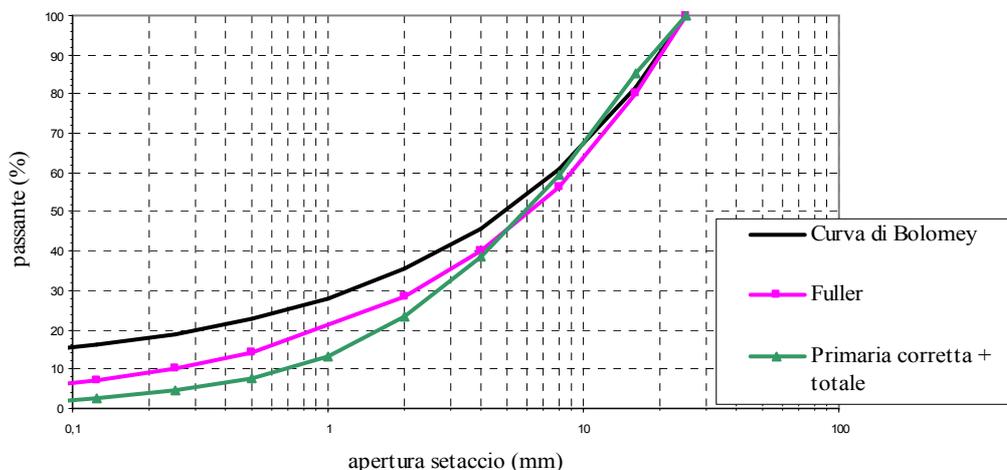


Figura 6.15: Curva granulometrica della miscela costituita dal frantumato dalla frantumazione primaria tagliato a 25 mm e del frantumato della doppia frantumazione di tutto il materiale

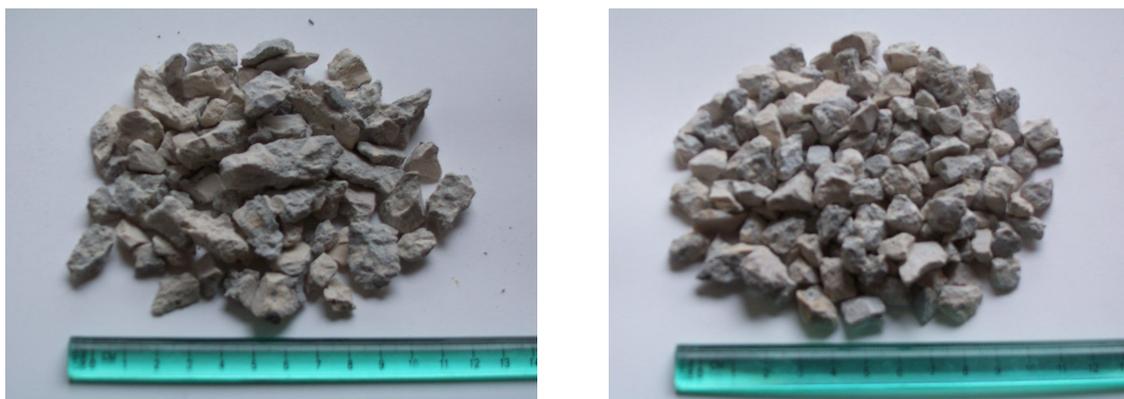


Figura 6.16: Forma degli aggregati per processi di frantumazione diversi

prima frantumazione + seconda frantumazione di tutto il materiale) si ottiene la curva in figura 6.15.

Isolando la frazione granulometrica 8 – 16 mm, del frantumato proveniente dalla frantumazione nel frantoio tipo A con velocità 1 e del frantumato proveniente dalla doppia frantumazione a velocità 2, si nota la differente forma delle aggregati di frantumazione. In particolare una frantumazione del secondo tipo restituisce un frantumato tondeggiate.

Infine, si è effettuato su un terzo campione di 18442 Kg, una doppia frantumazione nel frantoio tipo A con velocità 2, il materiale frantumato non è stato sottoposto ad analisi

granulometrica ed è stato scartato in quanto la dimensione massima dell'aggregato risultava molto maggiore di 25 mm.

6.5 FRANTUMAZIONE E VAGLIATURA DI LABORATORIO

Il demolito è stato soggetto ad un processo di frantumazione e setacciatura per ottenere le frazioni granulometriche di aggregato di riciclo desiderate. Le frazioni granulometriche sono successivamente state soggette ad analisi granulometriche, necessarie a determinarne la distribuzione. Su ciascuna frazione granulometrica è stata inoltre effettuata una prova per determinare la composizione dell'aggregato di riciclo.

Il materiale, circa 300 kg, sulla scorta delle indagini preliminari (paragrafo 6.4) è stato frantumato utilizzando due diversi frantoi, chiamati per semplicità A e B, del tipo a mascelle regolabili aventi apertura massima di 29 mm e 10 mm rispettivamente. Il processo di frantumazione (figura 6.17) è stato organizzato in due fasi:

- frantumazione del materiale di partenza nel frantoio A (frantumazione primaria);
- frantumazione del trattenuto al setaccio da 25 mm nel frantoio B (frantumazione secondaria), per arricchire di frazioni fini il frantumato ottenuto dalla frantumazione primaria in A.

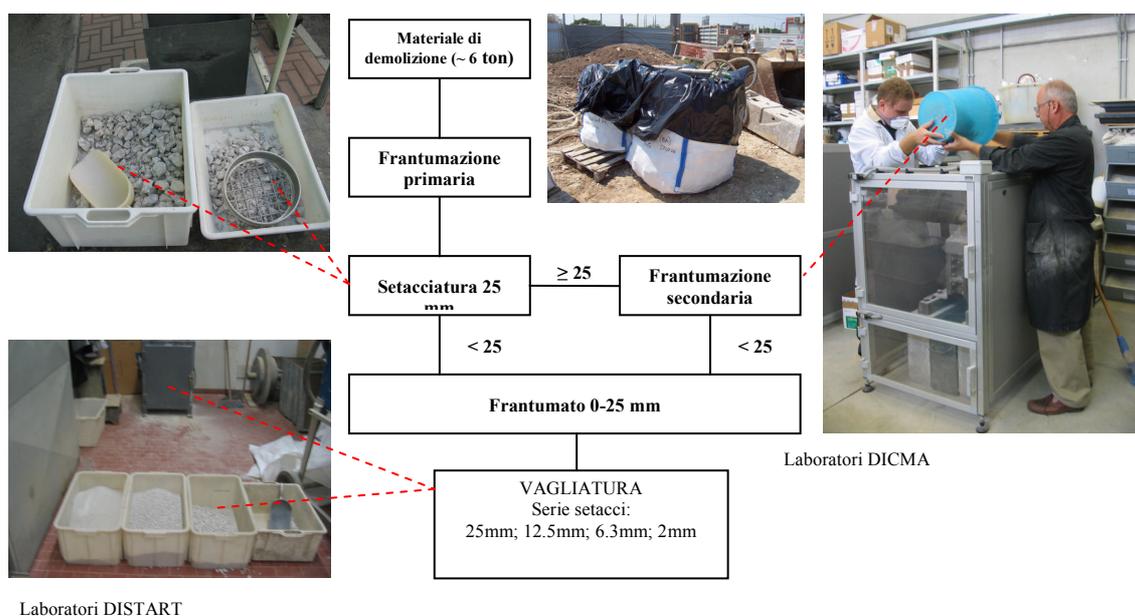


Figura 6.17: Schema del processo di frantumazione

Il materiale di partenza, costituito da ciottoli di diversa grandezza, è quindi stato sottoposto ad una frantumazione primaria in A effettuata introducendo il materiale con continuità nel frantoio, che ha restituito un frantumato prevalentemente grosso che è stato successivamente vagliato con il setaccio da 25 mm.

Il trattenuto a 25 mm è stato quindi sottoposto ad una seconda frantumazione nel frantoio B allo scopo di sopperire alla carenza di fini del materiale restituito dalla frantumazione primaria. Anche la frantumazione secondaria è stata effettuata introducendo il materiale con continuità nel frantoio.

Il passante al setaccio da 25 mm non ha subito una seconda frantumazione.

Al termine del processo di frantumazione il materiale, è stato approvvigionato in sacchi, da 15-20 kg ciascuno, pronto per essere trasportato.

L'operazione successiva alla frantumazione è stata quella di setacciatura del frantumato, ovvero di separazione del materiale in diverse frazioni granulometriche.

La setacciatura è stata effettuata presso i laboratori di Strade e Geotecnica (DISTART) della Facoltà di Ingegneria di Bologna mediante un setacciatore meccanico.

Il materiale è stato separato in quattro frazioni granulometriche:

- 0-2 mm;
- 2-6,3 mm;
- 6,3-12,5 mm;
- 12,5-25 mm.

La scelta di queste frazioni è stata effettuata in realzione a quelle dell'aggregato naturale scelte per la sperimentazione tra le diverse frazioni messe a disposizione dalle Cave Pederzoli di Bologna (vedi capitolo 7). A tale scopo sono stati disposti nel setacciatore meccanico, in ordine decrescente verso il basso, i setacci della serie ASTM a maglie quadre da 25 mm (1 pollice), 12,5 mm (1/2 pollice), 6,3 mm (1/4 pollice) e 2 mm.

Il frantumato è stato introdotto nel setacciatore a più riprese. L'apparecchiatura consentiva di setacciare circa 15-20 kg di frantumato alla volta (il contenuto di un sacco) ed è stato scelto un tempo di setacciatura pari a 10 minuti, sufficiente a garantire una buona setacciatura.

Il materiale al termine del processo di setacciatura è stato stoccato in vasche distinte a seconda della frazione granulometrica e quindi approvvigionato in sacchi.

6.6 QUALIFICAZIONE DEGLI AGGREGATI IN LABORATORIO

Per poter procedere alla progettazione di una miscela di calcestruzzo è necessario qualificare gli aggregati (figura 6.18) attraverso la distribuzione granulometrica e la caratterizzazione fisica (assorbimento d'acqua e massa volumica).

Solo disponendo di tali parametri è possibile raggiungere il miglior assortimento granulometrico, effettuare la correzione di acqua necessaria a portare gli aggregati nella condizione saturi su superficie asciutta e garantire il rapporto a/c di progetto, definire il peso di ciascuna frazione granulometrica che concorre alla composizione del calcestruzzo.

La caratterizzazione fisico – geometrica degli aggregati di riciclo avviene, così come per gli aggregati naturali, attraverso prove di laboratorio su campioni rappresentativi dell'intera fornitura.

Considerato il forte grado di eterogeneità che caratterizza gli aggregati di riciclo è consigliabile ripetere le prove con maggiore frequenza rispetto a quanto avviene per gli aggregati naturali.

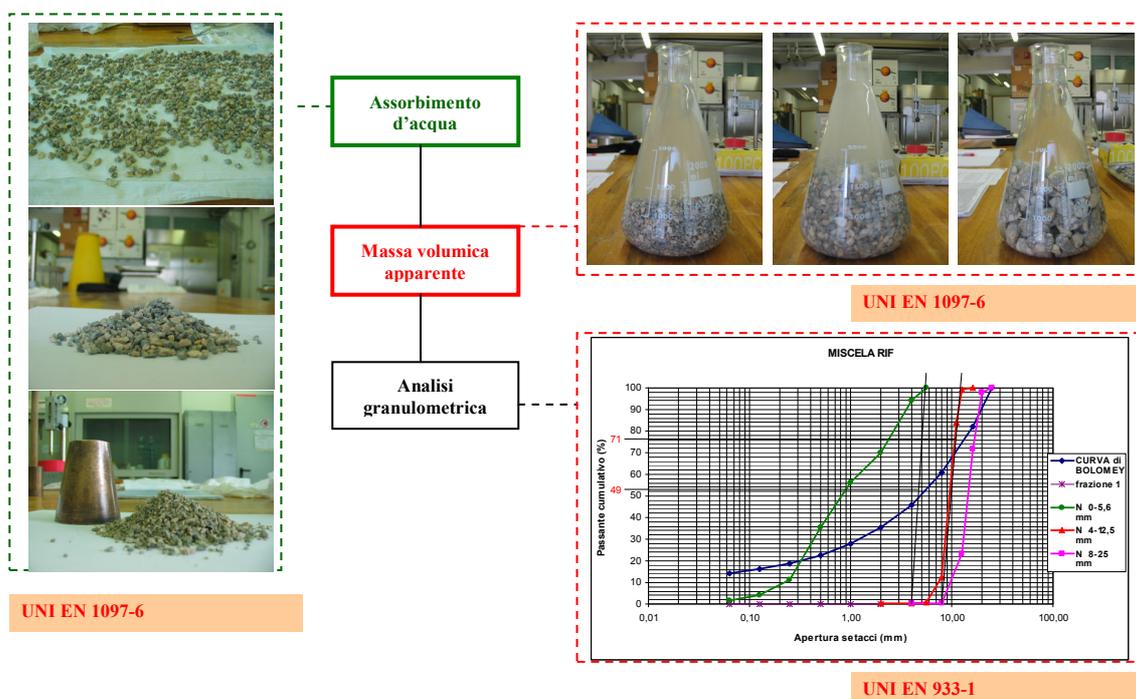


Figura 6.18: qualificazione degli aggregati in laboratorio

6.6.1. Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è stata effettuata, utilizzando un vibrosetaccio, su un campione prelevato da ciascuna frazione allo scopo di determinarne la distribuzione.

La prova è stata effettuata disponendo i setacci, opportunamente scelti in base alla frazione da analizzare, nel vibrosetaccio.

Nella tabella di figura 6.19 sono riportati i dati dell'analisi granulometrica della frazione R 0-2 mm.

Nella tabella di figura 6.20 sono riportati i dati dell'analisi granulometrica della frazione R 2-6,3 mm, dai quali si vede come in realtà la frazione sia limitata inferiormente a 1 mm e superiormente a 5,6 mm. La denominazione corretta della frazione è dunque **R 1-5,6 mm**.

Massa campione (g)		509		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
2,000	0,54	0,11	0,11	99,89
1,000	206,48	40,57	40,67	59,33
0,500	138,24	27,16	67,83	32,17
0,250	70,69	13,89	81,72	18,28
0,125	36,63	7,20	88,92	11,08
0,063	28,78	5,65	94,57	5,43
Fondo	27,32	5,37	99,94	0,06

Figura 6.19: Analisi granulometrica della frazione R 0-2 mm

Massa campione (g)		1005,00		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
5,600	5,97	0,59	0,59	99,41
4,000	367,71	36,59	37,18	62,82
2,000	592,61	58,97	96,15	3,85
1,000	37,76	3,76	99,91	0,09
0,500	0,00	0,00	99,91	0,09
Fondo	1,08	0,11	100,00	0,00

Figura 6.20: Analisi granulometrica della frazione R 1-5,6mm

Nella tabella di figura 6.21 sono riportati i dati dell'analisi granulometrica della frazione 6,3–12,5 che in realtà ha come limite inferiore 4 mm e quindi denominazione corretta **4-12,5 mm**.

Nella tabella di figura 6.22, infine, sono riportati i dati relativi all'analisi granulometrica della frazione 12,5-25. Anche in questo caso la denominazione iniziale non risulta corretta e deve essere sostituita con **R 8-25 mm**.

Massa campione (g)		1171,10		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
16,000	0,00	0,00	0,00	10,00
12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
11,200	118,36	10,11	10,11	89,89
8,000	569,16	48,60	58,71	41,29
5,600	429,84	36,70	95,41	4,59
4,000	51,57	4,40	99,81	0,19
2,000	0,00	0,00	99,81	0,19
Fondo	2,21	0,19	100,00	0,00

Figura 6.21: Analisi granulometrica della frazione R 4-12,5 mm

Massa campione (g)		1551,00		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
25,000	0,00	0,00	0,00	100,00
20,000	810,24	52,24	52,24	47,76
16,000	518,19	33,41	85,65	14,35
12,500	197,16	12,71	98,36	1,64
8,000	18,09	1,17	99,53	0,47
4,000	0,00	0,00	99,53	0,47
Fondo	7,16	0,46	99,99	0,01

Figura 6.22: Analisi granulometrica della frazione 12,5-25 mm

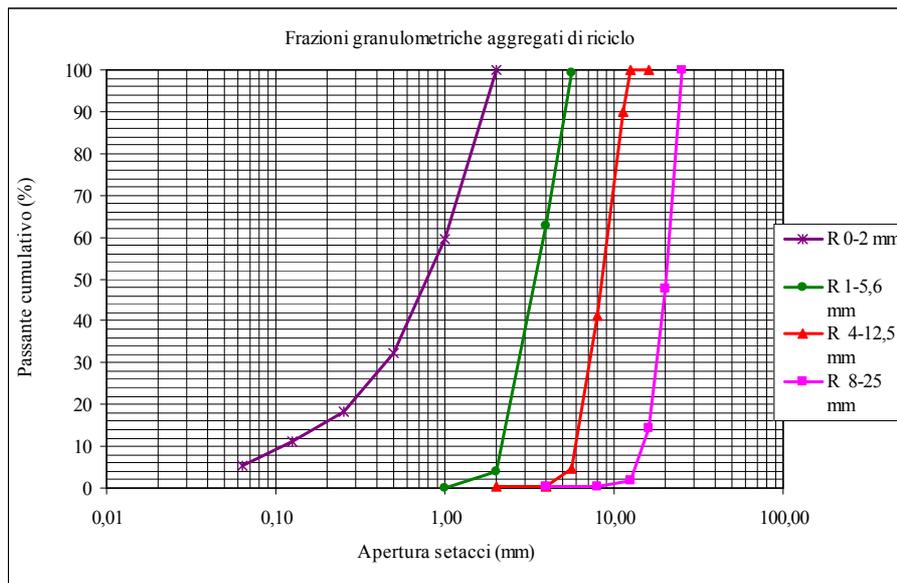


Figura 6. 23: Curve granulometriche degli aggregati di riciclo

In figura 6.23 sono riportate le curve che descrivono ciascuna frazione granulometrica analizzata.

6.6.2 Analisi della composizione del materiale

Le frazioni granulometriche ottenute dal processo di frantumazione sono state esaminate anche dal punto di vista della composizione: si è cioè valutato, mediamente, se l'aggregato di riciclo, distinto nelle diverse frazioni, era costituito da granuli di solo calcestruzzo o meno. Ad una prima analisi visiva il materiale frantumato risultava essere composto non solo da calcestruzzo, ma anche da aggregato naturale che si era, per così dire, "riformato" durante la frantumazione e da aggregato naturale caratterizzato dalla presenza di malta cementizia ad esso aderente e diversamente distribuita. Tale diversificazione dell'aggregato di riciclo risulta essere molto importante in quanto accerta l'eterogeneità dell'aggregato e quindi il diverso contributo di ciascuna porzione omogenea di grani per il calcestruzzo.

L'analisi della composizione delle frazioni granulometriche è stata effettuata separando manualmente gli aggregati di riciclo, a seconda della loro natura, in:

- grani costituiti da solo calcestruzzo;

- grani costituiti da solo aggregato naturale;
- grani costituiti da aggregato naturale e malta cementizia ad esso aderente.

Di ciascuna “classe” è stata quindi determinata la rispettiva percentuale in peso.

L’analisi è stata effettuata sulle frazioni R 1-5,6 mm, R 4-12,5 mm, R 8-25 mm. La composizione della frazione 0-2 mm non è stata analizzata per la difficoltà del riconoscimento visivo dei diversi grani.

In figura 6.24 si vede chiaramente come alcuni grani siano caratterizzati da aggregato naturale e malta cementizia ad esso aderente.

Le porzioni di prova analizzate, ottenute per quartatura, sono state pesate e suddivise nelle tre classi.

I dati relativi alla prova sono riportati nelle tabelle di figura 6.25.

La percentuale di grani, per le frazioni R 1-5,6 mm ed R 4-12,5 mm, non costituiti da solo calcestruzzo è consistente, ciò può comportare dei miglioramenti a livello delle proprietà fisiche dell’aggregato di riciclo quali l’assorbimento d’acqua e la massa volumica: gli aggregati naturali hanno infatti una maggiore massa volumica rispetto agli aggregati costituiti da calcestruzzo demolito e un minore assorbimento d’acqua.

Il fatto che l’aggregato di riciclo sia formato per una buona percentuale da un materiale di qualità “migliore” può comportare anche un miglioramento delle prestazioni del calcestruzzo.

Le percentuali di ciascuna classe sono invece rappresentate in figura 6.26.

Per la frazione R 4-12,5 mm la percentuale di grani costituiti da aggregato naturale e aggregato naturale con malta cementizia è consistente e raggiunge il 49%.



Figura 6.24: Grani costituiti da aggregato naturale e malta cementizia ad esso aderente

Massa del campione (g)		
	240,8	
R 1-5,6 mm		
Massa (g)	% in peso	
Calcestruzzo	136,41	56,6
Aggregato naturale	57,63	23,9
Aggregato naturale + malta cementizia	46,74	19,4
Massa del campione (g)		
	1005,50	
R 4-12,5 mm		
Massa (g)	% in peso	
Calcestruzzo	515,56	51,3
Aggregato naturale	282,08	28,1
Aggregato naturale + malta cementizia	207,78	20,7
Massa del campione (g)		
	1580,00	
R 8-25 mm		
Massa (g)	% in peso	
Calcestruzzo	1326,60	84,0
Aggregato naturale	172,14	10,9
Aggregato naturale + malta cementizia	80,80	5,1

Figura 6.25: Composizione delle frazioni granulometriche R 1-5,6 mm; R4-12,5 mm; R 8-25 mm

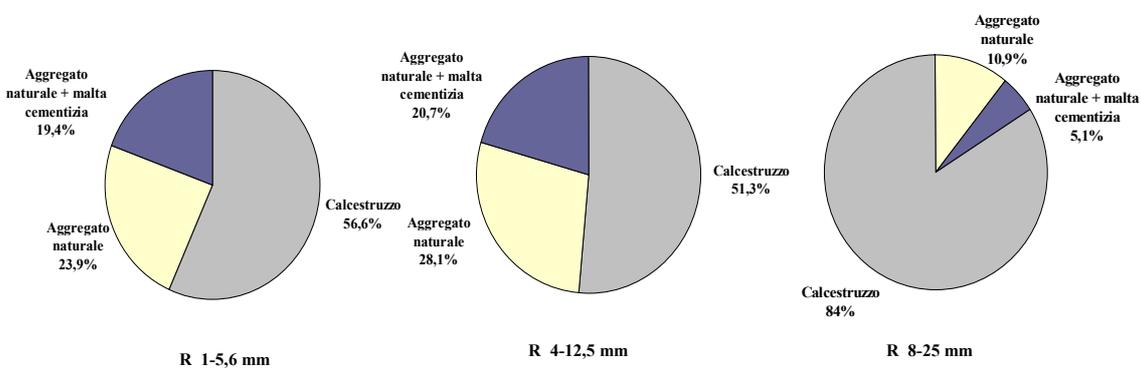


Figura 6.26: Composizione delle porzioni di prova R 1-5,6 mm, R 4-12,5 mm e R 8-25 mm

Per la frazione granulometrica 8-25 mm sono state analizzate due differenti porzioni di prova: la scelta di esaminare due diverse porzioni di prova deriva dal fatto che, per la maggiore dimensione dei granuli rispetto alle frazioni granulometriche precedentemente analizzate (R 1-5,6 e R 4-12), una sola porzione di prova risultava essere costituita da un ridotto numero di granuli. Per questo è sembrato utile analizzare due diverse porzioni di prova.

Entrambe sono state ottenute per quartatura, pesate e suddivise nelle tre classi.

Per il primo campione la percentuale di grani non costituiti da solo calcestruzzo è ridotta e raggiunge il 16 %. Tale valore è molto diverso da quello ricavato per le altre frazioni granulometriche.

I dati relativi alla seconda porzione di prova sono riportati nella tabella di figura 6.27.

Le percentuali ottenute di ciascuna classe sono invece rappresentate in figura 6.28.

Massa del campione (g)		2374,70	
	Massa (g)	% in peso	
Calcestruzzo	1788,10	75,3	
Aggregato naturale	132,38	5,6	
Aggregato naturale + malta cementizia	454,15	19,1	

Figura 6.27: Analisi della composizione della seconda porzione di prova R 8-25 mm

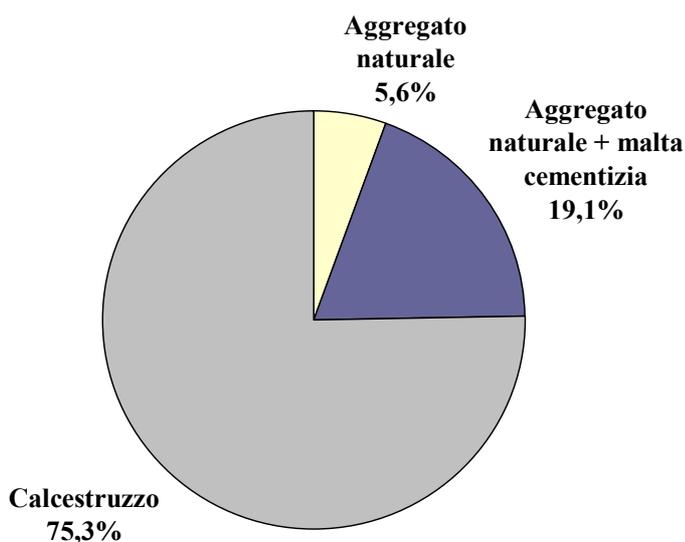


Figura 6.28: Composizione della seconda porzione di prova R 8-25 mm

Anche per il secondo campione la percentuale di grani costituiti da solo calcestruzzo è molto elevata rispetto alle altre due classi che costituiscono il 25 % in peso della porzione di prova. Pertanto per entrambi i campioni la maggior parte della porzione (più del 75%) è costituita da grani di solo calcestruzzo. La composizione della frazione R 8-25 risulta molto differente da quelle riportate per le frazioni R 1-5,6 e R 4-12,4.

È possibile quindi ipotizzare che le frantumazioni successive del materiale fanno sì che l'aggregato originario si "ricrei": in sostanza comportano una riduzione della malta cementizia (*adhered mortar*) presente sugli aggregati naturali originari, con un conseguente miglioramento delle proprietà fisiche del materiale.

6.7 CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-FISICA DEGLI AGGREGATI

La caratterizzazione chimico-fisica degli aggregati è uno strumento utile, nonché necessario, a valutare l'idoneità degli aggregati di riciclo all'utilizzo in calcestruzzi strutturali. Molto importante per la progettazione del calcestruzzo è la determinazione della massa volumica e dell'assorbimento d'acqua degli aggregati di riciclo.

E' stata determinata la massa volumica degli aggregati in condizione SSA (condizione di aggregato saturo a superficie asciutta) essendo questa la condizione convenzionale che garantisce inalterato il quantitativo d'acqua di reazione della miscela di calcestruzzo, definito dal rapporto a/c.

Se non si considerasse il valore dell'assorbimento d'acqua degli aggregati essi andrebbero, nel caso in cui il loro contenuto di umidità sia inferiore all'assorbimento d'acqua, a sottrarre acqua dalla miscela, o a cedere acqua alla miscela, nel caso abbiano un'umidità superiore a quella che definisce l'assorbimento d'acqua degli aggregati. In entrambi i casi si andrebbe ad alterare il rapporto a/c definito, con influenze negative sulle proprietà fondamentali della miscela, come la lavorabilità e la resistenza meccanica.

Gli aggregati di riciclo si caratterizzano per valori elevati di assorbimento d'acqua, dai quali si può facilmente comprendere l'importanza di una corretta valutazione del valore di assorbimento d'acqua degli aggregati di riciclo al fine di non compromettere le proprietà finali del calcestruzzo confezionato.

Per la difficoltà di valutare la condizione di aggregato saturo a superficie asciutta sulla frazione R 0-2, caratterizzata da frazioni molto fini, con conseguenti problemi di valutazione visiva della condizione di aggregato saturo su superficie asciutta, ma anche di garantire il raggiungimento contemporaneo di tale condizione per tutti i granuli, si è pensato di valutare la massa volumica e l'assorbimento d'acqua sull'unica frazione R 0-5,6: la prova è stata cioè effettuata su un unico campione composto dalle frazioni R 0-2 e R 1-5,6 nelle percentuali in peso in cui le due frazioni sono presenti nella miscela sperimentale. In tal modo l'avere un unico valore per le due frazioni non altererà quelle che saranno le reali proprietà delle frazioni all'atto della realizzazione della miscela finale. Inoltre l'avere un unico valore per la frazione R 0-5,6 consentirà un più facile confronto con l'analoga frazione di aggregato naturale (vedi capitolo 7).

La prova è stata effettuata su due diverse porzioni di prova per valutare se queste, seppur ugualmente composte, presentassero differenti valori di assorbimento d'acqua. Esse sono state immerse in acqua per 24 ore, in entrambi i casi all'atto dell'immersione l'acqua appariva torbida per la presenza della frazione finissima.

Le porzioni di prova sature sono quindi state estratte dai secchi. La determinazione della massa volumica e dell'assorbimento d'acqua sono state svolte in accordo alle norme UNI EN 1097-6.

Per valutare l'assorbimento d'acqua le porzioni di prova sono state trasferite in vasche nelle quali sono state distribuite uniformemente e mescolate ripetutamente al fine di favorire l'evaporazione uniforme dell'umidità superficiale.

Secondo la UNI EN 1097-6 il raggiungimento della condizione di aggregato saturo a superficie asciutta deve essere valutato mediante uno stampo conico metallico in cui una piccola porzione di prova viene inserita e pestellata leggermente, successivamente il cono deve essere sollevato leggermente.

Si considera raggiunta la condizione di aggregato saturo su superficie asciutta se “si osserva un collasso pressoché completo del materiale, però è visibile un picco centrale e la superficie conica è rettilinea” (figura 6.18).

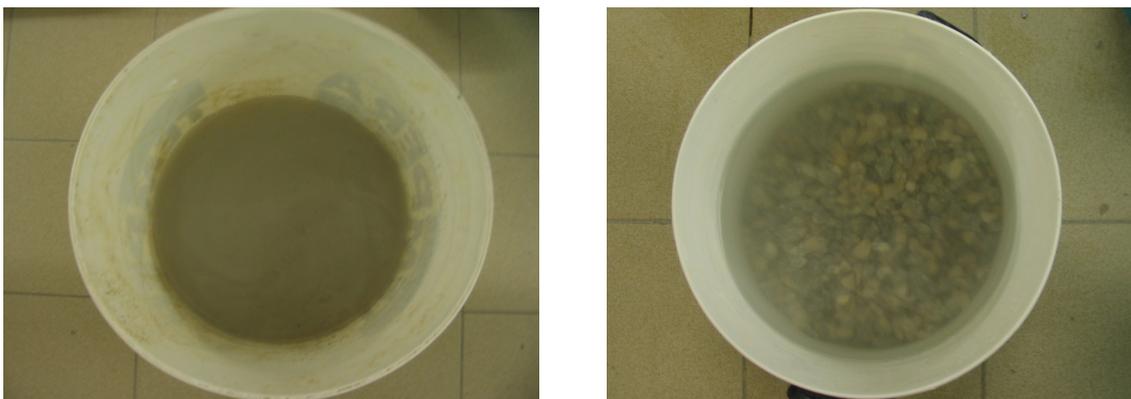


Figura 6.29: Porzioni di prova, R 0-5,6 e R 8-25, durante la saturazione

Sulla frazione R 4-12,5 è stata effettuata la prova di determinazione di massa volumica e assorbimento d'acqua su un'unica porzione di prova.

All'atto dell'immersione della porzione di prova, l'acqua appariva meno torbida che nel caso della frazione R 0-5,6.

Dopo avere effettuato le pesate necessarie a determinarne il volume, la porzione di prova è stata trasferita su panni puliti e asciutti e distribuite in uno strato di spessore pari ad un solo granulo fino al raggiungimento della condizione di aggregato saturo su superficie asciutta. Nel caso di aggregati di dimensioni comprese tra 4 e 31,5 mm si considera raggiunta tale condizione quando "ogni visibile film d'acqua sia scomparso, ma l'aggregato conservi ancora un aspetto umido".

Anche per la frazione R 8-25 la prova è stata effettuata su un'unica porzione di prova.

All'atto dell'immersione della porzione di prova l'acqua appariva limpida (figura 6.29).

Le proprietà fisiche ottenute per le frazioni analizzate sono riportate nella tabella di figura 6.30.

Frazione	ρ_{SSA} (t/m ³)	AA%
R 0-5,6	2,32	15,18
R 4-12,5	2,38	7,16
R 8-25	2,33	8,21

Figura 6.30: Proprietà fisiche dell'aggregato di riciclo

Il maggiore assorbimento d'acqua della frazione R 8-25, circa il 14%, rispetto all'assorbimento d'acqua della frazione R 4-12,5 può essere imputata alla diversa composizione del materiale. La frazione R 8-25 risulta essere costituita, in riferimento ai dati riportati al paragrafo 6.6.2, da una percentuale del 75,3÷84% da grani di solo calcestruzzo, contro il 51% della frazione R 4-12,5, e del 6÷11% da aggregato naturale, contro il 28% della frazione R 4-12,5: l'assorbimento dei grani di solo calcestruzzo è per la presenza della malta cementizia più elevato rispetto a quello degli aggregati naturali. Per le stesse ragioni la frazione R 4-12,5 presenta una massa volumica più alta rispetto alla frazione R 8-25.

Conoscere il quantitativo di sali presenti negli aggregati è importante in quanto essi possono influenzare negativamente la proprietà del calcestruzzo. Per questo la normativa stabilisce dei limiti alla concentrazione dei sali, e di altre impurità, in modo che non vengano compromesse le proprietà finali della miscela.

Nel caso in esame si è ritenuto opportuno valutare il quantitativo di cloruri, in quanto gli aggregati provengono da un edificio situato in ambiente marino in prossimità della battigia.

I cloruri costituiscono un pericolo per il calcestruzzo in quanto possono velocizzare il processo di corrosione della armatura alterando lo strato di ossido protettivo passivante (vedi capitolo 5).

I solfati sono invece dannosi in quanto possono innescare reazioni con gli alluminati causando la formazione di ettringite, o sale di Candlot, con conseguente espansione di volume.

La determinazione dei sali è stata effettuata mediante cromatografia ionica, una tecnica che consente di riconoscere i diversi sali presenti nel campione attraverso l'analisi della soluzione salina da esso ottenuta immergendo il campione finemente macinato in acqua distillata bollente e filtrando successivamente la soluzione ottenuta. Il cromatografo rilascia gli ioni salini presenti nel filtrato in tempi differenti a seconda della loro natura e consente di definire i quantitativi presenti per ciascun tipo di sale in base alle variazioni di conducibilità elettrica misurate.

Per la sperimentazione è stato utilizzato lo *Ion Chromatography System*, modello ICS-1000, della Dionex che ha permesso di determinare la concentrazione di solfati, cloruri, nitrati e nitriti.

La prova è stata effettuata su due campioni (RA1 e RA2) prelevati dal frantumato di calcestruzzo e appartenenti ad una più estesa campagna sperimentale volta a determinare anche lo stato di degrado del calcestruzzo (capitolo 5).

Nella tabella di figura 6.31 sono riportati i dati relativi alla determinazione dei quantitativi di sali nei campioni RA1 e RA2.

I quantitativi di sali presenti nei campioni rientrano entro i limiti consentiti dalla norma UNI 8520-2 all'interno degli aggregati per calcestruzzo. Solo nel campione RA2 il contenuto di solfati eccede (0,29%) rispetto a quello previsto dalla UNI EN 8520-2 (0,2%).

		Quantitativo di sale in ppm m_p (mg/l)	Volume filtrato- v_f (l)	Volume di sale presente nel filtrato (l)	Massa di sale presente nel campione macinato (g)	Massa del campione macinato (g)	% sale
RA1	cloruri	8,8382	0,0193	0,1706	0,0001706	1,743	0,01
	solfati	157,2006		3,0340	0,003034		0,17
	nitrati	3,1615		0,0610	0,000061		0,003
	nitriti	0,3376		0,0065	0,000007		0,00037
RA2	cloruri	10,5149	0,0250	0,2629	0,0002629	1,954	0,013
	solfati	228,5364		5,7134	0,0057134		0,29
	nitrati	3,7565		0,0939	0,000094		0,005
	nitriti	1,3908		0,0348	0,0000348		0,0017

Figura 6.31: Dati relativi alla determinazione dei quantitativi di sali nei campioni

La UNI EN 8520-2 non prevede invece limiti al contenuto di nitrati e nitriti negli aggregati per calcestruzzo. Alla luce dei risultati ottenuti si può ragionevolmente affermare che la presenza di sali all'interno degli aggregati provenienti dalle macerie di Punta Perotti non costituisca un limite al loro utilizzo nella produzione di calcestruzzi strutturali.

7. GLI AGGREGATI NATURALI

Gli aggregati naturali, utilizzati per confezionare il calcestruzzo di riferimento per la sperimentazione sviluppata in questa tesi, sono stati gentilmente forniti dalla Cave Pederzoli di Bologna.

Tra gli aggregati messi a disposizione dalle Cave Pederzoli sono state scelte tre frazioni granulometriche, con distribuzioni confrontabili con le frazioni granulometriche degli aggregati di riciclo e normalmente vendute per il confezionamento del calcestruzzo:

- sabbia grossa 0-6 (figura 7.1);
- pietrischetto 8-12;
- pietrisco 12-22.

Il materiale direttamente prelevato in cava è stato approvvigionato in sacchi, depositati presso i laboratori del DICASM.

Procedendo allo stesso modo degli aggregati di riciclo, la qualificazione dell'aggregato naturale è consistita nell'effettuare le analisi granulometriche e nel determinare le proprietà fisiche del materiale (massa volumica SSA e assorbimento d'acqua) delle tre frazioni scelte.



Figura 7.1: Prelievo della sabbia 0-6 dal cumulo presso la cava e porzione di prova

7.1 ANALISI GRANULOMETRICA

Gli aggregati forniti, accompagnati da certificato di prova relativo alla distribuzione granulometrica nominale di ciascuna frazione merceologica e rilasciato al fornitore da un laboratorio di prova riconosciuto, sono stati sottoposti ad analisi granulometrica per definire la distribuzione reale di ciascuna frazione naturale utilizzata per confezionare il calcestruzzo di riferimento e per verificare che le denominazioni delle frazioni fossero corrispondenti.

Gli aggregati naturali utilizzati sono ottenuti per frantumazione e sono stati sottoposti a trattamento di lavaggio, pertanto risultano spigolosi così come gli aggregati di riciclo, anch'essi ottenuti per frantumazione.

Le porzioni di prova analizzate, ottenute per quartatura, sono state pesate e introdotte nel vibrosetaccio per effettuare la prova.

Nella tabella di figura 7.2 sono riportati i dati dell'analisi granulometrica della frazione 0-6 mm.

Il trattenuto al setaccio 5,6 mm si può ritenere trascurabile perciò la frazione può essere rinominata sabbia N 0-5,6 mm.

Nella tabella di figura 7.3 sono riportati i dati relativi all'analisi granulometrica del pietrischetto. Anche in questo caso la denominazione iniziale non risulta corretta e deve essere sostituita con N 4-12,5 mm.

Nella tabella di figura 7.4, infine, sono riportati i dati dell'analisi granulometrica del pietrisco. La presenza di un trattenuto del 2%, che non può essere ritenuto trascurabile, al setaccio da 22 mm comporta la necessità di definire con precisione la dimensione massima degli aggregati.

Per questo motivo le dimensioni di alcuni grani sono state determinate per misura diretta con il calibro. Essendo la frazione denominata originariamente pietrisco 12-22, si voleva verificare quale fosse la dimensione massima dell'aggregato, che ad una analisi visiva sembrava essere maggiore di 22 mm. Sono quindi state misurate le dimensioni di alcuni grani lungo tre direzioni tra loro ortogonali (figura 7.5).

Massa campione (g)		693,00		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
5,600	0,00	0,00	0,00	100,00
4,000	40,54	5,85	5,85	94,15
2,000	166,05	23,96	29,81	70,19
1,000	96,09	13,87	43,68	56,32
0,500	144,33	20,83	64,50	35,50
0,250	168,65	24,34	88,84	11,16
0,125	49,20	7,10	95,94	4,06
0,063	18,03	2,60	98,54	1,46
Fondo	10,20	1,47	100,00	0,00

Figura 7.2: Analisi granulometrica della frazione R 0-5,6mm

Massa campione (g)		1677,00		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
16,000	0,00	0,00	0,00	100,00
12,500	10,54	0,63	0,63	99,37
11,200	255,82	15,25	15,88	84,12
8,000	1199,30	71,51	87,40	12,60
5,600	198,60	11,84	99,24	0,76
4,000	7,57	0,45	99,69	0,31
2,000	0,00	0,00	99,69	0,31
Fondo	5,17	0,31	100,00	0,00

Figura 7.3: Analisi granulometrica della frazione N 4-12,5 mm

Il diametro massimo medio risulta di poco superiore a 25 mm. La denominazione originale, N 12-22, non risulta corretta e può essere sostituita con N 8-25 mm in quanto la frazione è limitata inferiormente agli 8 mm (passante cumulativo del 0,35%) .

Le curve granulometriche dei passanti cumulativi relativi alle tre frazioni analizzate sono rappresentate in figura 7.6.

Massa campione (g)		1762,00		
Apertura setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto (%)	Trattenuto cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
25,000	0,00	0,00	0,00	100,00
20,000	34,42	1,95	1,95	98,05
16,000	467,80	26,55	28,50	71,50
12,500	847,22	48,08	76,59	23,41
8,000	406,47	23,07	99,65	0,35
4,000	0,20	0,01	99,67	0,33
Fondo	5,47	0,31	100,00	0,00

Figura 7.4: Analisi granulometrica della frazione N 12-22 mm

N	a (cm)	b (cm)	c (cm)
1	25,98	26,11	15,36
2	26,66	23,15	9,33
3	23,35	21,20	17,44
4	25,78	15,30	11,24
5	23,74	23,30	15,73
Valori medi	25,10	22,14	13,51

Figura 7.5: Misure dei granuli misurati con il calibro relativi al pietrisco

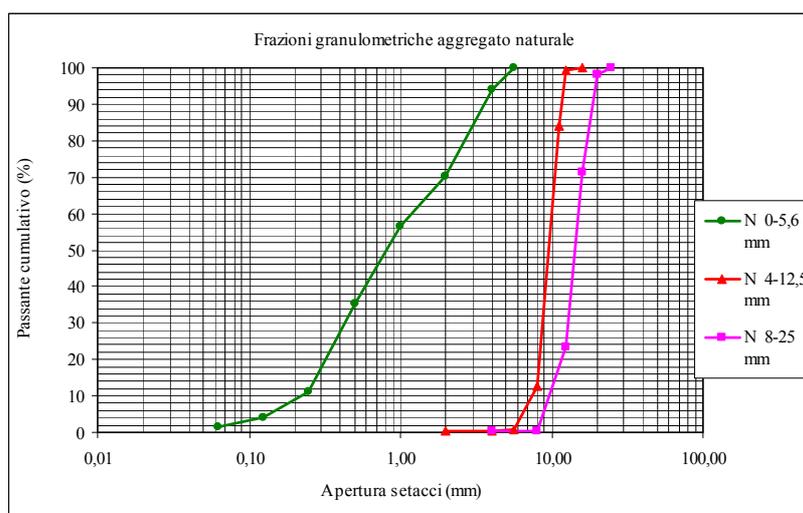


Figura 7.6: Curve granulometriche degli aggregati naturali

7.2 CARATTERIZZAZIONE FISICA DEGLI AGGREGATI

Gli aggregati naturali presentano per ciascuna frazione analizzata valori di assorbimento d'acqua (AA%) molto più bassi rispetto alle corrispondenti frazioni di aggregato di riciclo.

Più alti sono invece i valori di massa volumica (ρ_{SSA}) degli aggregati naturali rispetto agli aggregati di riciclo.

Nella tabella di figura 7.7 sono riportati i risultati.

	ρ_{SSA} (t/m ³)	AA%
N 0-5,6 mm	2,63	2,91
N 4-12,5 mm	2,63	1,08
N 8-25 mm	2,62	0,99

Figura 7.7: Proprietà fisiche degli aggregati naturali

8. CALCESTRUZZI STRUTTURALI SOSTENIBILI

L'obiettivo della campagna sperimentale è stato quello di saggiare il comportamento di calcestruzzi strutturali confezionati con aggregato di riciclo provenienti dal trattamento delle macerie prodotte con la demolizione del complesso edilizio di Punta Perotti (Bari, 2006) ed utilizzato in percentuali superiori a quelle attualmente imposte dalla Norme Tecniche per le Costruzioni per aggregati di riciclo derivanti dalla demolizione di solo calcestruzzo.

La possibilità di utilizzare gli aggregati di riciclo nel calcestruzzo rappresenta una importante tendenza verso gli attuali obiettivi generali di salvaguardia dell'ambiente e rispetto del territorio. Lo studio ha in particolare lo scopo di verificare se il calcestruzzo, confezionato con aggregati riciclati in sostituzione di quelli naturali, possa costituire un esempio di nuovo materiale da costruzione "sostenibile" che garantisca soddisfacenti prestazioni in termini di sicurezza e funzionalità.

A partire dalla ricetta con soli aggregati naturali sono state progettate le altre miscele confezionate sostituendo, totalmente o parzialmente, le frazioni granulometriche naturali con le corrispondenti frazioni granulometriche riciclate.

Per tutte le ricette sono state tenute fisse le quantità di cemento e di acqua, in modo che i risultati relativi a ciascuna miscela fossero poi più facilmente correlabili.

La sostituzione degli aggregati è avvenuta facendo riferimento alla curva teorica di Bolomey [60], quindi si è cercato il migliore assortimento fra le diverse frazioni granulometriche che di volta in volta concorrevano alla composizione del calcestruzzo considerando sempre come riferimento 1 m^3 di calcestruzzo.

Si è cercato inoltre di minimizzare i problemi associati all'elevato assorbimento d'acqua degli aggregati di riciclo, causa di numerosi problemi, attraverso la pre-saturazione degli stessi.

Le miscele confezionate sono le seguenti:

- una miscela di riferimento (**RIF B**) confezionata con solo aggregato naturale;

- una miscela (**R100 B**) confezionata con solo aggregato di riciclo e stessa metodologia di produzione della miscela di riferimento;
- miscela (**R100 BI**) confezionata con solo aggregato di riciclo e differente metodologia di produzione rispetto alle miscele precedenti per la pre-saturazione degli aggregati;
- miscela (**R51 BI**) confezionata con il 51% di aggregato di riciclo (frazione grossa) e stessa metodologia di impasto della miscela R100 BI.

Gli aggregati naturali, gentilmente forniti dalle Cave Pederzoli di Bologna, differiscono dagli aggregati di riciclo principalmente per le proprietà fisiche di massa volumica SSA e assorbimento d'acqua (figura 8.1).

Frazione granulometrica	ρ_{SSA} (t/m ³)	AA%
N 0-5,6	2,63	2,91
R 0-5,6	2,32	15,18
N 4-12,5	2,63	1,08
R 4-12,5	2,38	7,16
N 8-25	2,62	0,99
R 8-25	2,33	8,21

Figura 8.1: Confronto tra le proprietà fisiche degli aggregati naturali e di riciclo

La minore densità degli aggregati di riciclo rispetto a quelli naturali è dovuta alla presenza della malta cementizia, di minore densità rispetto agli aggregati naturali originari cui è aderente.

8.1 MISCELE

Per un significativo confronto tra le diverse miscele prodotte si sono mantenuti fissi i seguenti parametri:

- rapporto acqua/cemento (a/c);
- quantità di cemento;

- stesso tipo di cemento;
- condizioni identiche di getto e stagionatura.

Il diametro massimo dell'aggregato è stato fissato pari a $D_{max}=25$ mm, le diverse frazioni sono quindi state combinate secondo la curva di Bolomey, assunta come riferimento, per determinare le percentuali in peso di ciascuna frazione granulometrica sul totale di aggregati.

La miscela RIF B è stata confezionata con solo aggregato naturale, la combinazione delle tre frazioni granulometriche (N 0-5.6; N 4-12.5; N 8-25) è riportata in figura 8.2.

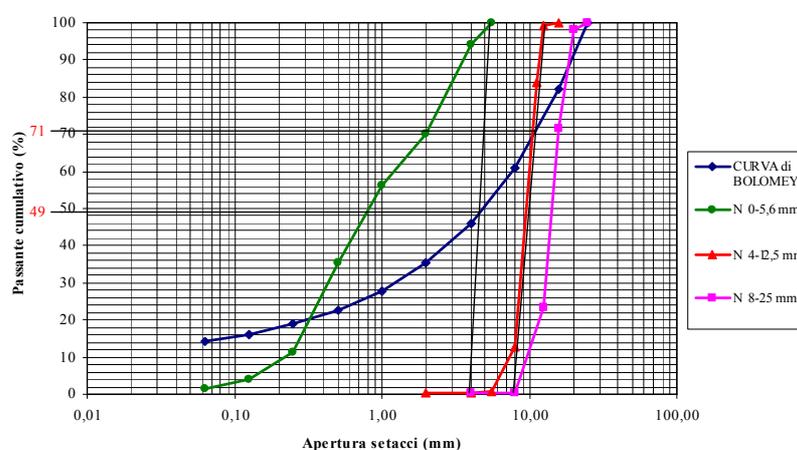


Figura 8.2: Combinazione delle tre frazioni granulometriche di aggregato naturale-miscela RIF B

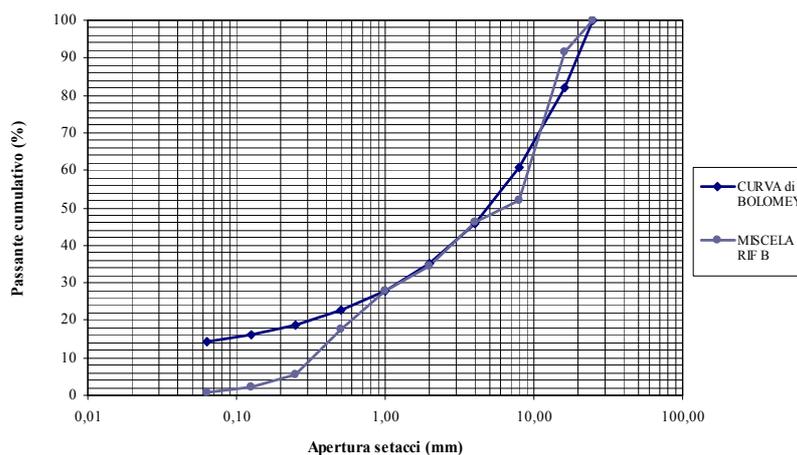


Figura 8.3: Scostamento della combinazione degli aggregati naturali dalla curva di Bolomey-miscela RIF B

La curva combinata, rappresentativa della combinazione degli aggregati nella miscela RIF B, è rappresentata in figura 8.3 insieme alla curva di Bolomey in modo da evidenziare lo scostamento della curva “reale” da quella teorica. La curva combinata risulta essere carente di fini: lo scostamento dalla curva teorica è del 5% circa a 0,5 mm e raggiunge il 14% in corrispondenza di 0,125 mm.

La miscela R100 B è stata confezionata con solo aggregato di riciclo ed è stata preparata mediante lo stesso procedimento di miscelazione seguito per la miscela di riferimento. La produzione di questa miscela è stata utile alla messa a punto della metodologia di impasto e ha consentito delle prime valutazioni sugli aspetti di lavorabilità del calcestruzzo fresco con soli aggregato di riciclo.

La combinazione delle frazioni granulometriche utilizzate è riportata in figura 8.4.

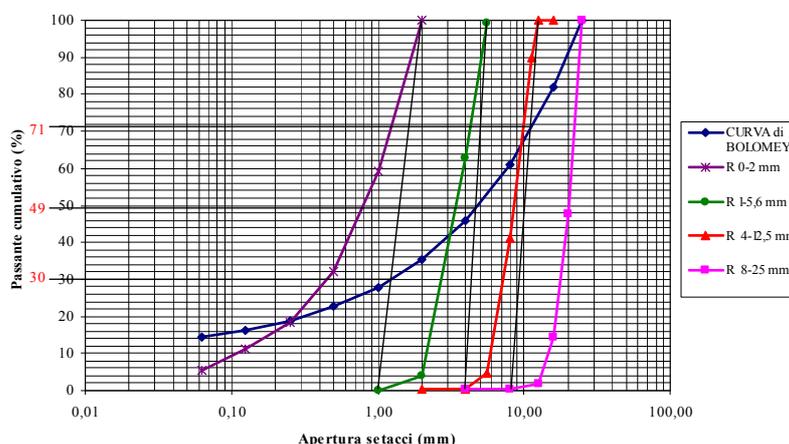


Figura 8.4: Combinazione delle quattro frazioni granulometriche di aggregato di riciclo-miscela R100 B e R100 BI

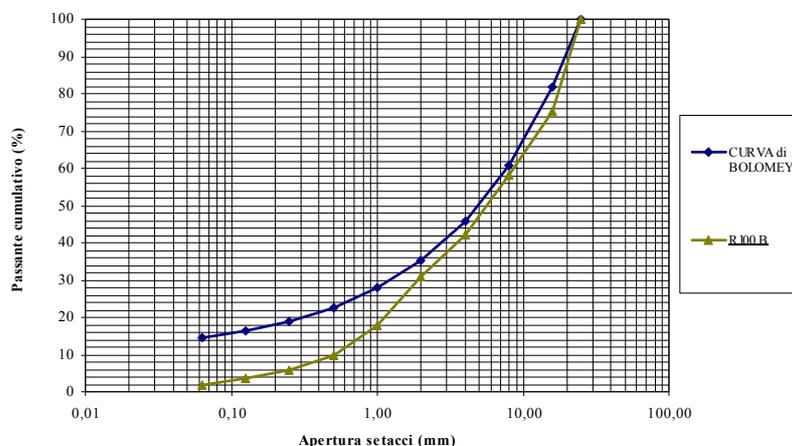


Figura 8.5: Scostamento della combinazione degli aggregati dalla curva di Bolomey- miscela R100 B

La curva combinata degli aggregati è riportata in figura 8.5.

La curva combinata risulta essere carente di fini: lo scostamento dalla curva teorica è del 9% circa ad 1 mm fino a raggiungere il 12% circa tra 0,5 mm e 0,063 mm.

La miscela R100 BI è stata confezionata con solo aggregato di riciclo e con una metodologia di impasto differente rispetto a quella utilizzata per la miscela di riferimento. Sulla base delle osservazioni fatte per la miscela R100 B si è infatti pensato di pre-saturare gli aggregati, ovvero di miscelarli, prima delle operazioni di impasto con gli altri ingredienti, con il solo quantitativo di acqua necessario a portarli in condizione SSA. Tramite questa operazione si vuole facilitare l'assorbimento d'acqua degli aggregati di riciclo. Le quattro frazioni di aggregato di riciclo sono state combinate secondo quanto specificato precedentemente (figura 8.4).

La miscela R51 BI è stata confezionata utilizzando come aggregato grosso (frazione 4-25 mm) l'aggregato di riciclo e come aggregato fine (frazione 0-5,6 mm) l'aggregato naturale (sabbia), in quanto da precedenti ricerche è emerso che la frazione fine è la più debilitante per il calcestruzzo con aggregati di riciclo. Per il confezionamento della miscela è stata utilizzata la seconda metodologia di impasto, che prevede una fase preliminare di pre-saturazione.

Le frazioni utilizzate per il confezionamento della miscela R51 BI sono state:

- sabbia naturale N 0-5,6 mm;
- frantumato di riciclo R 4-12,5 mm;
- frantumato di riciclo R 8-25 mm.

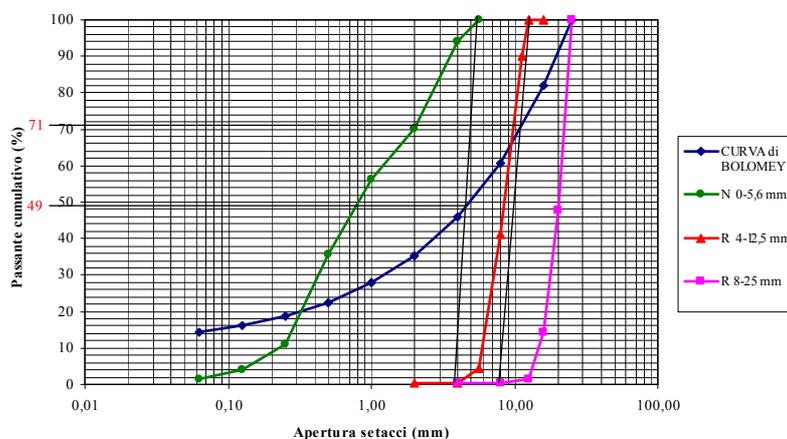


Figura 8.6: Combinazione delle frazioni granulometriche-miscela R51 BI

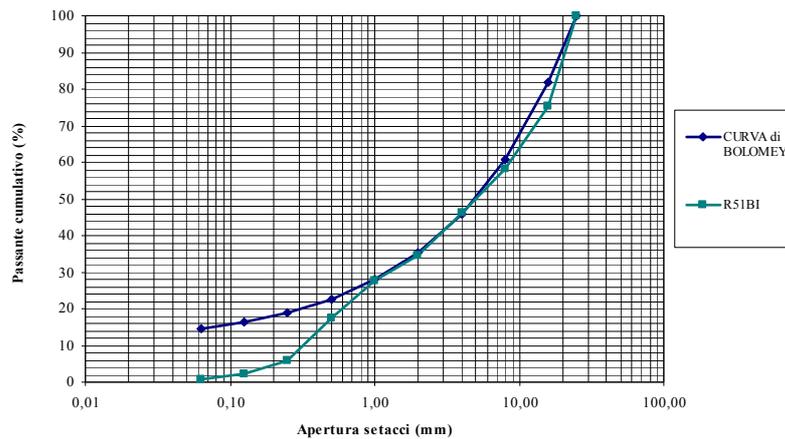


Figura 8.7: Scostamento della combinazione degli aggregati dalla curva di Bolomey- miscela R51 BI

La figura 8.6 mostra la combinazione degli aggregati, mentre in figura 8.7 si riporta la curva combinata. Anche in questo caso la curva risulta essere carente di fini in particolare al di sotto di 0,5 mm cui corrisponde uno scostamento dalla curva teorica del 5% circa. Al di sotto di 0,5 mm lo scostamento cresce sino a raggiungere il 14% in corrispondenza di 0,125 mm.

Note le percentuali in peso e le densità delle varie frazioni granulometriche si sono potute calcolare le masse totali degli aggregati relativi ad un volume fisso e si è potuto procedere alla definizione delle miscele seguendo il metodo di progettazione dei volumi assoluti. Le caratteristiche degli impasti per quanto riguarda il rapporto a/c, il tipo e il dosaggio degli inerti, il superfluidificante e la scelta del tipo di cemento sono indicate in Figura 8.8.

I quantitativi di aggregato sono riferiti agli aggregati in condizione SSA, difficilmente corrispondente alla reale condizione degli aggregati. È stato quindi necessario valutare il loro tenore di umidità (U.R. %) al momento dell'impasto in modo da apportare le adeguate correzioni al quantitativo d'acqua definito dal rapporto a/c e definire il quantitativo reale di ciascuna frazione da utilizzare nella miscela.

Miscele di calcestruzzo riferite a 1 m³				
Componenti [Kg]	RIF B	R100 B	R100 BI	R51 BI
Cem 42.5R Tipo II/A-L	350,00	350,00	350,00	350,00
Acqua	175,00	175,00	175,00	175,00
a/c	0,50	0,50	0,50	0,50
c/A	0,19	0,22	0,22	0,20
N 0-5.6	892,98	-	-	842,85
N 4-12.5	400,93	-	-	-
N 8-25	528,50	-	-	-
R 0-2	-	471,10	484,60	-
R 1-5.6	-	298,36	306,91	-
R 4-12.5	-	345,47	355,37	378,42
R 8-25	-	455,40	468,45	498,83
Aggregati	1.822,41	1.570,33	1.615,33	1.720,10
Superfluidificante	4,17	4,17	4,17	4,17
Miscela	2.351,58	2.099,50	2.144,50	2.249,27
% Riciclato	0%	100%	100%	51%

Figura 8.8: composizione delle miscele riferite a 1 m³ di calcestruzzo

8.2 PROCESSO DI MISCELAZIONE

Gli impasti sono stati confezionati seguendo due differenti processi di produzione, il primo (tipo A) è caratterizzato dalle seguenti operazioni:

- 5 minuti di miscelazione dei soli aggregati;
- 1 minuto di miscelazione degli aggregati con il cemento;
- 1 minuto di miscelazione degli aggregati e del cemento con l'acqua (formazione della pasta);
- 5 minuti di miscelazione con l'additivo superfluidificante.

Il secondo processo di produzione (tipo B) è caratterizzato dalle seguenti operazioni:

- 15 minuti di pre-saturazione degli aggregati con il quantitativo d'acqua necessario a portarli in condizione SSA;

- 1 minuto di miscelazione degli aggregati con il cemento;
- 1 minuto di miscelazione degli aggregati e del cemento con l'acqua definita dal rapporto a/c (formazione della pasta);
- 5 minuti di miscelazione con il superfluidificante.

Al termine delle operazioni di impasto è stata effettuata la prova di lavorabilità e successivamente sono stati confezionati i cubetti.

Ciascun cubetto è stato vibrato, per garantire una distribuzione omogenea dell'impasto all'interno della cubettiera, e rasato.

La stagionatura dei cubetti è avvenuta all'interno di vasche a livello di umidità controllata.

Le miscele RIF B ed R100 B sono state confezionate secondo il processo di produzione tipo A, questa metodologia ha evidenziato due limiti durante la preparazione della miscela R100 B: un abbondante produzione di polveri (figura 8.9) ed un eccesso di acqua nell'impasto.

L'acqua è stata introdotta in betoniera tutta in una volta (introduzione contemporanea del quantitativo d'acqua definito dal rapporto a/c e dell'acqua necessaria a portare gli aggregati in condizione SSA), successivamente all'introduzione in betoniera degli aggregati e del cemento. Questo modo di operare impedisce, nel breve periodo, un corretto assorbimento d'acqua da parte degli aggregati di riciclo e porta ad un conseguente eccesso di acqua nella miscela, visibilmente caratterizzata da un eccesso di

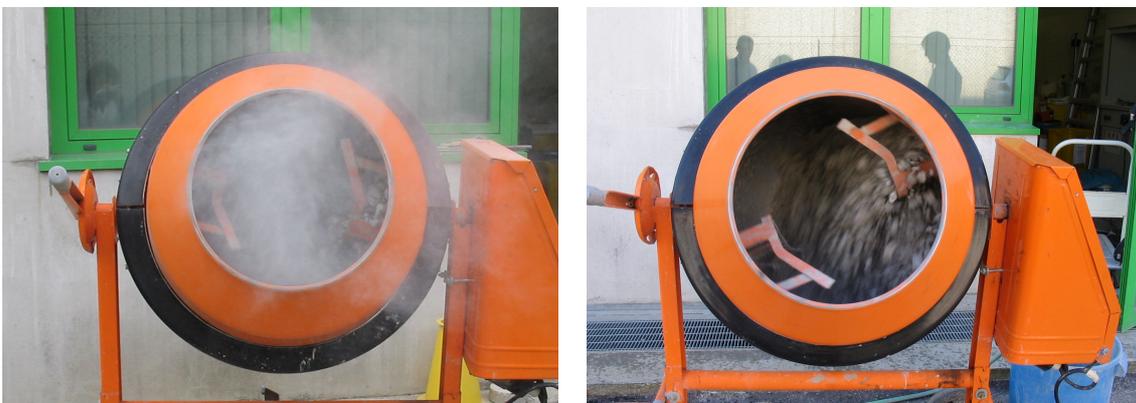


Figura 8.9: Miscelazione tipo A e tipo B: rilascio di polveri

acqua, con alterazione del rapporto a/c di progetto. La formazione della pasta cementizia potrebbe ostruire la porosità aperta degli aggregati e creare una sorta di effetto “tampono” (figura 8.10) tale da ostacolare l’assorbimento d’acqua da parte degli aggregati di riciclo nell’immediato.

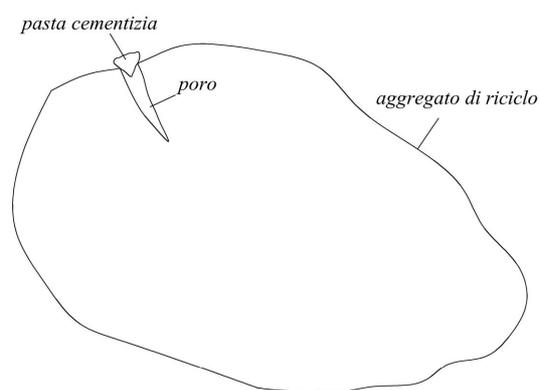


Figura 8.10: Effetto “tampono”

Al termine delle operazioni di miscelazione sono state effettuate le prove sul calcestruzzo fresco e quindi confezionati i cubetti.

La miscela R100 BI è stata confezionata seguendo la metodologia di impasto tipo B, che si differenzia dalla precedente per una fase preliminare di pre-saturazione degli aggregati, ovvero una fase di miscelazione degli aggregati con il solo quantitativo d’acqua necessario a portarli in condizione SSA.

Lo scopo di questo accorgimento è quello di far sì che gli aggregati assorbano quanta più acqua possibile per il raggiungimento della condizione SSA evitando così l’alterazione del rapporto a/c definito in fase di progettazione.

Per valutare gli effetti della pre-saturazione è stata preparata a mano una miscela di prova in quantità ridotta.

Gli aggregati sono stati miscelati con la correzione d’acqua per 15 minuti, al termine dei quali alcuni aggregati grossi non risultavano avere ancora assorbito completamente l’acqua (figura 8.11).

Il fatto che gli aggregati, nonostante i 15 minuti di pre-saturazione, non avessero assorbito uniformemente l’acqua sta proprio a evidenziare la difficoltà degli aggregati di raggiungere la condizione SSA.



Figura 8.11: Aggregati al termine della pre-saturazione

Le ragioni sono da ricercare nell'eterogeneità che caratterizza anche il singolo aggregato, pertanto localmente si possono avere, a differenza di quanto avviene per gli aggregati naturali (omogenei), caratteristiche fisiche molto diverse (figura 8.12).

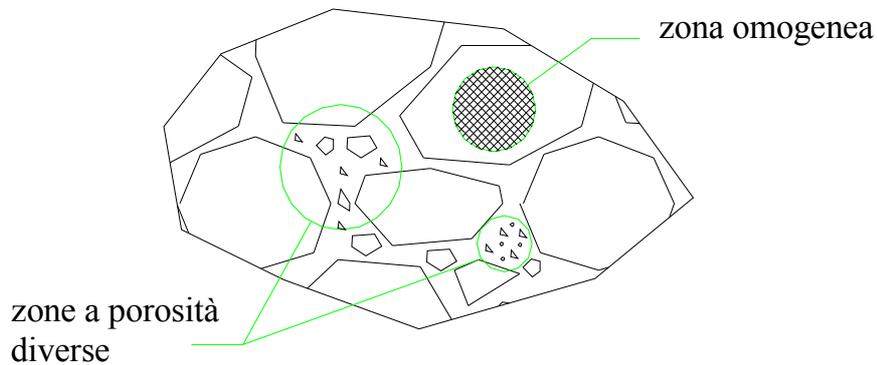


Figura 8.12: Eterogeneità di un singolo aggregato di riciclo

Attraverso la pre-saturazione in fase di produzione della miscela in betoniera si è riscontrato un vantaggio in termini di abbattimento delle polveri (figura 8.9). Al termine della fase di pre-saturazione degli aggregati sono stati analizzati alcuni granuli. Sugli aggregati grossi si è riscontrato un fenomeno, definito come effetto “cortina”, in quanto essi risultavano ricoperti dall'aggregato fine in modo uniforme, come a formare un rivestimento attorno ad essi (figura 8.13).



Figura 8.13: Effetto “cortina” a sinistra aggregato grosso miscela R100 BI a destra aggregato grosso miscela R51 BI

La miscela R51 BI è stata confezionata secondo la metodologia di impasto messa a punto per la miscela R100 BI, che prevede la fase di pre-saturazione degli aggregati. Come nel caso della miscela R100 BI, prima di confezionare la miscela è stata preparata una piccola miscela di prova per valutare qualitativamente eventuali differenze rispetto alla miscela R100 BI e valutare l’influenza della frazione fine naturale sulla qualità del calcestruzzo fresco.

Rispetto alla miscela R100 BI la miscela R51 BI (figura 8.14) risulta meno “bagnata” pur avendo lo stesso rapporto a/c e gli stessi quantitativi di cemento e di superfluidificante. Si può ipotizzare che questo sia dovuto al maggiore quantitativo d’acqua introdotto complessivamente nella miscela R100 BI e alla difficoltà di assorbimento d’acqua da parte degli aggregati di riciclo. Probabilmente i 15 minuti di pre-saturazione non sono stati sufficienti, per la miscela R100 BI, al completo assorbimento dell’acqua necessaria a portarli in condizione SSA da parte degli aggregati di riciclo: questo può aver indotto un eccesso d’acqua nella miscela, che risulta quindi più fluida rispetto alla R51 BI.

Nel caso della miscela R51 BI la presenza della sabbia naturale fa sì che questo problema sia ridotto in quanto il suo minor assorbimento permette di ridurre il quantitativo d’acqua presente complessivamente nella miscela.



Figura 8.14: Miscela di prova al termine del confezionamento a sinistra miscela R100 BI a destra R51 BI

Gli aggregati sono stati sottoposti ai 15 minuti di pre-saturazione, al termine della quale sono stati analizzati alcuni aggregati grossi come per la miscela R100 BI. Su di essi non è stato riscontrato l'“effetto cortina” osservato nel caso della miscela R100 BI: la sabbia naturale, a differenza di quella di riciclo, non aveva ricoperto l'aggregato grosso formando un rivestimento visibile su di esso (figura 8.13). Ciò può essere dovuto alla diversa natura dell'aggregato fine.

Il ridotto assorbimento d'acqua della sabbia naturale rispetto alla corrispettiva frazione di riciclato fa sì che la correzione d'acqua (ΔH_2O) sia limitata rispetto a quella richiesta dalla miscela R100 BI. Questo è un vantaggio in quanto limita il contenuto d'acqua della miscela e riduce il rischio che questa non venga assorbita completamente dagli aggregati, rimanendo sottoforma di acqua libera nell'impasto e alterando il rapporto a/c.

8.3 RISULTATI

Il confronto tra le miscele verrà effettuato sulla base delle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito, in particolare:

- della massa volumica del calcestruzzo fresco;
- della lavorabilità del calcestruzzo fresco;
- della massa volumica del calcestruzzo indurito;

- della resistenza a compressione a 7 e a 28 giorni.

Si cercherà inoltre di capire l'influenza della pre-saturazione sulle proprietà finali delle miscele.

Attraverso i risultati della campagna sperimentale è possibile, per il ridotto numero di cubetti a disposizione, valutare gli andamenti qualitativi delle grandezze valutate e non fare considerazioni di tipo statistico sui risultati ottenuti.

8.3.1 Massa volumica del calcestruzzo fresco

Rispetto alla miscela di riferimento RIF B, confezionata con solo aggregato naturale, le miscele confezionate con aggregato di riciclo presentano una densità allo stato fresco inferiore.

La minore densità delle miscele confezionate con aggregato di riciclo è imputabile alla minor densità dell'aggregato di riciclo rispetto a quello naturale.

Le densità medie delle miscele allo stato fresco (figura 8.15) variano all'aumentare della percentuale di aggregato di riciclo: le minori densità corrispondono infatti alle miscela R100 B e R100 BI, entrambe confezionate con il 100% di aggregato di riciclo. Un andamento di questo tipo è in linea con i dati di letteratura: molti autori riportano infatti una progressiva diminuzione della densità con l'aumentare della percentuale di sostituzione dell'aggregato naturale con quello di riciclo.

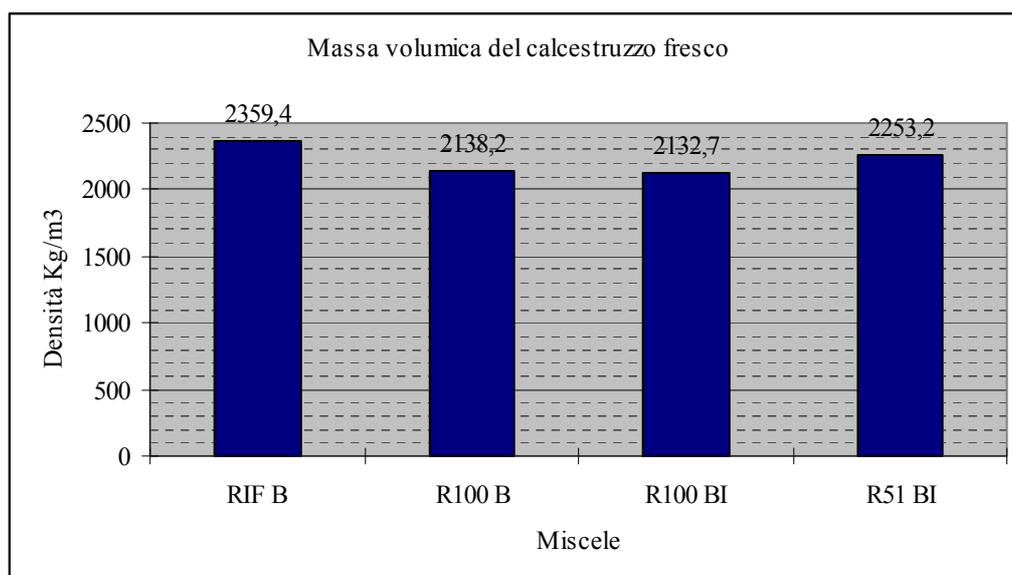


Figura 8.15: Confronto tra i valori medi di densità allo stato fresco

Le variazioni percentuali delle densità media delle miscele rispetto alla miscela di riferimento RIF B sono riportate in figura 8.16.

	Densità media (kg/m ³)	Variazione rispetto alla miscela di riferimento RIF B
RIF B	2359,4	-
R100 B	2138,2	-9,4%
R100 BI	2132,7	-9,6%
R51 BI	2253,2	-4,5%

Figura 8.16: Variazione percentuale della densità media del calcestruzzo fresco rispetto alla miscela di riferimento RIF B

La miscela R51 BI, confezionata con il 49% di sabbia naturale e il 51% di aggregato grosso di riciclo, è quella che presenta la minore perdita di densità. Ciò può sicuramente essere associato alla maggiore densità della sabbia naturale rispetto alla stessa frazione di riciclo.

Le miscele R100 B e R100 BI, confezionate entrambe con il 100% di aggregato di riciclo, ma con diversa metodologia di preparazione della miscela, presentano valori di densità allo stato fresco confrontabili.

8.3.2 Lavorabilità

La lavorabilità delle miscele è stata valutata mediante la prova di abbassamento al cono (determinazione dello *slump*).

Grazie all'aggiunta dell'additivo superfluidificante all'impasto nessuna delle miscele confezionate ha presentato problemi di scarsa lavorabilità.

Le miscele confezionate con il 100% di aggregato di riciclo hanno presentato uno slump maggiore rispetto alla miscela di riferimento RIF B e alla miscela R51 BI (figura 8.17).

Questo risultato è in controtendenza rispetto ai dati di letteratura, che riportano riduzioni di lavorabilità crescenti con l'aumentare della percentuale dell'aggregato di riciclo (vedi paragrafo 4.2.1). Il motivo di questo diverso comportamento del calcestruzzo fresco può

essere legato alla correzione d'acqua (ΔH_2O), apportata al quantitativo d'acqua definito dal rapporto a/c e necessaria a portare gli aggregati in condizione SSA, senza la quale gli aggregati avrebbero sottratto acqua alla miscela per raggiungere tale condizione, compromettendo la lavorabilità della miscela.

Il minore slump della miscela R100 BI rispetto alla miscela R100 B può essere imputato alla fase di pre-saturazione, che ha consentito un migliore assorbimento del quantitativo d'acqua, necessario a portare gli aggregati in condizione SSA, da parte degli aggregati e ha ridotto il quantitativo di acqua libera rimasta nell'impasto in quanto non assorbita dagli aggregati.

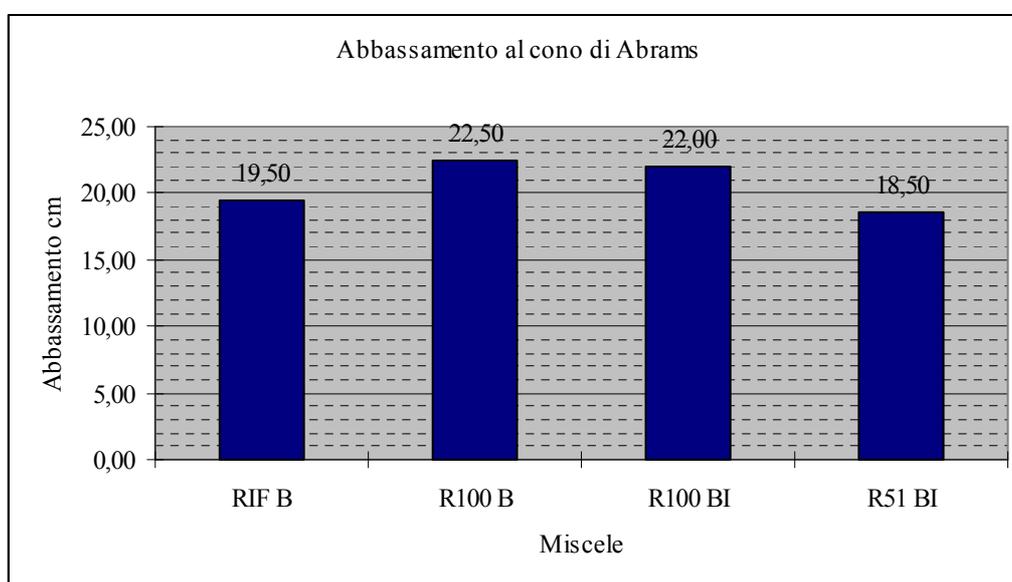


Figura 8.17: Confronto tra i valori di slump

8.3.3 Massa volumica del calcestruzzo indurito

La massa volumica del calcestruzzo indurito risulta essere inferiore a quella della miscela di riferimento RIF B, confezionata con solo aggregato comune (figura 8.18). La minore densità del calcestruzzo indurito è da imputare alla minore densità degli aggregati di riciclo rispetto a quelli naturali.

Qualitativamente l'andamento della massa volumica del calcestruzzo allo stato indurito al variare della percentuale di aggregato di riciclo, è il medesimo di quello riscontrato per la massa volumica del calcestruzzo fresco: le minori densità si hanno per le miscele con il 100% di aggregato di riciclo (R100 B e R100 BI), mentre una minore riduzione di

densità si riscontra per la miscela R51 BI, confezionata con il 51% di aggregato di riciclo.

Le variazioni percentuali delle densità medie delle miscele rispetto alla miscela di riferimento RIF B, confezionata con aggregato naturale, sono riportate nella tabella di figura 8.19.

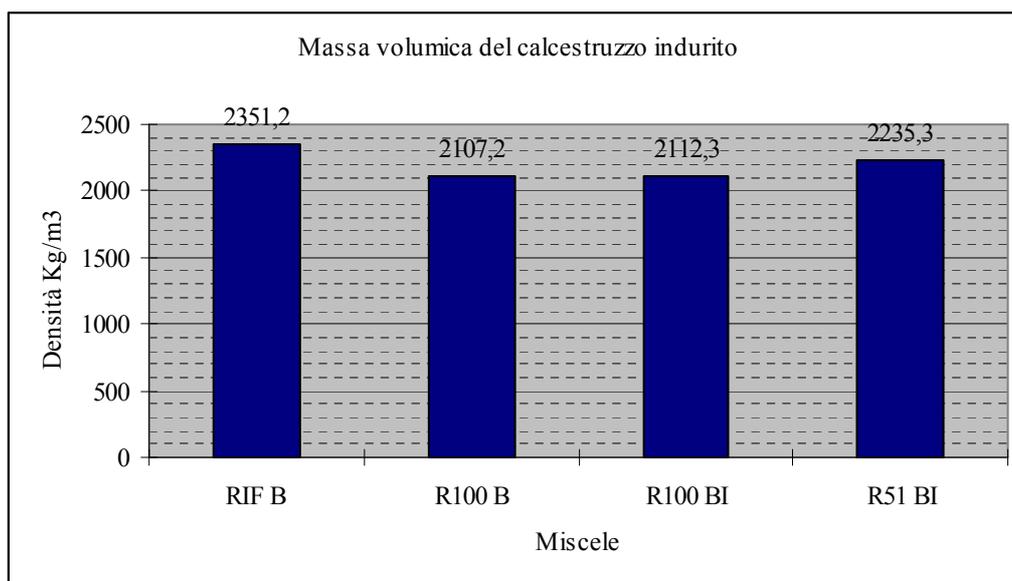


Figura 8.18: Confronto tra i valori medi di densità allo stato indurito a 28 giorni

	Densità media (kg/m ³)	Variazione rispetto alla miscela di riferimento RIF B
RIF B	2351,2	-
R100 B	2107,2	-10,4%
R100 BI	2112,3	-10,2 %
R51 BI	2235,3	-4,9%

Figura 8.19: Variazione percentuale della densità media del calcestruzzo indurito a 28 giorni rispetto alla miscela di riferimento RIF B

8.3.4 Resistenza a compressione

Le prove di resistenza a compressione sono state effettuate a 7 e a 28 giorni, in modo tale da poter valutare non soltanto i valori di resistenza a compressione raggiunti, ma anche l'andamento della resistenza a compressione nel tempo.

I valori medi di resistenza a compressione a 7 giorni sono riportati in figura 8.20.

In figura 8.21 sono riportate le variazioni percentuali dei valori medi di resistenza a compressione a 7 giorni delle miscele confezionate con aggregato riciclato rispetto alla miscela di riferimento RIF B, confezionata con solo aggregato naturale.

I valori di resistenza più bassi sono quelli relativi alle miscele confezionate con solo aggregato di riciclo per le quali si attestano diminuzioni di resistenza a compressione a 7 giorni del 24,4÷29%, rispetto alla miscela di riferimento RIF B.

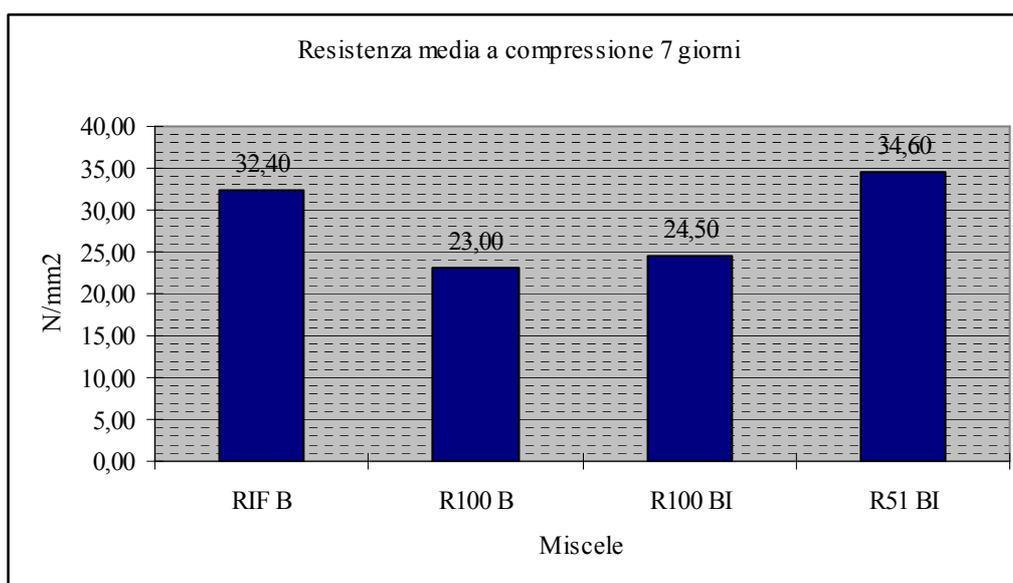


Figura 8.20: Confronto tra i valori medi di resistenza a compressione a 7 giorni

	Valore medio di resistenza a compressione a 7 giorni (N/mm ²)	Variazione rispetto alla miscela di riferimento RIF B
RIF B	32,4	-
R100 B	23,0	-29,0%
R100 BI	24,5	-24,4%
R51 BI	34,6	+6,8%

Figura 8.21: Variazione percentuale delle resistenze a compressione a 7 giorni

Inoltre, vista la minor resistenza della miscela R100 B rispetto alla R100 BI, si può ipotizzare che la pre-saturazione degli aggregati abbia un'influenza favorevole sulla resistenza. Come è stato detto in precedenza, l'assorbimento d'acqua degli aggregati di

riciclo appare favorito della fase di pre-saturazione e riduce la possibilità che il quantitativo d'acqua, introdotto nella miscela e necessario a portare gli aggregati in condizione SSA, non rimanga sottoforma di acqua libera nell'impasto, con aumento del rapporto a/c e perdita di resistenza

Molto importante è il valore di resistenza a 7 giorni ottenuto per la miscela R51 BI che risulta superiore a quello della miscela di riferimento RIF B.

I valori di resistenza media a compressione a 28 giorni delle miscele sono riportati in figura 8.22, mentre in figura 8.23 sono riportate le variazioni percentuali dei valori medi di resistenza a compressione a 28 giorni delle miscele confezionate con aggregato riciclato rispetto alla miscela di riferimento RIF B, confezionata con solo aggregato naturale. I valori di resistenza a compressione a 28 giorni confermano che le minori resistenze si hanno per le miscele R100 B e R100 BI, confezionate con solo aggregato di riciclo. In particolare la resistenza minore appartiene alla miscela R100 B, realizzata con il 100% di aggregato di riciclo, ma senza pre-saturazione degli aggregati. Si può dunque ipotizzare che la pre-saturazione degli aggregati abbia un'influenza positiva sulla resistenza meccanica.

Confrontando le variazioni percentuali dei valori medi di resistenza a compressione a 7 e a 28 giorni delle miscele confezionate con aggregato di riciclo rispetto alla miscela di riferimento RIF B, confezionata con solo aggregato naturale, si evince che le variazioni

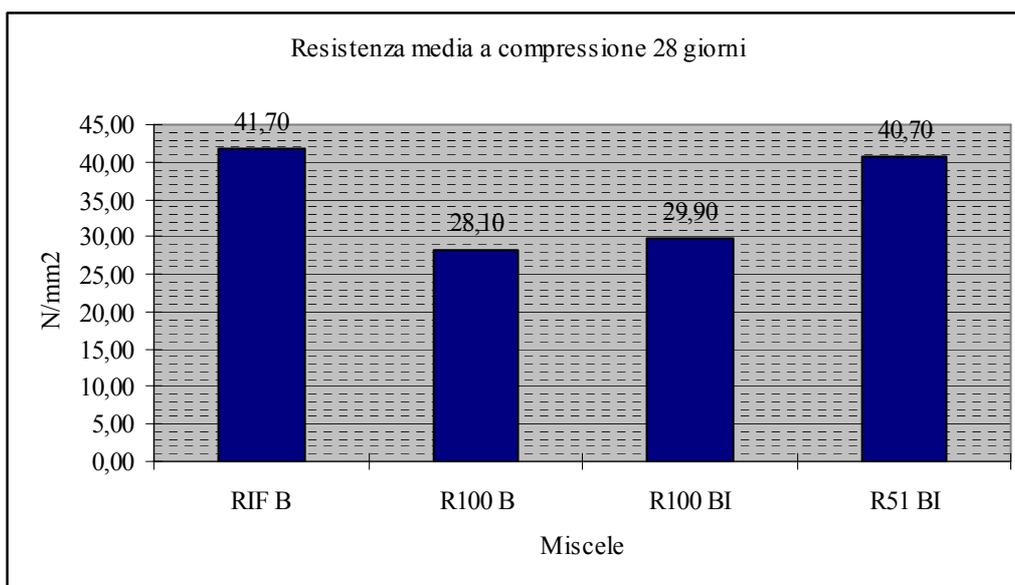


Figura 8.22: Confronto tra i valori medi di resistenza a compressione a 28 giorni

	Valore medio di resistenza a compressione a 28 giorni (N/mm ²)	Variazione rispetto alla miscela di riferimento RIF B
RIF B	41,7	-
R100 B	28,1	-32,6%
R100 BI	29,9	-28,3%
R51 BI	40,7	-2,4 %

Figura 8.23: Variazione percentuale delle resistenze a compressione a 28 giorni rispetto alla miscela di riferimento RIF B

a 28 giorni sono maggiori. Lo scostamento dei valori medi di resistenza a 28 giorni delle miscele confezionate con aggregato di riciclo, rispetto alla miscela di riferimento, sono più elevati di quelli valutati per i valori medi di resistenza a 7 giorni.

In figura 8.24 sono confrontati i risultati della campagna sperimentale sviluppata in questa tesi con le disposizioni delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

A fronte della completa sostituzione dell'aggregato naturale con quello di riciclo (miscele R100 B e R100 BI) si sono ottenuti valori di resistenza cubica a compressione superiori a 25 N/mm², mentre nel caso della sostituzione della frazione grossa (miscela R51 BI) si è ottenuto un valore medio di resistenza cubica superiore a 35 N/mm².

Come si evince dalla tabella i valori di resistenza ottenuti dalle miscele confezionate nella campagna sperimentale superano decisamente quelli definiti dalla Norme Tecniche per le Costruzioni. Dai valori medi di resistenza a compressione si può trarre un'importante risultato: utilizzando il 51% di aggregato di riciclo si ottiene una resistenza cubica a 28 giorni che supera i 40 N/mm². Ciò significa che la percentuale del 30% di aggregato di riciclo attualmente imposta dalle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni per il confezionamento di calcestruzzi di classe C 30/37 può essere superata.

Pertanto, attraverso un buon processo di qualificazione degli aggregati e l'adozione degli accorgimenti necessari a limitare i problemi associati all'assorbimento d'acqua, è possibile ottenere calcestruzzi di buona resistenza meccanica, anche con percentuali superiori di aggregato di riciclo di quelle attualmente imposte.

Origine del materiale di riciclo	Disposizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni		Risultati della campagna sperimentale	
	Percentuale di sostituzione	Classe del calcestruzzo	Percentuale di sostituzione	Resistenza media del calcestruzzo (N/mm ²)
Demolizione di solo calcestruzzo e c.a.	fino al 30%	≤ C 30/37	51% (sostituzione della frazione grossa)	40,7 (miscela R51 BI)
	fino al 60%	≤ C 20/25	100% (sostituzione della frazione sia fine che grossa)	28,1 (senza pre-saturazione) Miscela R100 B) 29,9 (con pre-saturazione) Miscela 100 BI)

Figura 8.24: Confronto tra le disposizioni delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni e i risultati della campagna sperimentale

Il processo di qualificazione è dunque fondamentale per la progettazione e la preparazione della miscela. Conoscere il livello qualitativo degli aggregati di riciclo consente di controllare, nelle diverse fasi della realizzazione della miscela, le proprietà che si pensa influenzino negativamente il comportamento degli aggregati di riciclo ed è alla base della buona riuscita di una miscela di calcestruzzo con essi confezionata.

8.4 STIMA DELLE MACERIE ED ASPETTI ECONOMICI

Il complesso edilizio di Punta Perotti, già ampiamente descritto nel paragrafo 3.2, era costituito da tre edifici denominati A, B e N: i primi due erano stati progettati a scopo residenziale mentre il terzo a scopo terziario. Gli edifici A e B, di forma rettangolare e paralleli tra loro, erano disposti con il fronte ortogonalmente al mare, l'edificio N, era invece disposto con la facciata parallelamente alla costa.

Al momento della demolizione gli edifici, non ancora completati, erano caratterizzati da un diverso stato di avanzamento lavori. L'edificio A (figura 8.25), il primo che si incontrava uscendo da Bari in direzione sud, risultava completato per quanto riguarda la muratura esterna, realizzata con blocchi di laterizio alveolato, risultavano inoltre essere state eseguite alcune colonne di scarico dell'impianto idrico.

L'edificio B (figura 8.26) si presentava con la sola struttura intelaiata in cemento armato, non essendo stata realizzata alcuna muratura. Pertanto la presenza di laterizio si limitava alle pignatte utilizzate per realizzare i solai di piano.

L'edificio N (figura 8.27) risultava essere quello con un più avanzato livello dei lavori in virtù dell'esecuzione, sulle pareti esterne di tamponamento, dell'intonaco.

Pertanto le macerie provenienti dalla demolizione dell'edificio B, costituite in prevalenza da calcestruzzo (qualificato prima della demolizione attraverso prove in sito e in laboratorio), si prestano molto bene per essere trasformate in aggregati di riciclo di qualità.

Altrettanto interessante risultava l'edificio A, semplici operazioni di demolizione selettiva delle tamponature esterne avrebbero potuto consentire di avere del demolito costituito, così come per l'edificio B, di solo calcestruzzo, a meno di bassi tenori di laterizio per la presenza delle pignatte dei solai.

Di minore interesse risultava l'edificio N per la posa in opera dell'intonaco sulle pareti esterne, la cui presenza contamina le macerie e non consente di ottenere aggregati di riciclo adatti per confezionare calcestruzzi per uso strutturale, solo complesse operazioni di demolizione selettiva, rappresentate da stonacatura da eseguirsi a seguito del montaggio dell'impalcatura, possono scongiurarne la presenza negli aggregati di riciclo.

In figura 8.28 si riporta la pianta e la sezione del modulo di base degli edifici Matarrese.

Con la demolizione del complesso edilizio di Punta Perotti è stata stimata una produzione di circa 30.200 m³ di macerie (figura 8.29), prevalentemente costituite da laterizio e calcestruzzo.

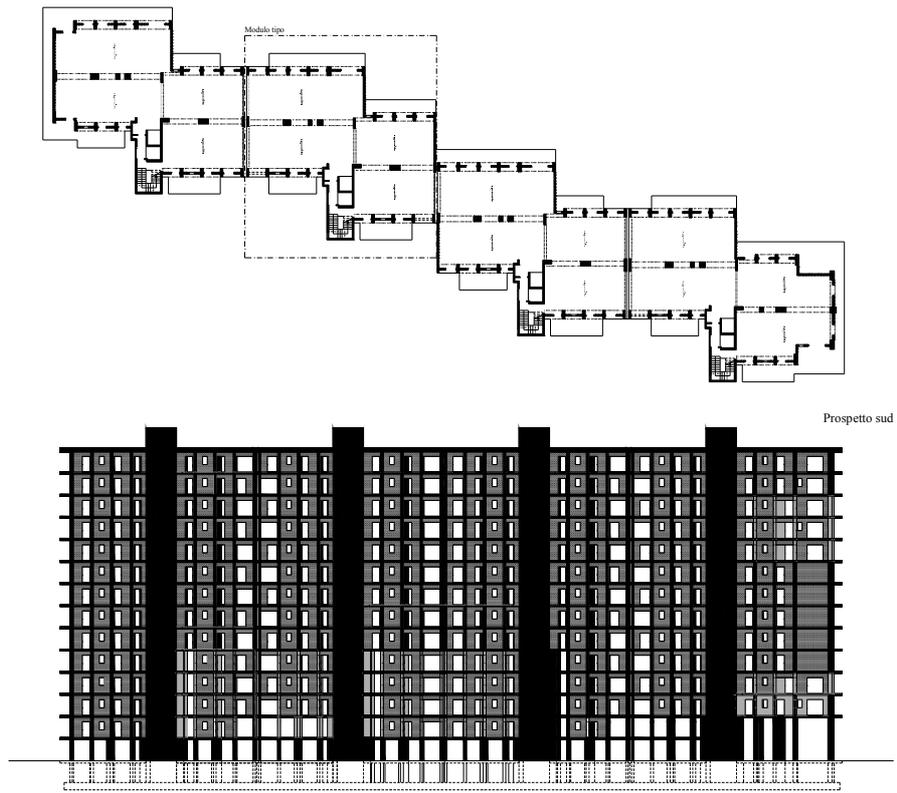


Figura 8.25: Prospetto sud Edificio A

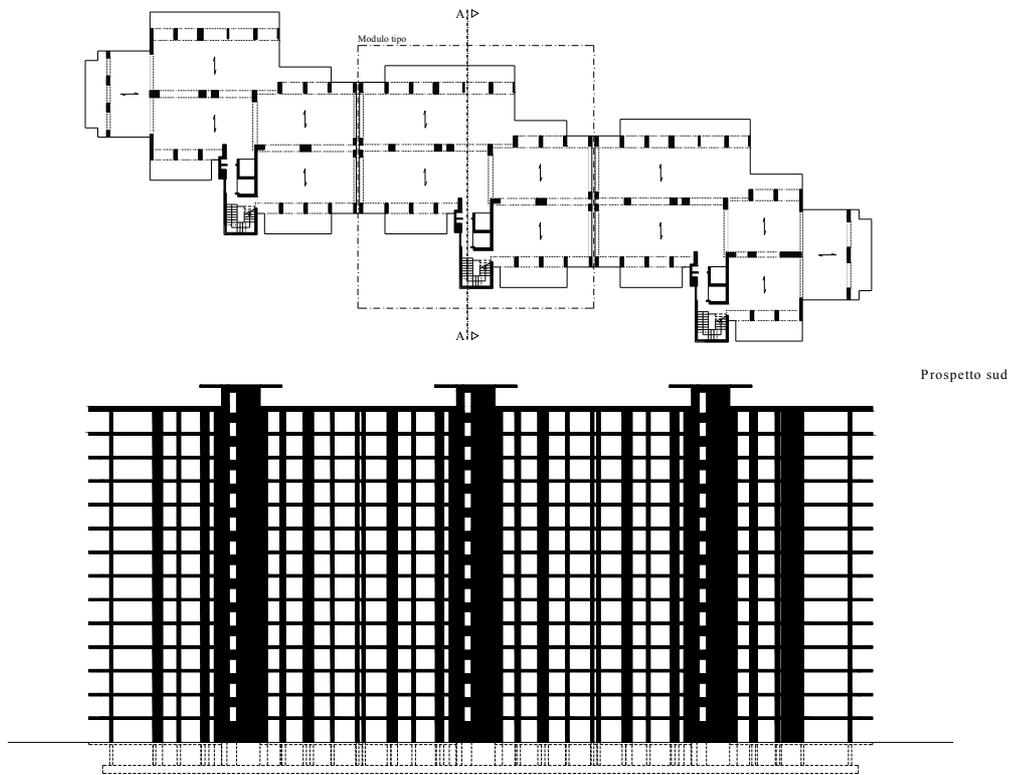
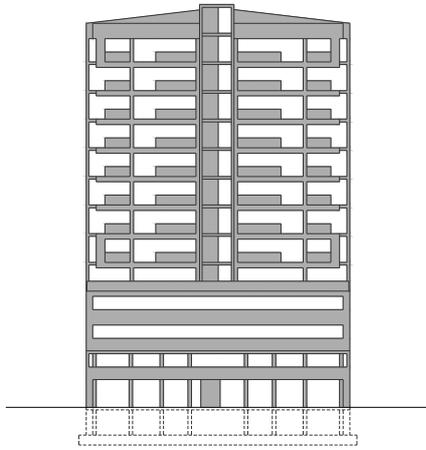


Figura 8.26: Prospetto sud Edificio B

Prospetto ovest



Prospetto sud

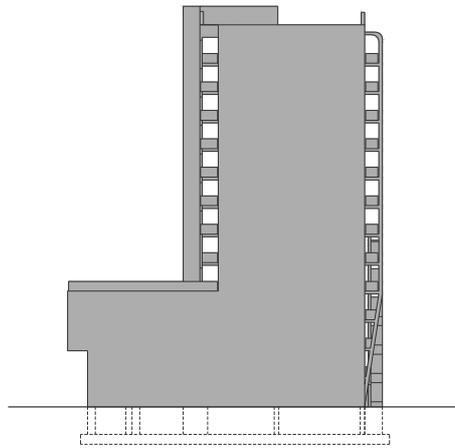


Figura 8.27: Prospetto ovest e sud Edificio N

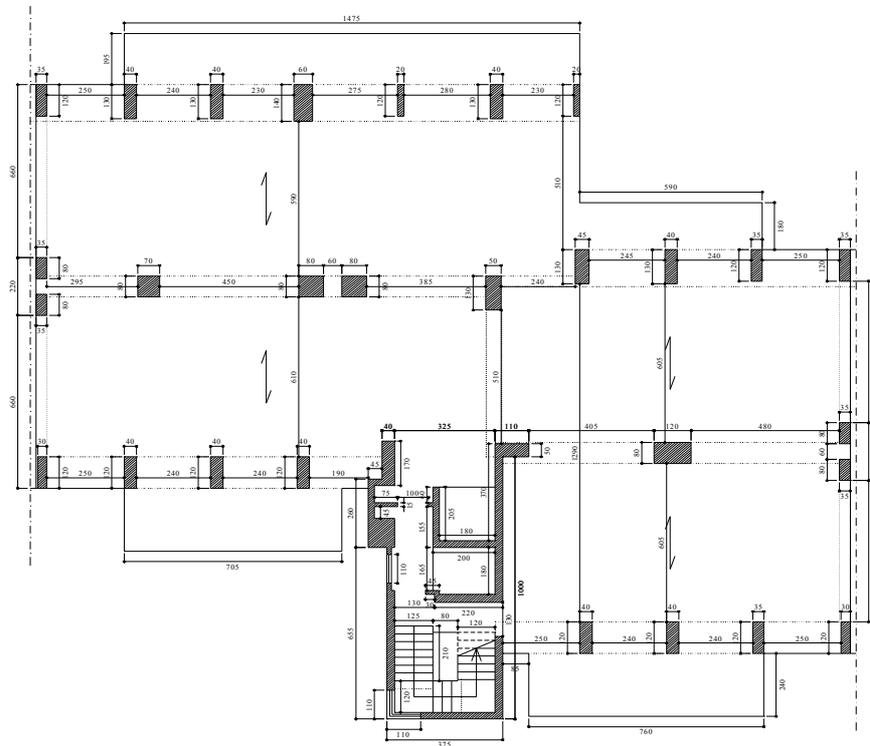


Figura 8.28: Pianta e sezione del modulo base

In particolare il volume di calcestruzzo con resistenza cubica a compressione pari a 40 N/mm² è stato stimato in 4.490 m³ ed il volume di calcestruzzo con resistenza cubica a compressione pari a 35 N/mm² in 8.600 m³, per un totale di macerie di solo calcestruzzo pari a circa 13.090 m³.

	CLS C 40	CLS C 35	LATERIZIO	INTONACO	POLISTIROLO	TOTALE
Edificio A (m ³)	2346	4239	7545	-	1170	15300
Edificio B (m ³)	1880	3395	4620	-	795	10690
Edificio N (m ³)	-264	-966	3005	37	-	4272
TOTALE	4490	8600	15170	37	1965	30262

Figura 8.29: Stima dei prodotti di demolizione

Se le macerie, a seguito di specifico trattamento, venissero trasformate in aggregati di riciclo idonei per il confezionamento di nuovo calcestruzzo strutturale, si avrebbe a disposizione un enorme risorsa.

Normalmente gli aggregati occupano nel calcestruzzo circa il 70% del volume, pertanto con 13.090 m³ di aggregati di riciclo sarebbe possibile confezionare circa 18.700 m³ di nuovo calcestruzzo. Per avere un ordine di grandezza qualitativo della quantità di calcestruzzo così prodotta, è stato effettuato un computo metrico del calcestruzzo necessario per la realizzazione di un edificio in cemento armato, di tipologia e dimensioni comuni sull'intero territorio nazionale, progettato in accordo alla nuova normativa sismica nazionale, emanata con Ordinanza della Presidenza del Consiglio 3274 [64].

In particolare si tratta di una struttura a telaio in cemento armato (figura 8.30), pensata in zona di prima categoria e su suolo di tipo B, progettata in classe di duttilità alta con fondazioni rappresentate da travi rovesce e n. 4 impalcati (di superficie in pianta pari a 360 m²) collegati verticalmente attraverso una scala centrale.

Emerge che il volume di calcestruzzo necessario per tale opera è di circa 500 m³, pertanto il volume di calcestruzzo ottenibile utilizzando gli aggregati di riciclo di solo calcestruzzo, consentirebbe di realizzare circa 38 edifici di questo genere.

Si ottiene così oltre ad un importante vantaggio ambientale anche un vantaggio economico.

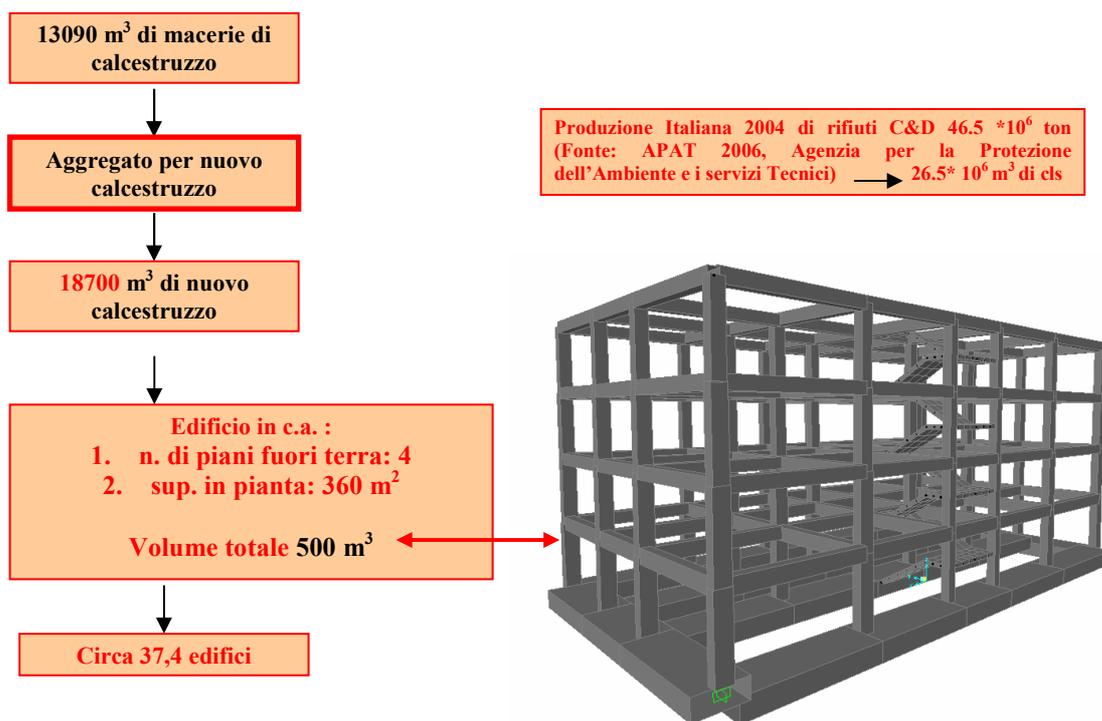


Figura 8.30: Struttura a telaio campione [64]

Il prezzo a m³ del calcestruzzo RIF B (calcestruzzo di riferimento della presente tesi) è stato stimato in circa 85.50 €, l'incidenza degli aggregati naturali sul prezzo del calcestruzzo può essere cautelativamente considerata pari al 35%.

Gli aggregati di riciclo costano normalmente la metà rispetto a quelli naturali (il prezzo è molto variabile e dipende principalmente della composizione merceologica degli aggregati), per cui il calcestruzzo confezionato con soli aggregati di riciclo comporta almeno un risparmio del 17.50 % sul prezzo del calcestruzzo.

La scelta di confezionare il calcestruzzo utilizzando gli aggregati provenienti dalle macerie di solo calcestruzzo prodotte con la demolizione di Punta Perotti, determinerebbe per un eventuale fornitura un risparmio economico, rispetto ad una miscela confezionata con aggregati naturali, che si aggira intorno a 280.000 €, ai quali bisognerebbe aggiungere gli inestimabili vantaggi ambientali legati al risparmio di risorse naturali e allo smaltimento in discarica delle macerie.

Le figure 8.31, 8.32 e 8.33 mostrano il computo metrico estimativo (prezzi unitari della zona di Bologna), riferito ad un metro cubo di calcestruzzo, delle miscele sperimentate.

	Quantità ql	Prezzo unitario €/ql	Costo €
Cemento	3.50	12.5	50
Aggregato fine N 0-4	8.90	1.66	17.80
Pietrischetto N 4-12.5	4.00	1.50	6
Pietrisco N 8-25	5.30	1.50	7.95
Acqua	1.75	1	1.75
Additivo	0.04	50	2
		TOTALE	85.5

Figura 8.31: Computo metrico - estimativo di un m³ di calcestruzzo RIF B

	Quantità ql	Prezzo unitario €/ql	Costo €
Cemento	3.50	12.5	50
Aggregato fine R 0-2	4.85	1	4.85
Aggregato fine R 1-5.6	3.10	1	3.10
Pietrischetto R 4-12.5	3.55	0.75	2.66
Pietrisco R 8-25	4.70	0.75	3.52
Acqua	1.75	1	1.75
Additivo	0.04	50	2
		TOTALE	67.9

Figura 8.32: Computo metrico - estimativo di un m³ di calcestruzzo R100 BI

	Quantità ql	Prezzo unitario €/ql	Costo €
Cemento	3.50	12.5	50
Aggregato fine N 0-4	8.42	2	16.84
Pietrischetto R 4-12.5	3.78	0.75	2.84
Pietrisco R 8-25	4.98	0.75	3.74
Acqua	1.75	1	1.75
Additivo	0.04	50	2
		TOTALE	77.17

Figura 8.33: Computo metrico - estimativo di un m³ di calcestruzzo R51 BI

8.5 SOSTENIBILITA' IDRICA

Il lavaggio degli aggregati di riciclo se da un lato è molto vantaggioso per migliorare le caratteristiche degli aggregati dall'altro determina un problema di smaltimento delle acque di lavaggio. Una possibile soluzione è l'impiego delle acque reflue, provenienti dal lavaggio degli aggregati, per confezionare nuovo calcestruzzo.

A tal scopo, un campione di aggregato, nell'intervallo granulometrico 2 – 16 mm, è stato lavato con una quantità di acqua pari al peso del campione stesso, cioè con un rapporto aggregato/acqua di lavaggio pari a 1.

Al campione di peso 8 Kg si è aggiunta dell'acqua fino a raggiungere il peso complessivo di 16 Kg.

Al termine del lavaggio l'acqua è stata recuperata e conservata per essere usata come acqua di impasto per il confezionamento di malte normalizzate.

Per saggiare il comportamento dell'acqua di lavaggio sono state preparate tre malte normalizzate diverse tra loro per l'acqua di impasto utilizzata:

- una miscela di riferimento (RIF) confezionata con acqua naturale;
- una miscela (H_2O_R) confezionata con acqua di lavaggio con tempo di sedimentazione nullo (t_0);
- miscela ($\underline{H_2O_R}$) confezionata con acqua di lavaggio con 24h di sedimentazione (t_{24h}).

La composizione delle miscele è indicata nella tabella di figura 8.34.

In figura 8.35 sono riassunti i risultati ottenuti per quanto riguarda la resistenza a compressione e flessione delle malte studiate. Molto interessanti appaiono i valori di resistenze a flessione delle malte confezionate con acqua di lavaggio.

Tipo	Sabbia	Cemento	Acqua	Acqua t_0	Acqua t_{24h}
RIF	1350 g	450 g	225 g	-	-
H_2O_R	1350 g	450 g	-	225 g	
$\underline{H_2O_R}$	1350 g	450 g	-	-	225 g

Figura 8.34: Composizione delle malte

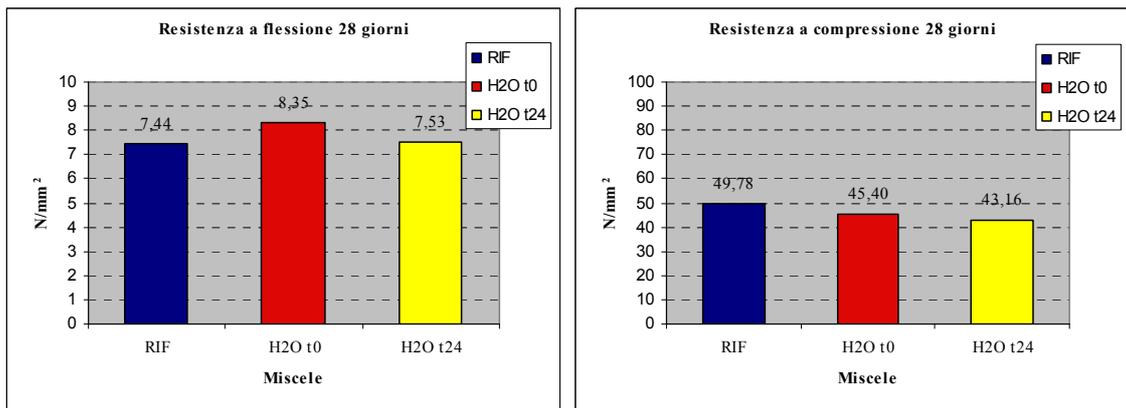


Figura 8.35: Risultati

8.6 MALTE CON AGGREGATI DI RICICLO E CENERI DA BIOMASSA

È opinione comune evitare l'uso nel calcestruzzo delle frazioni fini di aggregato di riciclo, un possibile campo di impiego può essere rappresentato dal confezionamento di malte. A tal proposito sono state confezionate delle malte con aggregati di riciclo provenienti da due diversi impianti fissi di riciclaggio con tecnologia R.O.S.E. "Recupero Omogeneizzato Scarti Edilizia", il primo di Villa Musone (AN) il secondo di Vigonza (PD). Le frazioni granulometriche degli aggregati di riciclo sono risultate simili ma non completamente identiche a quella dei corrispondenti aggregati naturali. Sono stati inoltre utilizzate delle ceneri di biomassa prelevate in un impianto di smaltimento e provenienti dagli scarti dell'industria energetica. In figura 8.36 sono riportate le immagini del passante al setaccio 0.037 mm di alcuni materiali utilizzati.



Figura 8.36: Passante al setaccio 0.037 mm aggregato di riciclo proveniente da Vigonza e ceneri da biomassa

È stato studiato l'effetto degli aggregati riciclati passanti allo staccio 0,25 mm, a partire dalla formulazione della miscela con soli aggregati naturali sono state progettate le altre miscele, sostituendo le frazioni granulometriche naturali passanti allo staccio 0,25 mm. Gli impasti sono stati calcolati, tenendo costante il volume di malta prodotto, secondo il metodo dei volumi assoluti. Non essendo nota l'effettiva densità degli aggregati di riciclo, si è proceduto determinando i volumi delle diverse frazioni di aggregato per via empirica, utilizzando, come unità di misura, il volume della frazione di sabbia naturale corrispondente. Il volume di aggregato sostituito è stato di 235 cm³, che corrisponde al 30% circa del volume totale dell'aggregato naturale, pari a 820 cm³. Analogamente si è proceduto con le ceneri da biomassa che sono state utilizzate tal quali in sostituzione dell'aggregato naturale passante allo staccio 0.25 mm.

Sono state preparate quattro miscele:

- TIPO N: malta normale;
- TIPO RAN: utilizzo degli aggregati provenienti dall'impianto di trattamento di Villa Musone (AN);
- TIPO RPD: utilizzo degli aggregati provenienti dall'impianto di trattamento di Vigonza (PD);
- TIPO RCB: utilizzo tal quale di ceneri da biomassa provenienti da un impianto di smaltimento.

Le caratteristiche degli impasti per quanto riguarda il rapporto a/c, il tipo e il dosaggio degli inerti e la scelta del tipo di cemento sono riportati nella tabella di figura 8.37.

Le proprietà meccaniche delle malte sono state valutate per mezzo di prove di compressione e flessione su travetti di dimensioni 40*40*160 mm.

Sono stati realizzati per ciascuna miscela tre travetti e sono stati sottoposti a rottura a 28 giorni di stagionatura.

I valori di resistenza media a flessione e compressione sono indicati figura 8.38.

La malta confezionata con ceneri da biomasse (Tipo RCB) presenta un incremento del valore della resistenza a flessione (R_f) di circa il 6.20% rispetto alla malta normalizzata (Tipo N), la R_f per la malta confezionata con aggregati di riciclo provenienti dall'impianto di trattamento PD (Tipo RPD) ha un valore paragonabile alla malta tipo N e infine la R_f della malta tipo AN è inferiore circa al 8.40% rispetto al tipo N.

Miscela	TIPO N	TIPO RAN	TIPO RPD	TIPO RCB
Cem 42.5R II/A-L (g)	450,00	450,00	450,00	450,00
Acqua (g)	225,00	225,00	225,00	225,00
a/c	0,50	0,50	0,50	0,50
Trattenuto 0.25 mm (cm ³)	585	585	585	585
Passante 0.25 mm (cm ³)	235	-	-	-
	-	235	-	-
	-	-	235	-
	-	-	-	235
% in volume di sostituzione	0,00	30,00	30,00	30,00

Figura 8.37: Formulazioni malte con aggregati riciclati e ceneri da biomassa ottenuti per sostituzione degli aggregati naturali

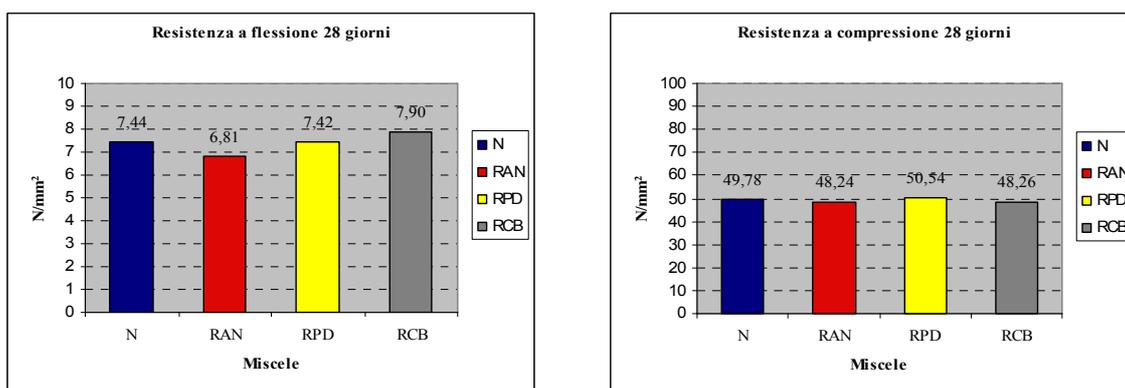


Figura 8.38: Comportamento meccanico a flessione e compressione delle malte studiate

Per quanto riguarda invece il comportamento a compressione si osserva che le malte Tipo RCB e Tipo RAN presentano un valore della resistenza a compressione (R_c) minore del 3% circa rispetto alla malta Tipo N, mentre la R_c della malta Tipo RPD manifesta un + 1.50% rispetto Tipo N.

Le indagini condotte, pur fornendo primi elementi di valutazione del comportamento di malte confezionate con materiali riciclati o provenienti dagli scarti dell'industria energetica, indicano che l'impiego di aggregati riciclati in sostituzione degli aggregati naturali può rappresentare una valida alternativa per nuove malte sostenibili. Significativo è stato il contributo delle ceneri provenienti da biomasse in termini di comportamento flessionale del materiale.

CONCLUSIONI

Le esperienze che negli ultimi anni hanno riguardato, con risultati anche promettenti, i calcestruzzi strutturali confezionati con aggregati di riciclo in sostituzione degli aggregati naturali, hanno consentito di cogliere i limiti tecnici degli aggregati riciclati rispetto a quelli naturali e proporre possibili soluzioni di impiego anche con valenza strutturale, ma ciò che maggiormente può impedirne un uso sicuro in esercizio è l'affidabilità compromessa dal forte grado di eterogeneità che caratterizza i prodotti di demolizione.

Non è possibile produrre del calcestruzzo, con un livello prestazionale fissato in fase di progetto, se prima non si qualificano gli aggregati: la qualificazione degli aggregati di riciclo non può riguardare la caratterizzazione in laboratorio di un campione di materiale di cui non si conosce la provenienza, in quanto appare evidente il grado di incertezza sulla rappresentatività dei risultati ottenuti.

È pur vero che negli impianti di trattamento delle macerie, quando è possibile, queste vengono oggi stoccate, ancor prima di essere trattate, in cumuli merceologicamente compatibili attraverso una separazione qualitativa e solo dopo si attinge opportunamente per ottenere una miscela di materiale da trattare adeguata per l'uso che si vuole dare al prodotto finale.

Questo corretto modo di operare non scongiura però l'incertezza inevitabilmente legata alla provenienza delle macerie, ecco perché in fase di progettazione della demolizione è opportuno effettuare un insieme di controlli, attraverso prove sui materiali in opera, per caratterizzare i materiali della costruzione da demolire.

La demolizione con esplosivo dell'incompiuto complesso edilizio di Punta Perotti (Bari, 2006), demolito dopo undici anni dalla costruzione, ha rappresentato una rara occasione di affrontare il tema del recupero delle macerie sottoforma di aggregati per calcestruzzi strutturali in tutta la sua complessità.

Partendo dalla conoscenza accurata degli edifici a torre del plesso, attraverso la qualificazione dei materiali in opera prima dell'abbattimento, è stato possibile effettuare un adeguato processo di qualificazione del materiale che appariva particolarmente

adatto per ottenere aggregati di riciclo idonei al confezionamento di calcestruzzo strutturale.

Lo stato di degrado delle strutture in conglomerato cementizio armato, in esercizio non protette per l'assenza di ogni tamponatura e degli intonaci, è stato saggiato mediante indagini sperimentali di natura meccanica e chimica sul calcestruzzo.

La caratterizzazione meccanica del materiale è consistita nella determinazione della resistenza caratteristica a compressione monoassiale (R_{ck}), del modulo elastico (E) e del coefficiente di Poisson (ν) di un adeguato numero di carote estratte in elementi strutturali con punti di prelievo diversamente orientati. Sono state inoltre effettuate prove di carbonatazione e del tenore dei sali idrosolubili.

Le prove condotte hanno mostrato chiaramente che il calcestruzzo utilizzato, benché di buona qualità meccanica ($R_{ck} \sim 40 \text{ N/mm}^2$), presenta criticità importanti sulla cortina esterna, che segnalano un lieve degrado del calcestruzzo, ma non pare ne impediscano il riutilizzo: le ragioni di questo stato di degrado sono da ricercare nell'assenza di ogni tamponatura e degli intonaci, pertanto il calcestruzzo è stato esposto alle azioni dell'ambiente marino senza alcuna protezione. Sono state misurate profondità di carbonatazione significative fino a circa 40 mm a partire dalla superficie esposta del calcestruzzo e tenori di ioni cloruro importanti ma limitati ad alcuni punti di prelievo e alla sola parte superficiale del calcestruzzo in funzione dell'esposizione dell'elemento strutturale da cui sono stati prelevati i campioni.

Solo dopo aver raggiunto l'accurata conoscenza delle costruzioni oggetto di demolizione, anche attraverso un computo metrico dei materiali demoliti, sono stati studiati dei calcestruzzi confezionati sia con aggregati naturali, sia con aggregati provenienti dal trattamento delle macerie di demolizione con sostituzioni superiori ai limiti stabiliti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, con l'obiettivo di saggiare i diversi comportamenti e l'affidabilità statica per strutture realizzate con materiali di riciclo.

È emerso che le proprietà fisico-chimiche degli aggregati di riciclo, benché inferiori rispetto a quelle degli aggregati naturali, ne consentono l'uso alternativo per il confezionamento di calcestruzzo: infatti, nel caso di Punta Perotti, si riscontrano rispetto agli aggregati naturali, forniti da una cava bolognese, una minore massa volumica e un

maggiore assorbimento d'acqua per la presenza della malta cementizia aderente agli aggregati di origine.

Il raggiungimento della condizione satura su superficie asciutta, che garantisce il fondamentale rispetto nella miscela di calcestruzzo del quantitativo di acqua di reazione definito dal rapporto a/c, appare nel breve periodo di produzione del calcestruzzo molto difficile per gli aggregati di riciclo.

Attraverso una fase preliminare di pre-saturazione, durante la quale i soli aggregati, di riciclo e non, vengono miscelati insieme alla sola correzione d'acqua necessaria per portarli dalla condizione reale di umidità in condizione satura su superficie asciutta, appare facilitare il raggiungimento di questa condizione. Tale operazione comporta vantaggi anche in termini di abbattimento delle polveri.

La lavorabilità del calcestruzzo fresco delle miscele confezionate con aggregato di riciclo non viene compromessa, nel caso venga utilizzato un additivo fluidificante nelle stesse quantità usate per il calcestruzzo con aggregati naturali e vengano apportate le adeguate correzioni al quantitativo d'acqua della miscela richieste dalla presenza dell'aggregato di riciclo.

La pre-saturazione degli aggregati comporta inoltre un miglioramento, se pur blando, della resistenza a sforzo normale di compressione del calcestruzzo confezionato con solo aggregato di riciclo. La sostituzione totale degli aggregati naturali comporta un abbattimento della resistenza a sforzo normale di compressione del calcestruzzo di circa il 30%, mentre sostituendo le sole frazioni grosse naturali si registrano le stesse resistenze meccaniche della miscela di riferimento, confezionata con solo aggregato naturale. Le resistenze a compressione delle miscele confezionate con solo aggregato di riciclo sono dunque compromesse dalla presenza della frazione fine di riciclo, avente un maggiore assorbimento d'acqua rispetto alle corrispondenti frazioni naturali.

I risultati della sperimentazione hanno quindi dimostrato la possibilità di utilizzare percentuali di aggregato di riciclo più elevate di quelle attualmente imposte dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, ottenendo buone resistenze meccaniche, pertanto i primi risultati del presente lavoro indicano che l'impiego di aggregati riciclati preliminarmente qualificati, in sostituzione degli aggregati naturali, può rappresentare

una valida alternativa dal punto di vista tecnico, strutturale ed anche economico a quello dei materiali tradizionali.

La partecipazione alla demolizione del complesso edilizio di Punta Perotti è risultata di forte interesse anche per i controlli sulle adiacenti costruzioni degli effetti cagionati dal micro-sisma conseguente all'esplosione e al crollo.

Sono state eseguite su un edificio a torre, del complesso di Punta Perotti, con struttura a telaio in conglomerato cementizio armato misure delle accelerazioni indotte dallo scuotimento del terreno per l'esplosione e il crollo dell'edificio di Punta Perotti.

La valutazione dell'effetto dinamico è stata effettuata attraverso l'analisi dei segnali acquisiti nel dominio fisico del tempo e proiettati nel dominio della frequenza attraverso analisi spettrale. È stato possibile ricostruire attraverso gli effetti in termini di accelerazioni registrati in vari punti della struttura la dinamica dell'abbattimento durato circa 5 s e caratterizzato da una fase di esplosione accompagnata dall'implosione dei piani bassi con successiva fase di crollo della parte alta con ribaltamento sul terreno.

La durata delle rilevazioni per un lungo intervallo temporale ha consentito di individuare alcune caratteristiche dinamiche dell'edificio strumentato, eccitato anche dalle forzanti ambientali, prima e dopo l'evento.

I primi risultati del presente lavoro indicano un comportamento lineare della struttura a fronte di importanti accelerazioni di ingresso in fondazione (1.3g) dal carattere impulsivo e di durata limitata.

Durante l'evento le accelerazioni in ingresso registrate nell'intervallo temporale corrispondente all'esplosione e crollo dei piani bassi vengono amplificate dalla costruzione, si segnala invece, uno smorzamento delle accelerazioni alla base nel successivo intervallo temporale corrispondente al crollo dei piani alti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Comunicazione della Commissione COM(2003) 301 del 27 maggio 2003, Verso una strategia tematica per la prevenzione e il riciclo dei rifiuti, G.U.U.E. n. C76 del 25 marzo 2004.*
- [2] *Symonds, "Construction and demolition waste management practices and their economic impacts", Rapporto alla DGXI, Commissione Europea, Febbraio 1999, http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_report.htm.*
- [3] *APAT-ONR, Rapporto rifiuti 2006, Roma, Dicembre 2005, www.apat.gov.it/site/IT/APAT/Pubblicazioni/Rapporto_rifiuti/Documento/rapporto_rifiuti_2006.html.*
- [4] *A. B. Costantino, F. Sandrolini, P.P. Diotallevi "Calcestruzzo con aggregati naturali e riciclati: indagini teoriche e sperimentali sul comportamento del materiale e di elementi strutturali", tesi di Laurea*
- [5] *Bressi Giorgio, Pagani L., Pavesi E., "La produzione di aggregati riciclati in Italia nel 2004 – Rapporto ANPAR 2005", Ottobre 2005 - www.anpar.org/documenti*
- [6] *Moretti E. – La normativa europea sugli aggregati per calcestruzzi- Convegno Nazionale aggregati per le costruzioni, Bologna, 28 Marzo 2003.*
- [7] *Francesco Biasioli, Andrea Dari – Aggregati di qualità per calcestruzzi di qualità – Prefabbricati e strutture, ottobre 98.*
- [8] *F. Batà – D. Sbaraglia – Gli impianti di produzione di inerti, qualità dei prodotti e controllo del processo - Convegno Nazionale aggregati per le costruzioni, Bologna, 28 Marzo 2003.*
- [9] *UNI 8520-1:2005 "Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione dei criteri di conformità".*
- [10] *UNI 8520-2:2005 "Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti".*
- [11] *Decreto ministeriale 14 settembre 2005, "Norme Tecniche per le Costruzioni", Supplemento Ordinario n.159-G.U. n. 222 del 23 settembre 2005.*
- [12] *Beppe Zandonella, "Demolizione controllata con esplosivo di un edificio industriale", Quarry & Construction, aprile 1996*

- [13] RILEM 121-DRG-Specifications for concrete with recycled aggregates, *Materials and Structures*, 1994, Vol. 27, pag.557–559.
- [14] Nagataki S., Gokce A., Saeki T., Hisada M., “Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Research*, v 34, n 6, Giugno 2004, p 965-971
- [15] Tomas Juergen, Schreier Matthias, Groeger Torsten, “Liberation and separation of valuables from building material waste”, *Chemical Engineering and Technology*, v 23, n 9, Settembre 2000, p 809-814
- [16] J.M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate”, *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, pag. 763- 769.
- [17] M. Etxeberria, E. Vazquez, A. Mari, M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2007, doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [18] L. Evangelista, J. de Brito, “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates”, *Cement & Concrete Composites*, 2007, doi:10.1016/j.cem concomp.2006.12.004.
- [19] I.B. Topçu, S. Sengel, “Properties of concretes produced with waste concrete aggregate”, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pag.1307-1312.
- [20] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, E. Wirquin, “Frost resistance of recycled aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pag. 1927-1932.
- [21] V. Corinaldesi, M. Giuggiolini, G. Moriconi, Use of rubble from building demolition in mortars, *Waste management*, 22, n°8, 2002, pp. 893-899.
- [22] Katz Amnon, “Treatments for the improvement of recycled aggregate”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v 16, n 6, Novembre/Dicembre 2004, p 597-603
- [23] S. Melotti, F. Sandrolini, P.P. Diotallevi, A. B. Costantino “Impiego di aggregati di riciclo in calcestruzzi strutturali: caratteristiche e microstruttura della zona interfase (ITZ)” *Tesi di Laurea*, a.a. 2004-2005.
- [24] I.B. Topçu, S. Sengel, “Properties of concretes produced with waste concrete aggregate”, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pag.1307-1312.

- [25] J.M. Khatib, "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, pag. 763- 769.
- [26] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, S. C. Kou, *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*, *Cem. Concr. Res.*, 34, n°1, 2004, pp. 31-36.
- [27] I. B. Topçu, *Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete*, *Cem. Concr. Res.*, 27, n°12, 1997, pp. 1817-1823.
- [28] Katz Amnon, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research*, v 33, n 5, Maggio 2003, p 703-711
- [29] Lin Yong-Huang, Tyan Yaw-Yauan, Chang Ta-Peng, Chang Ching-Yun, "An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Research*, v 34, n 8, Agosto 2004, p 1373-1380
- [30] Zaharieva Roumiana, Buyle-Bodin Francois, Wirquin Eric, "Frost resistance of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Research*, v 34, n 10, Ottobre 2004, p 1927-1932
- [31] A. Rao, K.N. Jha, S. Misra, "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 2007, pag. 71-81.
- [32] J.S. Ryu, "An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties", *Magazine of Concrete Research*, 54, 2002, pag. 7-12.
- [33] Sandrolini Franco, "Recycling waste: a sustainable route to high performance particulate composites", *Conferenza di Varsavia*, 8-9 dicembre 2005; tomo 1, p 121-129
- [34] P.P. Diotallevi, F. Sandrolini, A.B. Costantino, "Calcestruzzo strutturale con aggregati naturali e riciclati: indagini teoriche e sperimentali per la sostenibilità", *Atti delle giornate AICAP 2004 – 23° Convegno Nazionale "Migliorare le costruzioni di calcestruzzo strutturale: l'esistente e il nuovo"*, Verona 26-29 Maggio 2004. Patron Editore, Bologna 2004, p 181-185
- [35] Otsuki Nobuaki, Miyazato Shin-Ichi, Yodsudjai Wanchai, "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation

of concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v 15, n 5, Settembre/Ottobre 2003, p 443-451

[36] Moriconi Giacomo, “Il calcestruzzo del terzo millennio: un materiale durevole per lo sviluppo sostenibile”, *L’industria italiana del cemento*, n 787, Maggio 2003, p 430-441

[37] L. Evangelista, J. de Brito, “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates”, *Cement & Concrete Composites*, 2007, doi:10.1016/j.cem concomp.2006.12.004.

[38] Xiao Jianzhuang, Li Jiabin, Zhang Ch., “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading”, *Cement and Concrete Research*, v 35, n 6, Giugno 2005, p 1187-1194

[39] K. Zilch, F. Roos – An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates – *Bauingenieur*, 4/2001.

[40] Lee S.T., Moon H.Y., Swamy R.N., Kim S.S., Kim J.P., “Sulfate attack of mortars containing recycled fine aggregates”, *ACI Materials Journal*, v 102, n 4, Luglio/Agosto 2005, p 224-230

[41] F.T. Olorunsogo, N. Padayachee, “Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes”, *Cement and Concrete Research*, 32, 2002, pag. 179-185.

[42] M. Levy, P. Helene “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development”, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, pag. 1975-1980.

[43] Khalaf Fouad M., DeVenny Alan S., “Performance of brick aggregate concrete at high temperatures”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v 16, n 6, Novembre/Dicembre 2004, p 556-565

[44] K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A. H. Taylor, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.*, 31, n°5, 2001, pp. 707-712.

[45] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, Influence of recycled aggregates on mechanical properties on HS/HPC, *Cem. Concr. Comp*, 24, n°2 2002, pp. 269-279.

- [46] K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, P. Laugesen, *The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete*, *Interface science*, 14, n°4, 2004, pp. 411-421.
- [47] A. Elsharief, M. D. Cohen, J. Olek, *Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone*, *Cem Concr. Res*, 33, n°11, 2003, pp1837-1849.
- [48] Z. Agioutantis, E. Chatzopoulou, M. Stavroulaki, *A numerical investigation of the effect of the interfacial zone in concrete mixtures under uniaxial compression*, *Cem Concr. Res.*, 30, n°5, 2000, pp. 715-723.
- [49] Z. Hashin, P. J. M. Monteiro, *An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste*, *Cem Concr. Res.*, 32, n°8, 2002, pp. 1291-1300.
- [50] K. Liao, P. Chang, Y. Peng, C. Yang, *A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete*, *Cem. Concr. Res*, 34, n°6, 2004, pp. 977-989.
- [51] A. Cwirzen, V. Penttala, *Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes*, *Cem. Concr. Res*, 35, n°4, 2005, pp. 671-679.
- [52] J. Hu, P. Stoeven, *Properties of the interfacial transition zone in model concrete*, *Interface science*, 12, n°4, 2004, pp. 389-397.
- [53] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, C. M. Tam, *Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste*, *Cem. Concr. Res*, 35, n°6, 2005, pp. 1180-1186.
- [54] Zheng Jian Jun, Li Chun Qing, Zhou Xin Zhu, "Characterization of microstructure of interfacial transition zone in concrete", *ACI Materials Journal*, v 102, n 4, Luglio/Agosto 2005, p 265-271
- [55] T. Akçaoğlu, M. Tokyay, T. Çelik, *Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression*, *Cem. Concr. Res*, 26, n°6, 2004, pp. 633-638.
- [56] T. Akçaoğlu, M. Tokyay, T. Çelik, *Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete*, *Cem. Concr. Res*, 35, n° 2, 2005, pp. 358-363.

- [57] A. Elsharief, M. D. Cohen, J. Olek, *Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone*, *Cem Concr. Res.*, 33, n°11, 2003, pp1837-1849.
- [58] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*, *Cem. Concr. Res.*, 18, n°6, 2004, pp. 461-468.
- [59] M. Etxeberria, E. Vazquez, A. Mari, “*Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete*”, *Magazine of Concrete Research*, 58, 2006, pag. 683-690.
- [60] F. Sandrolini, “*Gli aggregati da demolizione e scarti di costruzione in nuovi calcestruzzi*”, dal convegno *Il riciclo di limi ed inerti per l’edilizia*, Mantova, 2004.
- [61] Vito Alunno Rossetti, *Il calcestruzzo: materiali e tecnologia*, McGraw-Hill, Milano 2007
- [62] UNI EN 1992-1-1, *Progettazione delle strutture di calcestruzzo Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici* [2005]
- [63] UNI EN 206-1:2006, *Calcestruzzo Parte 1: Specificazioni, prestazioni, produzione e conformità* [2006]
- [64] E. Cosenza, G. Magliulo, G. Maddaloni, “*L’analisi statica non lineare (push-over) delle strutture in cemento armato secondo la nuova normativa sismica italiana*”

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Professor Sandrolini e il Professor Diotallevi per l'esperienza professionale trasmessa durante questo ciclo formativo.

Ringrazio la General Smontaggi e il Comune di Bari per le autorizzazioni necessarie per l'accesso al cantiere.

Ringrazio il Professor Mazzotti per la disponibilità manifestata in tutte le occasioni.

Un sentito ringraziamento al personale tecnico dei laboratori del DICASM, del DISTART e del DICMA.

Si ritiene doveroso ricordare che le prove sono state sviluppate grazie anche alla fattiva collaborazione dell'ENEA (C.R. Casaccia, Dott. M. Puccini – C.R. Brindisi Arch. A. Tundo).