

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI
BOLOGNA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI TECNICA DELLE COSTRUZIONI (DICAM)

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, ambientale
e dei materiali- XXVIII Ciclo
(2013-2015)

Settore Concorsuale: 08/B3

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/09-Tecnica
Costruzioni

Utilizzo di resine a base acqua del
tipo IPN nell'esecuzione di rinforzi di
travi in c.a. con materiali compositi

Dottorando: **Marco Guiduzzi**

Relatore: Prof. Ing. P.P.Diotallevi

Correlatore: Prof. Ing. Luca Landi

Coordinatore Dottorato: Prof. Ing. Alberto Lamberti

Esame finale anno 2016

INDICE

Abstract	pag. 1
Premessa	pag. 2
Introduzione	pag. 4
Inquadramento storico	pag. 6
I materiali compositi	pag. 8
Utilizzo dei materiali compositi nel rinforzo di costru- zioni esistenti in Europa	pag. 22
Normative	pag. 23
Sperimentazione condotta	pag. 65
➤ Materiali di rinforzo	
• Adesivo betontex	
• Rinforzi in fibre di carbonio	
• Applicazione	
• I connettori ardfix	
➤ Comportamento al fuoco	pag. 71
➤ Esperienza precedente	pag. 80
➤ La nuova sperimentazione	pag. 85
➤ Travi rinforzate a flessione	
➤ Travi rinforzate a taglio	
➤ Modalità di rinforzo	pag. 86
➤ Schemi di carico e della strumentazione adottata	pag. 87
➤ Risultati	pag.199
➤ Tabelle riepilogative	pag.200
➤ Risultati della sperimentazione	pag.202
• Travi rinforzate a flessione	
• Travi rinforzate a taglio	
Analisi numeriche	pag.203
➤ Premesse	
➤ Caso di studio n. 1	
Verifica a flessione trave non rinforzata(el."beam")	

➤ Caso di studio n. 2	
Verifica a flessione trave rinforzata(el."beam")	
➤ Caso di studio n. 3	
Verifica a flessione trave non rinforzata(el."shell")	
➤ Caso di studio n. 4	
Verifica a flessione trave rinforzata(el."shell")	
➤ Caso di studio n. 5	
Verifica aflessione-legame aderenza FRP-CLS	
➤ Caso di studio n. 6	
Verifica a flessione(el."beam" e "shell membranali")	
➤ Caso di studio n. 7	
Verifica a taglio(cerniere plastiche a taglio)	
➤ Caso di studio n. 8	
➤ Verifica a taglio-legame di aderenza FRP-CLS	
Conclusioni	pag.311
Legge di interfaccia FRP-Calcestruzzo (risultati ottenuti dalle prove di laboratorio)	pag.315
Conclusioni generali	pag.324
Bibliografia	pag.325

ABSTRACT

For over 20 years composite materials have been used for the reinforcement and / or structural adjustment of individual elements or complete reinforced concrete buildings. The composite materials most widely used in construction are based on carbon fibers and / or aramid fibers and /or glass fibers and epoxy matrix. As known, the poor fire resistance of epoxy resins restricts the use of composite materials in building construction. Indeed, for temperatures above the T_g of the matrix occurs a rapid decrease of the composite elastic modulus. Usually for the epoxy resins laminated on site, the T_g value is less than 100 ° C. The article presents the results of an experiment conducted on RC beams reinforced with water-based IPN resins and unidirectional tapes carbon. As these IPN resins have a microcrystalline structure consisting of a polymer phase and a crystalline interpenetrated, they are material with class1 reaction to fire (according to UNI 9177). Particularly, the beams have been reinforced with different configurations of strengthening to shear stress and bending. By comparing the results of load tests applied on IPN resins and on epoxy resins, it has been proved that not only IPN resins have a better fire resistance, but also excellent mechanical properties of the reinforcements applied with the IPN matrix, showing similar values to the one obtainable with epoxy reinforcements.

Premessa

Le strutture in cemento armato, così come quelle in muratura, in legno e in acciaio, mostrano, nel tempo, problemi di durabilità e di degrado, che trovano in gran parte soluzione con l'applicazione dei materiali compositi. Anche riparazioni di edifici danneggiati dai terremoti ed errori di progettazione e/o cambi di destinazione d'uso dei fabbricati, consigliano l'adozione di questi sistemi di rinforzo.

In mancanza di essi si avrebbero interruzioni di esercizio dei fabbricati, con rilevanti oneri economici e sociali. A tali inconvenienti si sommano i danni provocati da eventi sismici che rendono sempre più attuali i ricorsi a riparazioni delle strutture esistenti e, in questo, i materiali giocano un ruolo rilevante. I materiali compositi consentono interventi rapidi e flessibili e tecnologicamente all'avanguardia.

L'utilizzo di questi materiali però hanno un grosso limite nel loro comportamento al fuoco.

Da oltre 20 anni vengono utilizzati i materiali compositi per il rinforzo e/o adeguamento strutturale di singoli elementi o interi fabbricati in c.a.. I materiali compositi maggiormente diffusi in edilizia sono a base di fibre di carbonio e/o fibre aramidiche e/o fibre di vetro e matrice epossidica. Come noto, la scarsa resistenza al fuoco delle resine epossidiche limita l'utilizzo dei materiali compositi. Infatti, per temperature superiori alla T_g della matrice si verifica un rapido calo del modulo elastico del composito. Solitamente per le resine epossidiche laminate in situ, il valore di T_g è inferiore a 100°C . Nel presente articolo vengono presentati i risultati di una sperimentazione condotta su travi in c.a. rinforzate con resine a base acqua del tipo IPN e nastri unidirezionali in carbonio. Queste resine IPN presentano una struttura microcristallina costituita da una fase polimerica ed una cristallina interpenetrata, tale da essere classificate come reazione al fuoco

di classe 1 ai sensi dell'UNI 9177. In particolare, le travi sono state rafforzate con diverse configurazioni di rinforzo a taglio e flessione. Sono stati confrontati i risultati delle prove di carico dei rinforzi applicati con le resine IPN con quelli applicati con le resine epossidiche. Al vantaggio della resistenza al fuoco delle resine IPN, la sperimentazione condotta ha evidenziato l'eccellenti proprietà meccaniche dei rinforzi applicati con la matrice IPN con valori analoghi a quelli dei rinforzi applicati con l'epossidica.

Introduzione

I materiali compositi fibrosi a matrice polimerica FRP (Fiber Reinforced Polymers) per il rinforzo e la riabilitazione di strutture esistenti, sono ormai molto diffusi e impiegati nell'Ingegneria Civile.

Con l'affinarsi della tecnologia, notevole è stato l'utilizzo a partire da circa venti anni fa. In precedenza si adottava spesso l'utilizzo del "beton plaquè" e cioè il placcaggio con profili e piastre metalliche, caduto in disuso anche a causa della pesantezza e della notevole laboriosità della sua posa in opera. Anche il rivestimento, prevalente dei pilastri, con nuove armature e calcestruzzo, è ormai cosa del passato.

Da circa vent'anni a questa parte, si diceva, ha preso piede l'utilizzo di materiali compositi in FRP per il rinforzo delle strutture, dovuto principalmente a:

malfunzionamenti e/o fessurazioni e crisi di elementi strutturali esistenti;

diminuzione della capacità portante delle strutture;

variazione dei carichi di esercizio, in conseguenza di cambi di destinazione d'uso, etc.;

adeguamento normativo e antisismico;

riparazione di strutture danneggiate dal terremoto.

Lo scopo che ci si prefigge da un rinforzo con materiale composito FRP, non è solo l'**aumento della capacità portante** dell'elemento strutturale, ma anche, ad esempio, un **aumento di duttilità**, oltre ad una **riduzione delle deformazioni**.

Anche ei costi ormai sono accettabili e confrontabili con quelli che si avrebbero con tecnologie tradizionali, anche e soprattutto pensando alla forte diminuzione di costi indiretti dovuti ad interventi meno invasivi.

Senza pensare che talvolta capita di dovere intervenire su edifici aventi vincoli storici ed architettonici. Per i quali, interventi di tipo "pesante" non è possibile realizzare.

I materiali compositi FRP classici, sono costituiti da fibre di vario tipo (carbonio, vetro, etc.), impregnati con resine (epossidiche, poliestere, etc.), e, oltre ad avere notevoli vantaggi che vedremo più avanti, presentano taluni svantaggi, il principale dei quali è la **scarsa resistenza al fuoco**. Per questo motivo negli ultimi anni si sta diffondendo l'utilizzo di matrici (resine) a base di calce e cemento o all'acqua, che migliorano sensibilmente la resistenza al fuoco (incendi).

Le principali normative internazionali non trattano questi tipi di matrici, anche se la ricerca, soprattutto in Italia, è assai perfezionata e ciò consentirà una prossima revisione delle normative stesse.

Il presente lavoro prende in esame dettagliato le principali normative internazionali e, in modo particolare, quelle europee, americane e italiane. Poi si occupa diffusamente della sperimentazione condotta.

Inquadramento storico

Fin dagli anni '50 i materiali compositi FRP sono stati applicati in vari settori produttivi come quello dell'industria navale, aeronautica, meccanica, etc.. In edilizia imperversava la tecnica del "beton plaquè" e, solo più tardi, negli anni '70-'80, si svilupparono le prime applicazioni dei compositi, specie negli Usa e in Giappone.

Oggi la ricerca si è notevolmente sviluppata in tutti i paesi del mondo e anche in Italia che ha visto impegnati i ricercatori ed i produttori.

Il primo risultato della ricerca è stata l'adozione, da parte di molti Stati, di norme e codici di calcolo, più o meno cogenti, per i materiali FRP:

- Istruzioni e linee guida in Italia
- ACI negli USA
- JSCE in Giappone
- CEB-FIB in Europa
- CHBDC in Canada
- Linee guida in Australia

Le normative italiane, o meglio, le istruzioni e le linee guida per l'utilizzo dei materiali compositi risalgono all'anno 2004, quando il CNR pubblicò le DT 200/2004 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati: Materiali, strutture di c.a. e c.a.p., strutture murarie".

A queste seguirono le seguenti:

CNR DT 201/2005 " Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni relative ad interventi di consolidamento statico di strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati".

CNR DT 202/2005 "Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati".

CNR DT 203/2006 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato".

Linee guida/2009 per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP. (Cons. Sup. LL.PP.)

CNR DT 200 R1/2012 " Istruzioni per l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati. Materiali, strutture di c.a.a e di c.a.p., strutture murarie". (Non ancora in vigore).

Con la circolare del Min. Infrastrutture e trasporti n. 317 del 02.02.2009 è consentito l'utilizzo di materiali compositi nelle strutture in c.a., in muratura e in legno, purchè ci si attenga alle linee guida e alle istruzioni sopra riportate e a documenti di provata affidabilità internazionale.

I materiali compositi

Il termine "materiale composito" si riferisce, in generale, ad un materiale artificiale composto da due o più materiali diversi che restano distinti fra loro, dei quali si sommano vantaggi e svantaggi.

Nonostante i molteplici vantaggi che si hanno con l'uso di questi compositi, gli stessi non sono sostitutivi dei materiali tradizionali (quali il calcestruzzo, l'acciaio, la muratura, il legno), ma vengono impiegati in soccorso degli stessi quando serve e nei casi di mutamenti delle condizioni a cui vengono sottoposti gli elementi strutturali (cambi di destinazione d'uso, aumento dei carichi, peggioramento delle condizioni al contorno dell'ambiente di lavoro (condizioni ambientali, chimiche, etc.)).

I compositi, quindi, non sostituiscono i materiali tradizionali anche perché sono più costosi di essi, anche se le attuali tecnologie sono tali da avere abbattuto di molto i costi di questi materiali.

L'impiego dei materiali compositi è assai ampio e ciò è dovuto alla possibilità di scegliere le volute combinazioni di fibre e di matrici in modo da ottenere un materiale finale dalle caratteristiche cercate.

Ecco perché è necessaria la sinergia fra studiosi di vari comparti (chimica, fisica, ingegneria), per potere ottenere il massimo risultato prestazionale.

In generale, a seconda degli impieghi dei materiali compositi, vengono ideati gli accoppiamenti fibre/matrici in modo da offrire ai progettisti e agli utilizzatori, prodotti mirati e di ottimali caratteristiche.

Il rinforzo con lamine o tessuti in fibre al carbonio o di vetro, rappresenta una delle tecniche più affidabili per il rinforzo a flessione o a taglio di elementi strutturali inflessi, oppure per il confinamento di elementi compressi, sia per quanto

riguarda il c.a., che per quanto concerne le strutture in muratura.

Le proprietà dei materiali compositi

L'utilizzo dei materiali plastici in edilizia è in forte espansione, sia per motivi di risparmio economico, sia per la plasmabilità di cui sono dotati.

Le altre proprietà sono la leggerezza, la pulizia (sono facilmente lavabili), l'isolamento, la facilità di applicazione, l'assenza di manutenzione o comunque molto limitata.

Si è detto in precedenza dei vantaggi che si hanno con l'utilizzo dei materiali compositi in FRP. Nel seguito si evidenziano le loro caratteristiche principali.

Anzitutto la loro **leggerezza**. Per questo motivo si utilizzano al posto di pesanti rinforzi di tipo tradizionale. Ad esempio se si utilizza un tessuto di carbonio il suo peso (grammatura) è di circa 150-350 gr/mq. Inoltre, con questi materiali, si diminuiscono i pesi propri delle strutture rinforzate e possono essere utilizzati in zone di difficile accesso. Poi **l'elevata resistenza a trazione**. Un tessuto al carbonio raggiunge resistenze a trazione superiore a 4500 MPa, con modulo elastico sopra i 400 GPa.

Infine la **velocità di posa in opera**. I tessuti si adattano alla porzioni di strutture da trattare e sono molto versatili e leggeri, con conseguente riduzione dell'incidenza della manodopera.

I compositi possono essere di due tipi, in dipendenza della lunghezza delle loro fibre. La lunghezza delle fibre incide fortemente sulla trasmissibilità, tramite la matrice, delle forze dall'elemento strutturale, ancorato nella matrice, alla matrice stessa: più sono lunghe maggiore è l'ancoraggio.

Le fibre hanno sviluppo secondo la direzione dello sforzo.

I prodotti di materiale composito utilizzati comunemente sono a fibra lunga e continua all'interno dell'elemento.

A seconda dell'orientamento le fibre possono essere:

- monodirezionali al carbonio, di vetro, di aramide (ormai in disuso) o ibride (insieme di più fibre). Si ottengono mediante tessitura, utilizzando come materia prima filamenti di carbonio, di vetro, di aramide. I tessuti vengono impregnati in situ a più strati tramite resine speciali. In questo modo si ottengono i rinforzi secondo le direzioni volute, con facilità e velocità;
- pluridirezionali al carbonio, vetro e aramide o ibride. Si ottengono mediante tessitura in cui i filamenti della materia prima vengono orientati secondo più direzioni (biassiali, triassiali, quadri assiali). Fra questi il tessuto più diffuso è quello bidirezionale dove l'ordito e la trama sono inclinate fra di loro 90° , ma anche ad inclinazioni diverse e volute. Vengono impregnate in situ con resine a più strati.

Tipi di compositi

I costituenti dei materiali compositi sono due: le fibre e la matrice, con eventuali additivi.

La matrice è il composto che caratterizza di più il materiale. E' questa infatti che deve trasmettere gli sforzi alle fibre e per questa deve essere fissa e non elastica.

I compositi più utilizzati in edilizia sono quelli plastici, e fra questi, quelli con fibre unidirezionali e bidirezionali. Nel caso di fibre monodirezionali si assiste ad una elevata anisotropia, con valori delle caratteristiche meccaniche elevati. Nel caso di fibre bidirezionali e tridimensionali, si passa a materiali anisotropi a materiali isotropi, con minori

valori delle caratteristiche meccaniche. In ogni caso le proprietà meccaniche in qualunque direzione sono proporzionali alla quantità dei fili orientati in quella direzione.

Le "fibre" possono trovarsi sotto forma di tessuti in cui le fibre stesse sono posizionate secondo varie orientazioni continue. Si hanno invece le "lamine", cioè singoli strati di fibre paralleli fra loro e i "laminati" costituiti da più lamine sovrapposte ad angolazioni diverse.

Prodotti in commercio

In commercio si possono trovare i seguenti compositi:

i laminati in fibra di vetro o di carbonio, che consistono in nastri predisposti e preimpregnati in stabilimento, incollati alle strutture da rinforzare attraverso resine applicate ad alta temperatura, che per questo sono più resistenti al fuoco. Le fibre sono parallele fra di loro e individuano la direzione principale. Le barre di fibra al carbonio, vetro, aramide pultruse, applicabili facilmente alle strutture da rinforzare e trattate con resine o malta cementizia, che conferisce loro una buona resistenza al fuoco. Corde di fibra l carbonio, vetri, aramide, (sfioocchi), analoghe alle barre, ma flessibili. Le reti in fibra

al carbonio, vetro e aramide, PBO, basalto. Ottenute per tessitura dei filamenti secondo due direzioni perpendicolari. Vengono impregnate in situ tramite resine specifiche o tramite l'utilizzo di malte cementizie. Con le malte cementizie sono da preferirsi ai tessuti monodirezionali in quanto si imbibiscono meglio attraverso la malta cementizia che ha bisogno di una trama più larga per espletare al meglio il suo compito.

I materiali FRP più diffusi sono quelli con fibre al carbonio per le loro elevate proprietà (Figura 1). Per prestazioni meccaniche più contenute si fa riferimento a fibre di vetro (che costano $\frac{1}{4}$ di quelle al carbonio), etc., fino alle fibre naturali (lino, juta, etc.)

Oggi si tende anche a mescolare fra loro i filati per ottenere caratteristiche intermedie. Come già visto, detti filati sono detti ibridi.

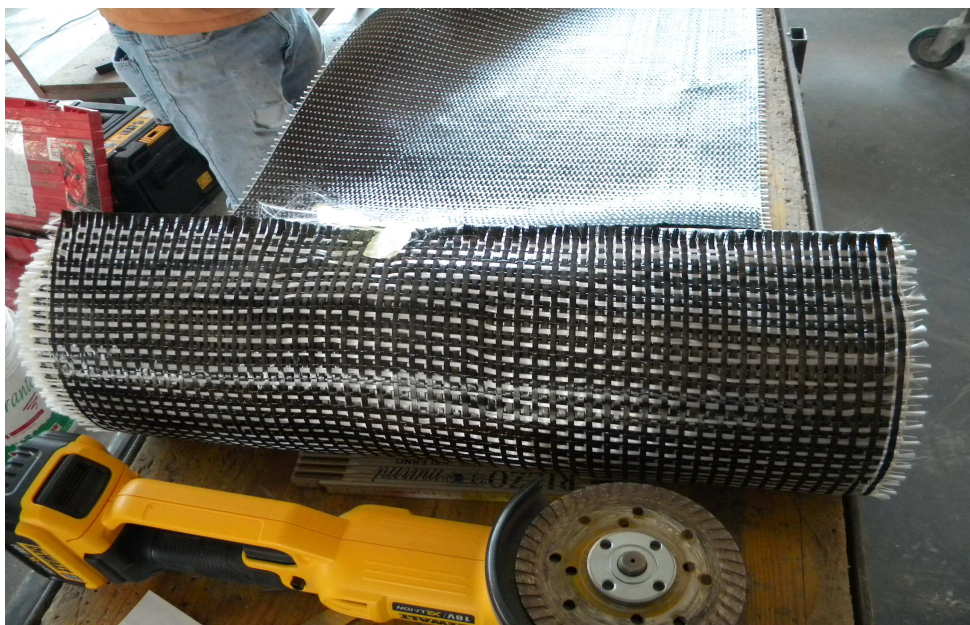


Fig. 1 Nastro unidirezionale di fibra di carbonio

I componenti i compositi

I componenti dei compositi sono le fibre, le matrici ed eventuali additivi. Ciascun componente deve rispondere a certi requisiti affinché il sistema funzioni. In modo particolare **l'interfaccia fra fibra e matrice deve avere un elevato grado di compatibilità chimica e fisica** in quanto è da questa interfaccia che dipende la resistenza a rottura del composito o di delaminazione.

Le fibre

Abbiamo visto come le proprietà meccaniche del composito dipendano prevalentemente dalle fibre impiegate.

Fibre di vetro

Si ottengono dall'estrusione di materiale siliceo; dopo successivi passaggi il diametro delle fibre si riduce fino a 3-20 μm . Le fibre vengono ricoperte da un agente protettivo che le difende dal rischio abrasione e le mantiene unite fra loro. Hanno spiccate proprietà isolanti, elevata resistenza a trazione (3300-4500 MPa), ma basso modulo elastico (80-90 GPa). Gli svantaggi sono invece l'abrasività, la sensibilità all'azione chimica, bassa resistenza all'umidità e ai carichi ciclici. I filamenti prodotti si raggruppano in una treccia.

Si chiamano GFRP e sono le fibre più diffuse in edilizia (il loro costo è circa $\frac{1}{4}$ dei quelle corrispondenti al carbonio).

Commercialmente si distinguono:

- "Vetro tipo E", di silicati di calcio, impiegato prevalentemente in campo elettrico. L'80 di fibre di vetro prodotte sono di questo tipo.

- "Vetro tipo S", di silicati di magnesio, di elevate resistenze anche ad elevate temperature, molto diffusi in edilizia.
- "Vetro tipo C", di carbonato di sodio-calce e borosilicato, dotato di elevata stabilità chimica in ambienti corrosivi.
- "Vetro tipo AR", leggero e resistente in ambiente alcalino.

Le fibre di vetro, a differenza di quelle al carbonio necessitano di un film protettivo per evitare danneggiamenti e per proteggerle dall'umidità. Allo scopo di migliorare l'accoppiamento fibra-matrice, assieme a queste fibre viene aggiunto un promotore di adesione.

Le fibre di vetro hanno un comportamento elastico lineare fino a rottura e gli scorrimenti sono trascurabili.

Fibre di carbonio

Tali fibre si possono ottenere da un trattamento a caldo di derivati del petrolio. Le elevate caratteristiche meccaniche di esse derivano dall'elevata purezza della loro struttura molecolare e dall'elevata temperatura di produzione. Detto processo consente di ottenere un forte orientamento delle fibre che provoca un aumento della resistenza nella direzione principale.

A seconda della microstruttura delle fibre, le stesse possono essere a basso o ad alto modulo di elasticità, raggiunge i 400 GPa. La resistenza a trazione delle fibre al carbonio va dai 2300 ai 5800 MPa.

Gli FRP a base di fibre al carbonio si definiscono CFRP.

Fibre di aramide

Prodotte per estrusione, si definiscono AFRP e appartengono alla classe dei polimeri cristallini liquidi. **Queste fibre**, meglio

note con il nome di "Kevlar", **presentano un modulo elastico ed una resistenza a rottura intermedi fra le fibre al carbonio e quelle di vetro**. Sono valide anche in presenza di fenomeni di fatica e scorrimento e a compressione mostrano un comportamento duttile e non lineare.

Il fatto che abbiano un comportamento duttile non lineare, significa che non sono idonee in presenza di compressione e momento flettente contemporanei: per questo non vanno adoperate nelle strutture a guscio. La loro resistenza a trazione raggiunge i 4000 MPa e il loro modulo elastico i 150 GPa. Possono degradarsi per esposizione al sole, con perdita di resistenza a trazione.

Fibre di basalto

Derivate da roccia vulcanica, dalla solidificazione delle lave, si presentano molto sottili, durevoli, resistenti al fuoco e alle vibrazioni. Si diceva della buona resistenza al fuoco: la temperatura di destabilizzazione supera i 200°C. Il processo industriale per il loro ottenimento è simile a quello per la produzione delle fibre di vetro, rispetto alle quali le fibre di basalto hanno caratteristiche prestazionali maggiori. Infatti la resistenza a trazione dei filamenti è circa 4500 MPa.

Le proprietà salienti delle fibre di basalto sono: elevate proprietà meccaniche, elevata stabilità chimica, elevate proprietà di resistenza al fuoco, di isolamento acustico, di smaltimento (essendo un materiale naturale).

Una rete di fibra di basalto bidirezionale commerciale, idonea per rinforzi strutturali, ha una resistenza a trazione di 3500 MPa, un modulo elastico di 100 GPa. Un rinforzo di tipo unidirezionale ha circa le stesse caratteristiche, nella direzione della fibra, di una rete bidirezionale.

Fibre di acciaio

I tessuti di fibre di acciaio, che stanno affacciandosi con impeto nel settore della riabilitazione strutturale, sono costituiti da fili di acciaio ad alta resistenza meccanica, accoppiati a matrice polimerica SRP (steel reinforced polymer) o a base di malte inorganiche SGR (steel reinforced grout). Essi sono in grado di avere i vantaggi degli FRP (scarso peso, facilità di applicazione, ridotti tempi dell'intervento, elevata resistenza meccanica, etc.), in aggiunta ad ulteriori caratteristiche descritte nel seguito. Sono costituiti da piccoli trefoli di esili fili di acciaio continui e intrecciati avvolti in un tessuto. Complessivamente il diametro di una fibra è di 1 mm.. Con diametri piccolissimi, si raggiungono resistenze a trazione dell'ordine di 4000 MPa.

L'acciaio consente di aumentare la duttilità dell'elemento strutturale rinforzato, e questo è un risultato molto importante, specie nel campo sismico. Inoltre l'acciaio consente di offrire una migliore resistenza al taglio e in termini di ancoraggio e connessione. Le matrici possono essere le più disparate, anzi, si possono usare tranquillamente malte cementizie, più economiche di quelle polimeriche, che comportano, tra l'altro, un notevole miglioramento al fuoco (le temperature critiche passano dagli 80°C a temperature molto più elevate, 160°C, prima che si abbia un decadimento delle proprietà meccaniche).

Inoltre questo sistema si presta ad un conveniente utilizzo su strutture murarie.

Questa tipologia di rinforzi apre nuove prospettive nel campo degli interventi di rinforzo degli elementi strutturali in edilizia.

Fibre di PVA

Le fibre di poli-vinil-alcool sono dette anche Vinylon. Hanno modulo elastico (70 GPa) e resistenza a trazione (2500 MPa), abbastanza bassi.

Fibre di PBO

Le fibre di polibenzazolo sono state introdotte nel mercato americano per l'industria aeronautica e oggi usate anche nel campo delle costruzioni, in genere come reti. Hanno elevate resistenze a trazione (6000 MPa), ed elevato modulo elastico (250 GPa) e hanno prestazioni superiori alle fibre al carbonio. Vengono normalmente impiegate con malte cementizie.

Le matrici, che sono oggi di svariati tipi, si distinguono a seconda di dove vengono realizzate, in fabbrica o in situ. Nel primo caso si producono barre, laminati, profili, corde, mentre nel secondo si impregnano tessuti o reti in situ. In ogni caso, fra supporto e il materiale composito, **si dispone un adesivo le cui caratteristiche sono fondamentali, assieme alla preparazione del supporto, per la tenuta del composito** stesso. I trattamenti superficiali al supporto vanno operati in modo scrupoloso e preciso. Ogni tipo di supporto (cemento armato, muratura, acciaio, legno), ha la sua preparazione. Se ne parla nelle specifiche trattazioni.

Matrici

Fra tutte, le matrici più utilizzate storicamente ci sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti: le resine devono essere facilmente lavorabili per far sì che tutte le fibre vengano impregnate e garantiscano l'adesione fra le fibre ed il supporto. Si illustrano nel seguito le resine termoindurenti, più utilizzate nei compositi.

Negli ultimi anni hanno preso piede anche le matrici inorganiche a base calce o cemento che presentano, tra l'altro, ottima resistenza al fuoco. In genere alle matrici vengono aggiunti riempitivi e additivi per migliorare le loro caratteristiche meccaniche e la loro resistenza al fuoco.

Resine epossidiche

Sono del tipo termoindurente. Sono in genere resine bicomponenti la cui reazione avviene sia a temperatura ambiente

che ad alte temperature. Sono fortemente resistenti agli agenti chimici e **posseggono caratteristiche meccaniche assai elevate. Anche il livello di adesione provocato fra il supporto e le fibre è elevato. Sono state e continuano ad essere le più utilizzate nel campo del rinforzo strutturale. Il loro svantaggio più grosso è la resistenza al fuoco:** per temperature superiori ai 70-80°C queste resine devono essere assolutamente protette.

Resine poliestere

Presentano caratteristiche meccaniche inferiori a quelle epossidiche, ma sono lavorabili (più viscosi) e induriscono a temperatura ambiente. Grazie al loro facile ottenimento dal punto di vista chimico, i loro costi sono inferiori.

Resine siliconiche

Come tutti i polimeri inorganici, hanno elevata resistenza al fuoco (temperatura sino ai 500°C). Poco impiegate in edilizia.

Matrici a base di malta

Trattasi per lo più di matrici cementizie o a base calce per la realizzazione di compositi a base di tessuti e di reti di fibre di carbonio, di vetro e PBO, nonché dei rinforzi tipo SGR (steel reinforced grout). La loro diffusione sta aumentando considerevolmente specie in accoppiamento con reti, in quanto **il loro problema più grosso è il livello di impregnazione raggiunto dalle fibre. Sono molto usate su supporti di muratura** grazie alla loro traspirabilità che previene fenomeni di umidità. La loro denominazione è FRCM. La matrice inorganica viene impiegata nei compositi con funzione di adesivo e sostituisce le resine tradizionali dei sistemi FRP. Questi tipi di matrici vengono utilizzate specialmente con fibre di carbonio o PBO, che presentano forti caratteristiche meccaniche e quindi in grado di assorbire gli sforzi generati da sovraccarichi originati, per esempio, da cambi di destinazione d'uso o da eventi eccezionali, quali terremoti. Ricordiamo alcune loro caratteristiche: applicabilità su supporti umidi, buona resistenza alle alte

temperature (fino a 600 ° c), elevata resistenza a cicli di gelo/disgelo, permeabilità al vapore acqueo e all'umidità, semplicità di posa in opera, facile rimozione del rinforzo. I sistemi di rinforzo FRCM (questa è la loro denominazione), modificano il comportamento a rottura di tipo fragile caratteristico delle strutture in muratura rinforzate con sistemi FRP, a favore di una maggiore deformazione dell'elemento rinforzato.

Si dice che sistemi FRCM presentano buona duttilità post-fessurazione: le deformazioni della matrice sotto carico si avvicinano a quella del supporto.

Adesivi (resine) a base acqua

Sono da poco in commercio adesivi (matrici) di prodotti bicomponenti, a base acqua, costituiti da due o più resine supportate su matrice inorganica microcristallina, tixotropica.

Nella fase di polimerizzazione si crea un reticolo interpenetrato che conferisce alla matrice elevate proprietà meccaniche e termiche, nonché una buona porosità al vapore d'acqua (traspirabilità). Tali adesivi possono essere utilizzati per adesione diretta del rinforzo su supporti in calcestruzzo, muratura, legno, opportunamente preparati, o quali promotori di adesione per l'inglobamento diretto del rinforzo su strati di malta cementizia a base calce. Gli adesivi sono in genere resistenti agli ambienti alcalini generati dalle malte cementizie, non bruciano ed hanno una elevata resistenza termica (superiore ai 160°C).

Tali adesivi presentano le seguenti proprietà meccaniche: carico a rottura per trazione 3 MPa, resistenza a flessione 5 Mpa, modulo elastico a flessione 100 MPa, deformazione a rottura 2-5%.

I principali prodotti finiti commerciali FRP sono i seguenti:

Tessuti

I filati sono accostati o intrecciati tra loro per formare tessuti unidirezionali o multidirezionali. In cantiere i tessuti giungono avvolti attorno a un rullo e si tagliano in situ e vengono incollati con matrici generalmente di resine epossidiche, ma, come abbiamo visto in precedenza, anche con altri tipi di matrici. A seconda delle indicazioni del calcolo strutturale i tessuti possono essere applicati in più strati di varia grammatura. E' possibile, durante la fase di tessitura, preimpregnare le fibre.

Esistono in commercio vari tipi di grammature: da 150 gr/mq a 1000 gr/mq. Le dimensioni dei prodotti vanno da larghezze di 10 cm. a 1 m.

Reti

In tale caso i filati sono tessuti in modo da formare una rete che viene avvolta in un rullo. Come avviene per i tessuti anche le reti vengono adattate a seconda della forma dell'elemento strutturale da rinforzare e si adatta anche a superfici curve. Esistono numerosi tipi dei reti in commercio, sia per la grammatura, che per dimensioni.

E' possibile anche adattare reti con differenti grammature di filato nelle diverse direzioni.

Barre

Non c'è una regolamentazione in Italia per questi elementi, ai fini strutturali.

Ogni produttore esegue sperimentazioni e crea brevetti delle proprie produzioni. Dal punto di vista termico, vengono definiti due coefficienti di dilatazione termica, uno longitudinale e uno trasversale. Non è facile determinare teoricamente le loro proprietà meccaniche che vanno quindi trovate sperimentalmente,

stante le diverse modalità di comportamento delle barre. Hanno buona resistenza al fuoco.

Laminati

Derivano da un processo di stabilimento chiamato pultrusione. Le fibre sono totalmente orientate nel senso del laminato e il prodotto si presenta più rigido dei tessuti: commercialmente i laminati, che hanno spessori variabili da 1 a 5 mm., hanno larghezza da 10 a 150 cm. Si usano con resine speciali che consentono loro una buona resistenza al fuoco.

Le caratteristiche meccaniche dei laminati sono superiori a quelle dei compositi di tessuti impregnati in situ (a parità di spessore delle fibre).

Il loro limite è costituito dalle tensioni tangenziali di interfaccia fra laminato e supporto con riferimento al fenomeno della delaminazione.

Connettori in fiocchi multifibra (sfocchi)

Sono a forma di corda che termina normalmente con fiocchi multifibra ad alta resistenza, idonei per ancoraggi efficaci. Contengono filamenti unidirezionali in fibra di carbonio o di vetro ad alta tenacità, racchiusi in una rete. Tagliando la rete, l'estremità del fiocco risulta sfilacciabile ed adattabile al tessuto di rinforzo.

Questo sistema limita fortemente il fenomeno della delaminazione all'estremo libero, aumentando la duttilità del sistema.

Proprietà meccaniche: resistenza a trazione a rottura 4800 MPa (fibre al carbonio) e 2000 MPa (fibre di vetro); modulo elastico a trazione 240 GPa (carbonio) e 70 (vetro).

Utilizzo dei materiali compositi nel rinforzo delle costruzioni esistenti in Europa

Moltissime strutture di fabbricati in Europa hanno più di 40-50 anni. In passato, allo scopo di riparare (rinforzi a flessione, a taglio o a confinamento) le strutture, si intraprendevano percorsi costosi e faticosi, come avveniva, ad esempio con il "beton plaquè". L'utilizzo dei materiali compositi FRP nel rinforzo strutturale ha favorito la propensione al rinforzo, anche quando lo stesso diventa consigliato nei casi di aumenti dei carichi o di eventi sismici. Oggi questi innovativi sistemi consentono di rinforzare a flessione, taglio e a confinamento, contenere le deformazioni, aumentare la duttilità, etc., senza oneri eccessivi, con facilità di posa in sito e risparmio di manodopera e maestranze varie. Anche le materie prime (tessuti, lamine, reti e matrici), sono vendute sul mercato ormai a prezzi competitivi. Inoltre l'utilizzo dei materiali compositi FRP è molto praticato negli edifici in muratura, specie in quelli storici e/o vincolati dalle Soprintendenze per i Beni Architettonici.

Il mercato europeo di questi prodotti, presente da oltre venti anni, sta diventando importante. In alcune situazioni, vista la leggerezza e la facilità di posa in opera, questi materiali sono gli unici a potere essere utilizzati: i primi interventi risalgono agli anni ottanta e hanno riguardato, oltre gli edifici, anche i ponti che necessitano di continue manutenzioni. In alcune nazioni, come la Gran Bretagna, sono state rinforzate decine di ponti con fibre al carbonio o di aramide e matrici di resine. (Siamo negli anni 2000).

Per questo motivo si rese necessario dotarsi di regole e linee-guida per il calcolo di questi rinforzi.

Anche in Germania i materiali compositi FRP sono stati utilizzati per rinforzare ponti e perlopiù strutture precomprese che mostravano problemi soprattutto in corrispondenza dei giunti,

dovuti a sbalzi termici o ad altro, specie in presenza di grandi luci.

Numerosi altri paesi europei (Svezia, Grecia, Italia, etc.), hanno cominciato ad applicare questi materiali alle strutture esistenti.

Imponenti utilizzi di materiali compositi FRP sono stati praticati in Polonia per rinforzi a flessione in fabbricati dove erano presenti grandi luci; grandi rinforzi a taglio sono stati messi in opera in Svizzera in travi da ponte. Per non parlare del diffuso utilizzo, specie in Italia, di compositi in FRP per confinare colonne esistenti in c.a. o in muratura, così come in Grecia. Il rinforzo di strutture in muratura è tipico di Italia, Grecia, Spagna e Portogallo.

Le normative

A livello europeo esistono raccomandazioni sin dal 2001, le **FIB/CEB-Bolletino n. 14/2001** "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures", che rappresentano una pietra miliare in fatto di codici per questo tipo di interventi. Queste norme, oltre a descrivere i vari tipi di compositi, di fibre e di matrici, danno significativi elementi di calcolo dei rinforzi con materiali compositi FRP per strutture in c.a., sia per flessione che per taglio e per il confinamento di elementi compressi.

Nonostante siano datate, queste raccomandazioni sono ancora prese a riferimento a livello internazionale per la conduzione delle suddette verifiche strutturali.

Un altro documento normativo molto utilizzato nel mondo è quello delle raccomandazioni **ACI 440** (American concrete institute), che si compongono di più parti:

- ACI 440.2R-02 sull'impiego dei materiali FRP di rinforzo esterno delle strutture in c.a..
- ACI 440.3R-04 che indicano i metodi per la conduzione delle prove sperimentali da condursi sui FRP.
- ACI 440.4R-04 che individuano regole per strutture precomprese con tiranti FRP.
- ACI 440.1R-06 sull'impiego del FRP sulle strutture in calcestruzzo.

In queste norme sono comprese le caratteristiche, gli scopi e gli elementi di calcolo dei rinforzi di strutture in c.a., oltre alla descrizione dei requisiti di manutenzione e di durabilità degli interventi.

Le prime linee guida giapponesi, ed internazionali, furono emanate nel 1993 e successivamente perfezionate con la **JSCE-2001** (Japan Society Civil of Engineers). Anch'esse forniscono indicazioni generali sui materiali compositi FRP applicati quali rinforzi di strutture in c.a..

Anche in questo caso vengono forniti criteri di calcolo dei rinforzi, per le principali sollecitazioni, della delaminazione, etc.. Sono utili i confronti che si faranno in seguito, fra i rinforzi di elementi strutturali sottoposti a flessione, a taglio e a sforzo normale, nelle ipotesi delle varie normative internazionali.

L'Australia si è dotata nel 2006 delle " **Australian guideline-2006**", ed affronta le tematiche presenti nelle altre normative internazionali, in maniera molto simile alle istruzioni italiane. Pongono particolare attenzione al problema della delaminazione. Regolamentano inoltre anche le barre di vari materiali inserite in apposite scanalature all'interno delle strutture in c.a. rinforzate.

Norme e linee-guida europee

Si diceva della necessità di regolamentare, in qualche modo, la progettazione strutturale dei materiali compositi e, inizialmente, si partì con codici che riguardavano principalmente strutture in cemento armato. Il task group fib 9.3, pubblicò, nel 2001, le linee-guida "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures" (fib n. 14 bulletin). In precedenza, dal 1996, il CEB (Comitè Euro-International du Bèton) aveva istituito un gruppo di lavoro di decine di membri che coinvolsero le più importanti università europee. Queste linee-guida comprendevano le basi del progetto e il concetto di sicurezza, rinforzo a flessione, a taglio, confinamento, la progettazione in zona sismica, l'esecuzione dei lavori e il controllo di qualità.

Successivamente la Svizzera si dotò nel 2004, di una raccomandazione (**SIA 1662004**), sui rinforzi esterni.

Anche l'Italia, con le **Istruzioni CNR DT 200-004, "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante utilizzo di compositi fibrorinforzati"**, si dotò di un degno strumento di progetto dei rinforzi con materiali compositi, strutturato all'incirca come il FIB 14-2001 "Guide for design and construction of externally bonded FRP system for strengthening existing structures", contenenti però indicazioni anche sulle strutture in muratura.

In Inghilterra, sempre nel 2004, venne pubblicata la seconda edizione delle **TR552004** "Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials".

Intanto la ricerca progrediva e coinvolgeva, con passione, le principali università europee. Nel frattempo ci si ponevano gli interrogativi inerenti i difetti di questi materiali, allo scopo di cercare, tramite la ricerca, di contenerne gli effetti. Tra questi vi era, senza dubbio, la **scarsa resistenza al fuoco delle matrici** (e in genere delle resine). Dopo anni di ricerca, oggi le matrici di resine epossidiche, ad esempio, possono essere

sostituite da resine speciali, da malte cementizie o da calci, che non risentono della temperatura, se non per valori sopra i 160°C, con risultati, in termini di resistenze ultime a rottura, più che accettabili.

Un altro importante tema di ricerca riguarda l'aspetto del "debonding" delle fibre rispetto al supporto e alle fibre stesse. Tale tema, peraltro preso in considerazione dalle più evolute normative (compresa quella italiana), ha interessato pure molteplici lavori di ricerca.

Linee-guida europee “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” (FIB n. 14/2001)

Il documento riporta lo stato dell'arte della conoscenza e diffusione dei metodi di riparazione di strutture in c.a., con l'ausilio di compositi FRP, negli anni 2000, che vedevano il pieno sviluppo della ricerca e degli studi su questa innovativa materia. Contemplano una dettagliata descrizione dei materiali e delle tecniche di applicazione dei compositi come rinforzo esterno di strutture in c.a.. Contengono diversi capitoli ciascuno dei quali dedicato ad un particolare aspetto dei rinforzi. In altri capitoli vengono riportati i metodi di progetto strutturale degli stessi (rinforzi a flessione, taglio, confinamento e torsione). Completano l'opera alcune considerazioni sui dettagli costruttivi e regole di buona pratica del costruire, nonché disposizioni per il controllo di qualità.

Materiali. Il documento entra nel merito delle problematiche legate agli aspetti fisico-chimici dei materiali.

Classificazione e caratterizzazione dei tessuti per il rinforzo. Esistono diversi tipi di sistemi FRP: wet lay-up (tessuti preimpregnati); sistemi di elementi prefabbricati (lamine); sistemi speciali, quali ad esempio l'avvolgimento automatico, barre di FRP, sistemi di precompressione, etc.. A seconda del sistema utilizzato, si utilizzano diversi tipi di fibre e di adesivi. Diversi sono i requisiti fisici e chimici che occorre considerare: temperatura, umidità, etc.. Un adesivo, ad esempio, inizia il processo di indurimento a temperature sopra i 10°C. Se la temperatura è troppo elevata, si ha la decomposizione della matrice adesiva.

Adesivi. Gli adesivi provvedono a trasmettere gli sforzi di taglio fra il rinforzo e il supporto in calcestruzzo. La scienza dell'adesione è multidisciplinare; demanda a considerazioni e concetti chimici, polimerici, reologici e della meccanica delle fratture. Il documento prende in considerazione solo i più comuni tipi di adesivi epossidici, che risultano dal mescolamento di resine epossidiche con un induritore. Gli adesivi possono contenere inclusioni, polveri, additivi e altro. Il successo delle applicazioni dipende anche dal supporto, dalla sua pulizia, regolarità, compattezza, etc.. Quando si usano adesivi epossidici ci sono due diversi tempi da considerare. Il primo è il "*pot life*" rappresenta il tempo in cui inizia a lavorare l'adesivo dopo il mescolamento di resina epossidica e induritore. Il secondo è l'"*open time*" che è il tempo che intercorre dalla posa dell'adesivo al suo indurimento. Per gli adesivi di fondamentale importanza è la **temperatura di transizione vetrosa T_g** , perché dal valore di essa dipende la stabilità delle matrice polimerica.

Gli adesivi epossidici hanno molti vantaggi nel caso di utilizzo nell'ingegneria civile: alta attività superficiale e buona proprietà di bagnatura dei vari strati; possono essere formulate in modo da avere un lungo "open time"; alta capacità coesiva e quindi di trasmissione degli sforzi; resistenza alle intrusioni di materiali indesiderati quali polveri, etc., minimo ritiro rispetto alla superficie di applicazione, con limitazione dello stato tensionale indiretto; basso creep; caratteristica di tixotropicità che facilita l'impiego su pareti verticali; regolarizzazione del supporto con il suo spessore.

Si riporta nel seguito un confronto fra le tipiche proprietà degli adesivi epossidici, calcestruzzo e acciaio.

Property (at 20 °C)	Cold-curing epoxy adhesive	Concrete	Mild steel
Density, [kg/m ³]	1100 - 1700	2350	7800
Young's modulus, [GPa]	0.5 - 20	20 - 50	205
Shear modulus, [GPa]	0.2 - 8	8 - 21	80
Poisson's ratio	0.3 - 0.4	0.2	0.3
Tensile strength, [MPa]	9 - 30	1 - 4	200 - 600
Shear strength, [MPa]	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Compressive strength, [MPa]	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Tensile strain at break, [%]	0.5-5	0.015	25
Approximate fracture energy, [Jm ⁻²]	200-1000	100	10 ³ -10 ⁶
Coefficient of thermal expansion, [10 ⁻⁶ /°C]	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Water absorption: 7 days - 25 °C, [% w/w]	0.1-1	5	0
Glass transition temperature, [°C]	45 - 80	---	---

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche della resina epoxy, calcestruzzo, acciaio

Matrici. Le matrici per un materiale composito strutturale possono essere di tipo termoindurente o termoplastico. La funzione della matrice è, fra l'altro, quella di proteggere le fibre dall'abrasione, dalla corrosione, etc.. Le matrici hanno notevole incidenza sulle proprietà meccaniche di un composito, quali la resistenza a trazione e il modulo elastico, nonché per la trasmissione degli sforzi dal supporto al composito.

Le resine epossidiche, poliestere e vinilestere sono le più comuni matrici usate nei compositi. Esse sono polimeri termoindurenti con buona lavorazione e buona resistenza chimica. Le resine epossidiche hanno generalmente migliori proprietà meccaniche di quelle poliestere o vinilestere e maggiore durabilità.

Fibre. Le fibre sono materiali molto resistenti e la loro proprietà principale è la capacità di trasmettere carichi tra il supporto e il rinforzo. Le fibre vengono prodotte continue o discontinue., ma si prendono in considerazione solo fibre continue. Esse hanno diametro dell'ordine di 5-20 µm, e possono essere monodirezionali o multi direzionali. **Le fibre utilizzate per i rinforzi hanno un comportamento elastico lineare fino a rottura.** I principali tipi di fibre sono: al carbonio, di vetro, di aramide. Il documento si sofferma ad illustrare le caratteristiche di questi tipi di fibre, riassumibili nella tabella 3.

Material	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain (%)
Carbon			
High strength	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Ultra high strength	215-235	3500-6000	1.5-2.3
High modulus	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Ultra high modulus	500-700	2100-2400	0.2-0.4
Glass			
E	70	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
Aramid			
Low modulus	70-80	3500-4100	4.3-5.0
High modulus	115-130	3500-4000	2.5-3.5

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche di vari tipi di fibre

Materiali FRP. I materiali FRP consistono in un grande numero di piccole, continue, orientate, fibre non metalliche che vengono annegate in una matrice a base di resina. Le fibre possono essere di vario tipo: CFRP (al carbonio), GFRP (di vetro), AFRD (in aramide). In genere la frazione di volume in fibre è di circa il 50-70% per lamine ed il 25-35% per fogli..Diverse sono le tecniche di produzione, per esempio la pultrusione e il lay-up.

Un confronto fra le proprietà meccaniche delle lamine FRP e dell'acciaio sono di seguito riportate (tabella 3).

Material	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain (%) $\rightarrow T_2$
	E_f	f_f	
<i>Prefabricated strips</i>			
Low modulus CFRP strips	170	2800	1.6
High modulus CFRP strips	300	1300	0.5
Mild steel	200	400	25*

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche di lamine e acciaio

La tabella 4 mostra le proprietà delle parti di cui è costituito un composito.

Chosen properties for constituent materials of FRP composite:								
$E_{fib} = 220 \text{ GPa}$			$f_{fib} = 4000 \text{ MPa}$					
$E_m = 3 \text{ GPa}$			$f_m = 80 \text{ MPa}$					
Cross-sectional area			FRP-properties				Failure load	
A_{fib} (mm ²)	A_m (mm ²)	A_f (mm ²)	V_{fib} (%)	E_f (eq. 2-1) (MPa)	f_f (Eq. 2-2) (MPa)	Ultimate strain (%)	(kN)	(%)
70	0	70	100	220000	4000	1.818	280.0	100.0
70	30	100	70	154900	2824	1.823	282.4	100.9
70	70	140	50	111500	2040	1.830	285.6	102.0

* In case of a strip with a width of 100 mm dividing this value by 100 mm gives the thickness of the strip (resp. 0.7 mm, 1.0 mm and 1.4 mm).

Tabella 4. Proprietà delle parti di cui è costituito un composito.

Nel grafico 1 sono rappresentati gli andamenti dei rapporti tensione-deformazione fra le varie frazioni di volume di fibre.

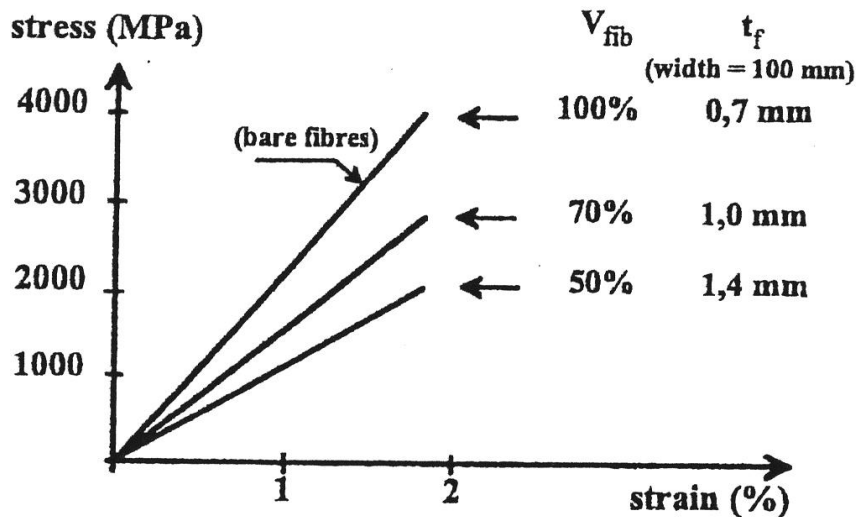


Grafico 1. Andamenti dei rapporti tensione/deformazione fra le varie frazioni del volume di fibre

Sistemi FRP EBR. Esistono diversi sistemi di rinforzo esterno FRP (FRP EBR), in relazione ai materiali costituenti, la forma e la tecnica di applicazione. In generale si possono distinguere in sistemi "wet lay-up" (o "cured in-situ") e sistemi "prefab" (o "Pre-cured"). Il documento descrive nel dettaglio i due diversi tipi.

Tecniche di rinforzo con i FRP.

Tecnica di base. La tecnica di base per la realizzazione di rinforzi con FRP è quella del lay-up, cioè dell'incollaggio in situ di lamine o di strati di fibre in una o più direzioni

principali. Esistono anche tecniche speciali di applicazione, quali il "wrapping" automatico, usato principalmente per colonne o pile da ponte.

Inoltre è molto diffusa anche la tecnica del "prestressed FRP" che consiste nell'applicare sforzi di precompressione agli elementi inflessi per ritardare la crisi per taglio. Si può porre particolare attenzione anche agli ancoraggi dei rinforzi che possono essere anche di tipo meccanico. Infine il rinforzo nell'elemento in c.a. può essere "inside slits" (figura 2), cioè inserito, mediante tagli, all'interno della sezione, ma in posizioni volute. Anche il sistema di impregnazione "FRP impregnation by vacuum" è un nuovo sistema di stesura della resina sulla superficie dell'elemento (trave) in c.a. da rinforzare. Si riporta uno schema dell'applicazione (figura 3).

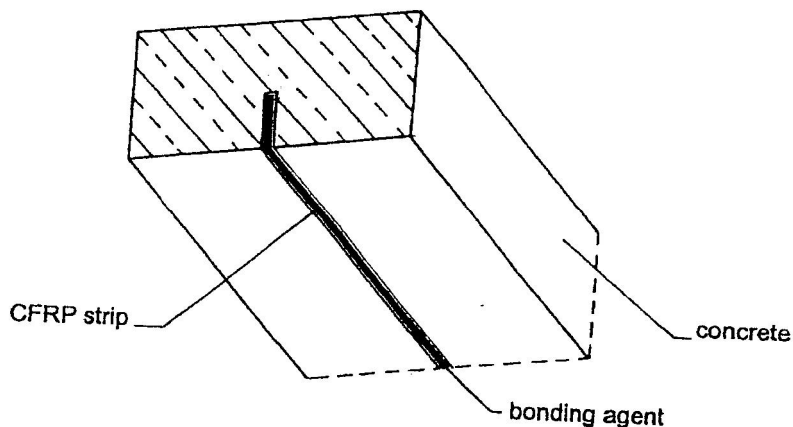


Figura 2. Inside Slits

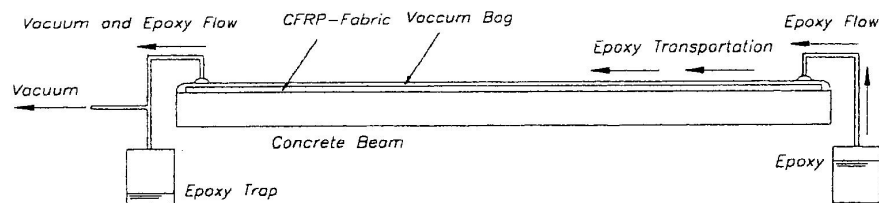


Figura 3. Sistema di impregnazione prefabbricato

Basi del progetto e concetto di sicurezza.

Occorre considerare tutte le situazioni di progetto e le combinazioni di carico quando si progetta un rinforzo. Il progetto di sistemi di rinforzo FRP EBR hanno molti riflessi sulle capacità aggiuntive che hanno le sezioni resistenti di resistere a trazione e di trasferimento delle azioni dal rinforzo al calcestruzzo (interfaccia). La procedura di progetto consiste nel verificare lo stato limite di esercizio e lo stato limite ultimo. Le principali situazioni di progetto da considerare sono le seguenti: situazione normale in cui si pensa a un normale uso della struttura e una situazione accidentale in cui viene ad ammalorarsi il rinforzo a causa di atti di vandalismo, resistenza al fuoco, impatti, etc..

La verifica agli stati limite di esercizio (non obbligatoria), consiste nella verifica delle tensioni, delle deformazioni e dell'inflessione, del cracking, cioè di rotture e fessurazioni (che incidono sulla durabilità del sistema). La verifica agli stati limite ultimi considera i differenti modi di rottura e prevede coefficienti di sicurezza per i carichi γ_F e per i materiali γ_M , come specificato nell'EC2. Il diagramma tensioni-spostamenti è il seguente:

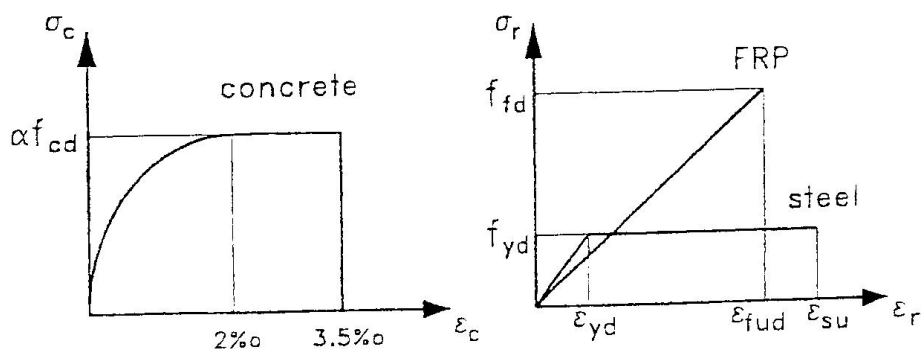


Grafico 2. Tensioni /Deformazioni del Calcestruzzo e dell'Acciaio

Fattori di sicurezza. Il fattore di sicurezza dei materiali vale, per il calcestruzzo $\gamma_c=1,5$ e per l'acciaio $\gamma_s= 1,15$. A seconda del tipo di fibre utilizzato, il fattore di sicurezza è di seguito sintetizzato.

FRP type	Application type A ⁽¹⁾	Application type B ⁽²⁾
CFRP	1.20	1.35
AFRP	1.25	1.45
GFRP	1.30	1.50

Tabella 5. Fattori di sicurezza

Si riporta infine il diagramma della distribuzione delle deformazioni allo SLU nelle sezioni critiche di sezioni di travi inflesse.

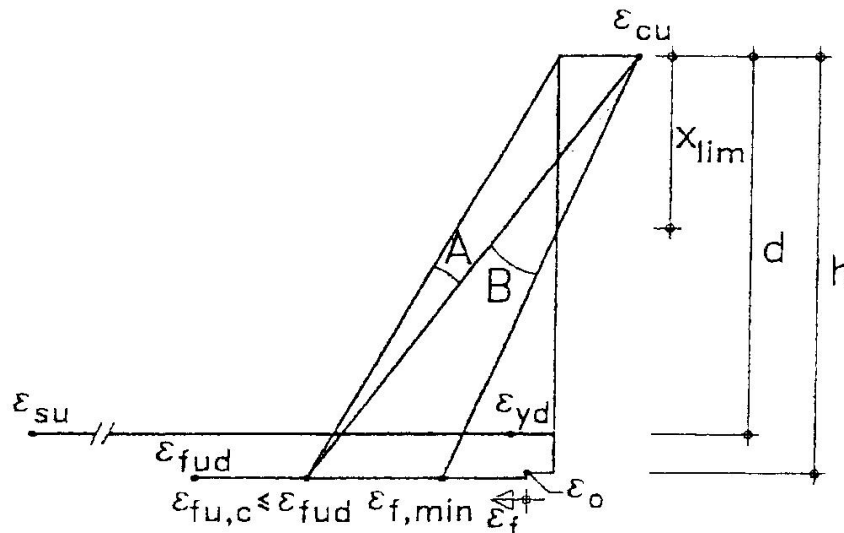


Grafico 3. Diagramma della distribuzione delle deformazioni allo SLU nelle sezioni critiche di sezioni di travi inflesse.

Contenuti particolari.

Il documento riporta la non applicabilità di materiali che non siano stati caratterizzati sperimentalmente. I valori dei coefficienti parziali dei materiali sono analoghi a quelli previsti dalle DT 200 italiane. Qualora le applicazioni non rispettino il procedimento di certificazione previsto, le tensioni vengono penalizzate, con l'inserimento di un coefficiente parziale di modello $\gamma_{RD} > 1$. L'area resistente, per impregnazione in situ, da considerare, è solo quella del tessuto secco. Si adotta un coefficiente di riduzione da applicarsi alle proprietà meccaniche dell'FRP.

La durabilità è la grande incognita di tutto il sistema. Occorre fare attenzione alla penetrazione di acqua e agli agenti corrosivi, il che, suggerisce di procedere a precauzioni quali

protezioni, incapsulamenti, etc.. Se i siti sono ad elevata alcalinità sono da preferirsi fibre al carbonio piuttosto che fibre di vetro e scelta una matrice adatta a questo ambiente. In questi casi è consigliabile l'uso di rivestimenti protettivi. Attenzione anche ai cicli di gelo-disgelo: l'acqua ghiacciata interna alle micro fessure del supporto, può causare de laminazione. Inoltre attenzione alle radiazioni ultraviolette. I materiali polimerici degradano se sottoposti a radiazioni UV-A e radiazioni UV-B che possono causare la dissociazione chimica del collegamento. La reazione con l'ossigeno può portare all'ossidazione e all'idrolisi, con perdita di piccole molecole. La luce solare causa un cambiamento di colore del composito, che potrebbe essere sintomo di una mutazione della resistenza (cosa da verificare bene). Per quanto riguarda la viscosità ed il rilassamento, il documento è assai diverso dalla DT200 italiana. Assieme allo scorrimento viscoso, analizza lo "stress repture" e lo "stress corrosion": individua l'AFRP come il sistema più sensibile alla viscosità perché ha un creep naturale che provoca un forte incremento delle deformazioni a lungo termine. La viscosità si abbassa assicurando, in esercizio, un basso livello tensionale. Il creep condiziona raramente il dimensionamento del rinforzo FRP, a meno che la struttura non sia nuova (ad elevata viscosità). La corrosione avviene in presenza di tensioni. Le fibre al carbonio non sono attaccabili dalla corrosione a differenza delle AFRP e GFRP, che sono molto sensibili. La vulnerabilità allo "stress repture" e allo "stress corrosion" aumentano con l'accoppiamento delle seguenti fibre e resine: carbonio-epossidica, aramide-vinilestere, vetro-poliestere. Consigliato il CFRP se il rinforzo esterno deve avvenire sotto sforzi considerevoli. Il GFRP ha scarse proprietà sotto carichi mantenuti nel tempo, pervenendo a rottura per trazione ("stress repture"). Quando l'ambiente è corrosivo è pure consigliabile CFRP. Il documento inoltre, definisce l'energia di frattura (delaminazione), dalla quale dipendono tutte le altre grandezze in

gioco, in modo semplice e molto diverso rispetto alle DT200 italiane.

La progettazione strutturale dei rinforzi

Il documento si riferisce al rinforzo a flessione, a taglio, a confinamento e a torsione di elementi in c.a.. Il rinforzo a flessione si basa sul calcolo agli stati limite ultimi. La duttilità flessionale viene trattata come nelle linee-guida americane.

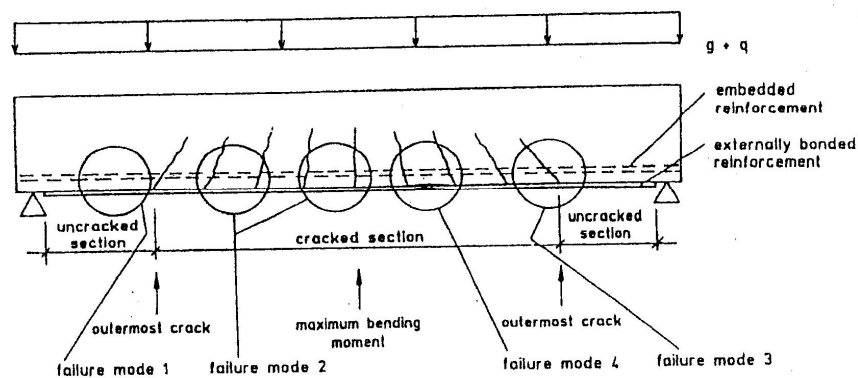


Figura 4. Sistema di formazione delle lesioni nella rottura a flessione

Il rinforzo a taglio prevede tre schemi di rinforzo (come le DT200). In zona sismica prevede l'utilizzo di soli avvolgimenti a "U" o totali (come le DT200). Pur basandosi sul traliccio resistente e su una tensione effettiva, contiene espressioni che si basano sulla regressione di dati sperimentali eterogenei e di

scarso numero, a differenza delle semplici equazioni riportate dalle DT200.

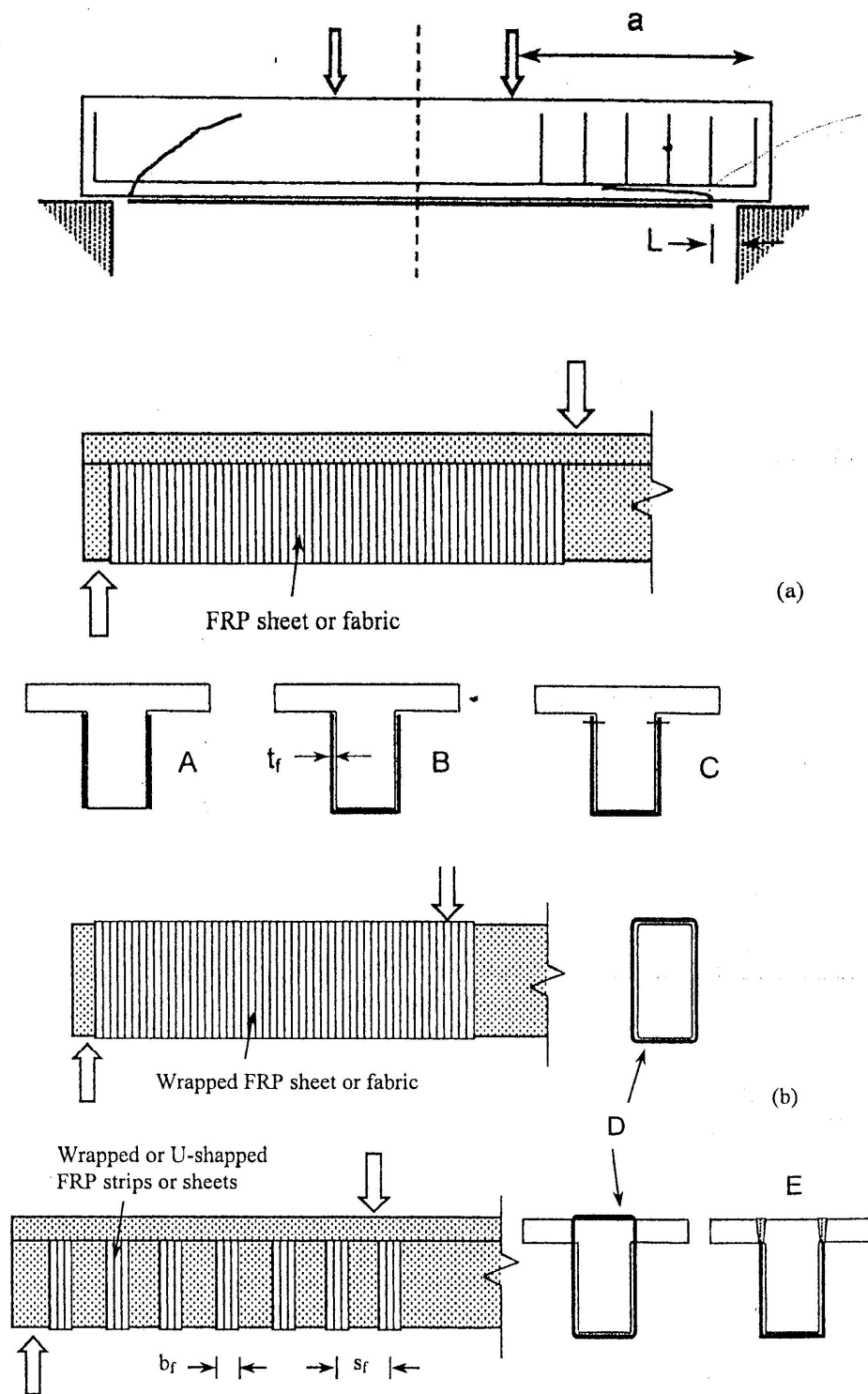


Figura 5. Rinforzo a taglio

Tratta il rinforzo a torsione, a differenza di molte altre normative.

Il documento contiene indicazioni per il calcolo del confinamento di elementi in c.a.

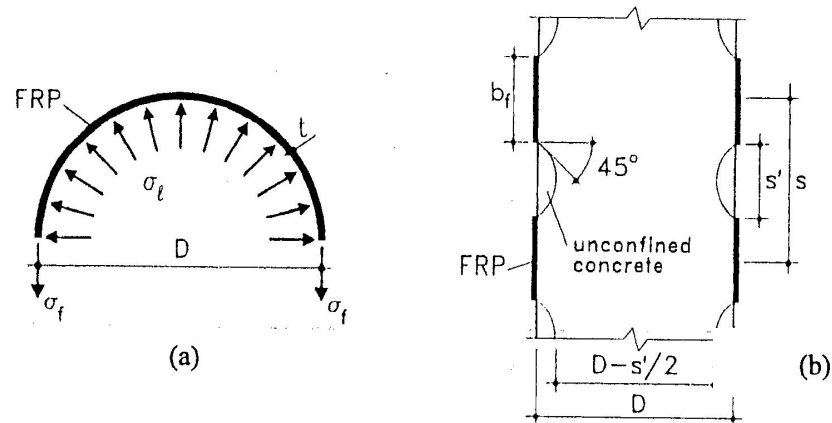


Figura 6. Confinamento con compositi di colonne in C.A.

Il testo contiene indicazioni per il calcolo del confinamento di elementi in c.a..

Il CEB/FIP n. 14 ha fatto da "apripista" per le altre linee-guida, con l'impiego di formule e coefficienti. La resistenza ultima raggiungibile tramite confinamento è penalizzata (si utilizzano formule di regressione). Il valore della deformazione ultima del calcestruzzo confinato dipende dalla deformazione ultima del composito e dalla resistenza del calcestruzzo e quindi dal modulo elastico del calcestruzzo stesso. L'argomento del confinamento è trattato in modo diverso rispetto alle altre linee-guida.

Linee-guida Americane AC 440.2R “Progetto e costruzione di sistemi in FRP per il rinforzo esterno”.

Il documento fornisce una guida per le scelte, la progettazione e l'applicazione dei sistemi FRP per il rinforzo di strutture in c.a., con indicazioni per il controllo di qualità e la manutenzione. Non è ancora facile predire il comportamento nel tempo dei sistemi di rinforzo FRP in quanto non sono disponibili dati riguardanti le prestazioni a lungo termine. Le linee-guida tengono conto della durabilità e del degrado legato a fattori ambientali utilizzando coefficienti riduttivi, mentre i fenomeni di fatica e di deformazione viscosa sono considerati ponendo limitazioni sui valori delle tensioni di lavoro. Il documento pone particolare attenzione alle problematiche relative all'aderenza fra il sistema FRP ed il supporto in c.a..

Il testo fornisce indicazioni per una definizione appropriata dei dettagli costruttivi e delle tecniche di applicazione dei sistemi FRP, tali da prevenire crisi dovute a rotture premature. In realtà essendo i materiali compositi fragili ed anisotropi, gli ancoraggi andrebbero attentamente valutati (anche con prove), prima dell'applicazione.

Inoltre non vengono prese in considerazione le problematiche relative ai processi di produzione, controllo di qualità, manutenzione, così come non sono menzionate le applicazioni alle murature. Per una valutazione della affidabilità del sistema FRP per ogni specifica applicazione, il progettista dovrebbe effettuare una analisi delle strutture esistenti, specie con riferimento alla condizione del supporto in calcestruzzo. La resistenza a trazione del calcestruzzo, relativamente allo strato superficiale, laddove sarà applicato il rinforzo, deve essere valutata conducendo almeno una prova di “pull-off”. Per tenere conto dei limiti del rinforzo è raccomandabile di limitare

l'incremento della capacità portante ottenibile in modo da compensare eventuali parziali perdite di resistenza.

Sono molto importanti anche le modalità di conservazione dei materiali (specie le resine, i promotori di adesione, etc.), nonchè i tempi di conservazione. Il produttore deve fornire i certificati di conformità di tutti gli elementi ed i componenti che arrivano in cantiere, con particolare attenzione ai rischi sull'utilizzo e sul loro smaltimento.

Circa l'installazione, il documento fa riferimento alle istruzioni di ciascun produttore, precisando comunque che l'installazione deve essere eseguita da personale specializzato. L'installatore deve mostrare competenza nella preparazione delle superfici e nell'applicazione del rinforzo: la qualifica deve essere provata sia attraverso la documentazione dell'attività formativa, sia attraverso altre applicazioni similari già eseguite, o attraverso la preparazione di campioni a piè d'opera. I produttori devono provvedere alla formazione degli installatori per l'applicazione dei propri prodotti.

Temperatura, umidità relativa e condensa superficiale durante l'installazione alterano le prestazioni dei sistemi FRP. La temperatura dell'aria, l'umidità relativa e il punto di rugiada devono essere controllati. Il primer, le resine impregnanti e gli adesivi non devono essere applicati su superfici fredde o gelate. Inoltre è buona norma che resine e adesivi non siano utilizzati su superfici umide o bagnate o in presenza di vapore acqueo.

Per quanto riguarda la preparazione superficiale, dalla qualità del supporto dipende l'intero sistema di rinforzo: una preparazione inadeguata può causare il distacco o la delaminazione prima del raggiungimento della resistenza totale ultima ideata in fase di progettazione.

E' inoltre buona norma non applicare il rinforzo esterno in FRP su elementi in c.a. in cui si teme ci siano armature in acciaio corrose. Tutte le parti eventualmente corrose devono essere bonificate prima dell'applicazione del sistema di rinforzo. La preparazione superficiale del supporto dipende da come si fonda

rispetto all'aderenza (*bond-critical*) o sul contatto (*contact-critical*). Quelle che si basano sull'aderenza (rinforzi a flessione e a taglio), devono essere ben pulite e prive di materiale sciolto o incoerente. Quando le fibre rivestono spigoli vivi, questi devono essere arrotondati con un raggio minimo di 15 mm. Per prevenire sia l'insorgere di concentrazioni tensionali, sia la formazione di vuoti fra FRP e calcestruzzo. Quindi occorre fare un lavoro preventivo di regolarizzazione meccanica o con l'uso di resine quali il *putty*. Le irregolarità, gli spigoli o rientranze, le superfici concave, i corpi estranei possono alterare le prestazioni del sistema. La preparazione superficiale può essere condotta anche con tecniche abrasive o utilizzando acqua ad alta pressione. Piccole cavità e vuoti superficiali non dovrebbero eccedere 1 mm. O quanto raccomandato dal produttore.

In quelle che si basano sul contatto, quali per esempio gli interventi di confinamento, la superficie deve garantire il contatto ultimo tra la superficie del calcestruzzo e il rinforzo esterno. Gli elementi da fasciare devono presentare superfici piane o convesse per garantire un adeguato caricamento del sistema in FRP. Le irregolarità vengono riparate con un materiale compatibile con il calcestruzzo esistente. I materiali con resistenza e modulo elastico più piccoli del calcestruzzo, potrebbero compromettere l'efficacia del sistema e devono essere rimossi. La preparazione della resina deve essere conforme alle procedure messe a punto dal produttore. Tutti i componenti della resina devono essere a temperatura indicata e devono essere perfettamente mescolati. I componenti delle resine hanno colori molto diversi tra loro e la preparazione può considerarsi completata quando non vi sono più striature nel composto. Il produttore deve fornire la quantità di resina in rapporto tra i componenti, le modalità di preparazione ed i tempi ottimali per il mescolamento. L'attrezzatura comprende piccoli miscelatori elettrici o frullini, ma è anche possibile mescolare le resine a mano. Le quantità di resina di volta in volta preparate devono poter essere applicate entro il tempo stabilito. Trascorso tale

tempo, le resine non devono essere più utilizzate a causa dell'aumento della viscosità che diminuisce, sia della loro capacità di penetrazione nella superficie del calcestruzzo, che la capacità di impregnazione delle fibre.

Per quanto riguarda l'applicazione dei materiali costituenti il rinforzo, occorre tenere presente che alcune resine possono causare esalazioni e quindi l'emissione di prodotti organici volatili e tossici.

Primer e putty. Il primer deve essere applicato su tutte le superfici sulle quali installare il rinforzo in modo tale da fornire un grado di copertura come da scheda tecnica, deve essere protetto dalla polvere, dall'umidità e da altri agenti nocivi prima dell'applicazione del sistema in FRP. Il putty deve essere applicato dopo il primer secondo gli spessori suggeriti dal produttore. Esso si presenta come pasta epossidica più densa rispetto alle altre resine e dovrebbe essere utilizzato solo per riempire spazi vuoti o per lisciare eventuali asperità prima dell'applicazione degli altri materiali. Prima dell'applicazione *dell'adesivo*, il primer e il putty devono avere raggiunto il livello di polimerizzazione ottimale suggerito dal produttore.

Sistemi di *wet-lay-up* sono generalmente installati a mano adoperando fibre secche e resine impregnanti, seguendo le indicazioni del produttore: le fibre possono essere anche impregnate separatamente con macchinario adeguato prima della applicazione sulla superficie del calcestruzzo. Le fibre del rinforzo devono essere pressate delicatamente sullo strato di resina impregnante non ancora indurita. Eventuale aria intrappolata deve essere eliminata prima che la resina faccia presa. La quantità di resina utilizzata deve essere tale da garantire la perfetta impregnazione delle fibre. L'applicazione di ulteriori strati di materiale di rinforzo deve esser fatta prima che l'ultima mano di saturand abbia terminato la fase di polimerizzazione. Qualora l'ultima mano di saturand sia completamente polimerizzata, è necessario procedere ad una leggera

sabbiatura o utilizzare specifici solventi raccomandati dal produttore.

Sistemi applicati industrialmente. Tali sistemi fanno uso di bobine di fibre che possono arrivare in cantiere sia sotto forma di materiale pre-impregnato non completamente polimerizzato che di fibre secche le quali riceveranno le resine direttamente in cantiere. L'impiego di macchinari automatici è particolarmente conveniente quando si tratta di fasciare elementi verticali quali pilastri o colonne. La macchina è sistemata vicino alla colonna e ne avvolge il perimetro salendo e scendendo lungo la colonna stessa.

Dopo la fasciatura i sistemi preimpregnati dovrebbero polimerizzare a temperature elevate. Generalmente si dispone di una fonte di calore intorno alla colonna ad una opportuna temperatura e per il tempo raccomandato dal produttore. Il rinforzo non presenta alcuna giunzione poiché il tessuto è continuo.

Strati multipli e lunghezze di ancoraggio. L'applicazione di più strati di materiale di rinforzo è consentita a condizione che i singoli risultino perfettamente impregnati e che la resistenza a taglio della resina sia tale da trasferire gli sforzi tangenziali tra gli strati e che l'aderenza tra sistema in FRP e calcestruzzo sia sufficiente. Le sovrapposizioni devono essere sfalsate e il loro dimensionamento deve far parte del progetto, il quale, a sua volta, dipende dalle normative di riferimento. In genere le sovrapposizioni sono di 10-20 cm.

Polimerizzazione delle resine. La polimerizzazione è funzione del tempo e della temperatura ambiente. Le resine che polimerizzano all'aria possono impiegare diversi giorni per indurire completamente (in genere una settimana). Temperature eccezionali o molto variabili possono ritardare o accelerare il processo di indurimento. I produttori allegano schede tecniche al riguardo. La polimerizzazione di uno strato già applicato dovrebbe essere controllata prima dell'applicazione dello strato

successivo. L'installazione degli strati successivi deve essere interrotta se si riscontra un'anomalia nella presa.

Sicurezza all'incendio.

Le strutture rinforzate devono rispettare le normative antincendio. Al fine di ridurre la diffusione del fumo e delle fiamme si possono utilizzare manti protettivi. Si assume che la resistenza dei sistemi FRP (tradizionali con resine epossidiche), si annulli durante l'incendio, per tale motivo l'elemento strutturale, privo del rinforzo, deve sopportare i carichi. Come già detto, le caratteristiche fisiche e meccaniche delle resine che costituiscono l'FRP sono influenzate dalla temperatura. Alla temperatura che varia da 60 a 80°C, si ha il passaggio allo stato vetroso (T_g =temperatura di transizione vetrosa) e si verificano danni permanenti al materiale. E' ovvio che la temperatura massima di servizio di un materiale FRP non dovrebbe eccedere tali valori.

La resistenza e lo strato del supporto in calcestruzzo devono essere attentamente valutati per decidere sulla sua idoneità. Il calcestruzzo deve avere una resistenza tale da garantire il trasferimento degli sforzi dal rinforzo esterno in FRP alla sezione in c.a.. Il rinforzo mediante sistemi FRP non dovrebbe essere effettuato nel caso in cui la resistenza a compressione del supporto di calcestruzzo sia minore di 15 Mpa. Per applicazioni in cui l'aderenza non è essenziale ed è solo necessario un contatto intimo tra calcestruzzo e materiale di rinforzo come, ad esempio, le fasciature di colonne e pilastri, tali limitazioni possono essere trascurate. In tali applicazioni, lo stato tensionale e deformativo dell'FRP è causato dalla deformazione laterale o dilatazione della sezione in calcestruzzo.

Proprietà meccaniche

Comportamento a trazione.

Nel caso di sollecitazione a trazione i materiali FRP non mostrano alcun comportamento plastico (snervamento) prima della rottura. Il comportamento a trazione dei materiali compositi

composti da un solo tipo di fibra è caratterizzato da una relazione tensione-deformazione di tipo elastico-lineare fino a rottura, che avviene in maniera improvvisa. Poiché le fibre in un composito rappresentano il costituente che porta la maggior parte del carico, il tipo, l'orientamento e la quantità di esse ne governano le proprietà meccaniche. A causa del ruolo primario delle fibre, le proprietà di un sistema di rinforzo sono riportate con riferimento all'area netta delle fibre. L'area totale di un sistema FRP è calcolata con riferimento a tutta la sezione trasversale di un composito, che comprende tutte le fibre e la matrice. I produttori devono fornire una resistenza ultima a trazione, definita secondo queste linee-guida, così come il valore del modulo elastico.

Comportamento a compressione.

Il modulo elastico a compressione è di solito più basso del modulo elastico a trazione.

Comportamento nel tempo.

I materiali FRP soggetti ad un carico costante nel tempo possono improvvisamente rompersi dopo un certo tempo di permanenza sotto carico. In genere le fibre al carbonio sono le meno suscettibili a rottura per creep, le fibre di aramide sono sensibili e le fibre di vetro sono quelle più esposte a creep.

Quanto più la tensione di lavoro nell'FRP è al di sotto del valore limite di rottura per viscosità, tanto più la resistenza dell'FRP è disponibile per incrementi del carico di natura ciclica.

Fatica. Negli ultimi decenni le ricerche condotte hanno consentito di dire che i materiali in CFRP sono i meno soggetti a crisi per fatica.

Per quanto riguarda le fibre di vetro, quando queste si trovano conglobate in una matrice si osserva un decadimento di circa il 20% della resistenza statica iniziale per ogni decade della vita utile dovuto a fenomeni di fatica (Mandell,1982). Le fibre aramidiche mostrano un buon comportamento a fatica.

Ispezioni per eventuali manutenzioni. I sistemi FRP devono essere controllati secondo quanto stabilito dalle normative tecniche. In assenza di tali prescrizioni, le ispezioni dovrebbero essere fatte da ispettori qualificati o da ingegneri abilitati. Detti controlli devono interessare le condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa), condizioni superficiali del supporto, modalità di preparazione del supporto, descrizione della pulizia superficiale del supporto, esistenza delle fessure, numero di prelievo di fibre e laminati, numero di prelievi di resina, osservazioni sulle modalità di presa delle resine, conformità delle applicazioni alle disposizioni progettuali, dettagli su prove di aderenza tipo pull-off, in termini di resistenza dell'interfaccia, posizione e dimensioni delle delaminazioni.

Verifica a accettazione.

I sistemi FRP dovrebbero essere verificati e accettati o non accettati sulla base della conformità o meno alle specifiche progettuali.

Materiali. Prima della messa in opera il produttore deve allegare, ad ogni fornitura, la certificazione delle proprietà fisico-meccaniche di tutti i materiali previsti in progetto. Deve inoltre garantire la sua marchiatura dalla quale risulti chiaramente il riferimento dell'azienda produttrice, lo stabilimento di produzione, il tipo di materiale. Per progetti di particolare importanza si devono eseguire prove supplementari sui materiali impiegati.

Orientamento delle fibre. L'orientamento delle fibre o dei laminati devono essere sottoposti ad indagine visiva.

Delaminazioni. I sistemi FRP devono essere controllati nei riguardi dei fenomeni di delaminazione e formazione di bolle d'aria fra i vari strati del composito o tra esso e il supporto in calcestruzzo. Gli strumenti di indagine devono essere in grado di accertare l'eventuale presenza di delaminazioni localizzate. Possono essere impiegati metodi quali sondaggi acustici, metodi a ultrasuoni, termografie.

Resistenza all'adesione. La resistenza a trazione lungo la superficie di adesione deve essere superiore a 1,5 MPa e la modalità di rottura deve interessare il supporto in calcestruzzo.

Spessori al finito. Piccoli campioni di diametro di 10 mm possono essere estratti per accertare lo spessore al finito del laminato o il numero di strati di tessuto applicati. E' opportuno evitare di estrarre campioni in corrispondenza di zone molto sollecitate o di sovrapposizioni del rinforzo. I fori risultanti dall'estrazione devono essere riempiti con malta o con putty e successivamente livellati.

Manutenzione e riparazione. Il committente dovrebbe periodicamente effettuare ispezioni e verifiche sul sistema FRP impiegato. Le cause di eventuali danneggiamenti o deficienze riscontrate in seguito alle ispezioni devono essere valutate prima di un intervento.

Ispezioni. L'ispezione visiva può riguardare i seguenti fenomeni: debonding, peeling, formazione di bolle d'aria, fessure, irregolarità dei sistemi FRP. Prove ad ultrasuoni, sondaggi acustici e prove termografiche possono essere impiegate per l'individuazione di fenomeni di delaminazione in atto.

Prove. Il collaudo potrà avvenire con prove di trazione tipo pull-off.

Riparazione del sistema di rinforzo. Il metodo da impiegarsi nella riparazione del sistema di rinforzo è strettamente legato al tipo di materiale, alle cause e al livello di degrado raggiunto. Danni di minore entità come, ad esempio, fessurazioni localizzate o abrasioni del rinforzo FRP, possono essere riparati anche incollando ulteriori strati di FRP sulle zone danneggiate. Essi devono possedere le stesse caratteristiche del rinforzo originario (stesse fibre, stesso orientamento, etc.) e vanno installate seguendo le specifiche del produttore. Danni di maggiore entità come, fenomeni di peeling e debonding che riguardano ampie zone possono richiedere l'asportazione delle regioni interessate e il successivo ripristino del supporto in calcestruzzo seguito dalla sostituzione del rinforzo.

I sistemi di rinforzo FRP devono essere progettati per resistere a sforzi di trazione e non di compressione soddisfacendo contemporaneamente la compatibilità tra le deformazioni del rinforzo e quelle del supporto di calcestruzzo sul quale sono applicati. **Il contributo della resistenza a compressione del rinforzo in FRP dovrà essere trascurato.**

Filosofia del progetto. Le raccomandazioni contenute nelle linee-guida per il calcolo dei rinforzi in FRP sono basate sui principi del metodo agli stati limite. Questo approccio garantisce di avere un sufficiente grado di sicurezza sia nei confronti dello stato limite di esercizio (controlli sull'ampiezza delle fessure e sulle deformazioni che nei riguardi degli stati limite ultimi (collasso dell'elemento strutturale, rottura del rinforzo e comportamento a fatica). Nel calcolare la resistenza nominale dell'elemento da rinforzare devono essere individuate sia le modalità di rottura sia le deformazioni) e tensioni associate a ciascun materiale che concorre alla resistenza dell'elemento rinforzato. Per determinare il comportamento in esercizio di un elemento rinforzato si ricorre ai principi base quali l'omogeneizzazione della sezione e l'impiego nei calcoli di sezioni parzializzate. Il rinforzo deve essere progettato sia dal punto di vista della resistenza, adottando opportuni coefficienti di sicurezza, che del comportamento in esercizio. **Qualora i materiali FRP siano impiegati per l'adeguamento sismico di una struttura può essere appropriato adottare indicazioni progettuali tali che la struttura riesca ad attingere la sua completa resistenza e contemporaneamente sia in grado di sopportare gli sforzi a taglio associati all'evento sismico.** I sistemi FRP, se impiegati per il rinforzo di colonne, devono essere progettati per garantire la necessaria resistenza alle sollecitazioni sismiche, attraverso la dissipazione di energia assorbita ed il controllo delle deformazioni nelle sezioni in cui è massimo lo sforzo di

taglio. Come conseguenza di tale filosofia progettuale, elementi rinforzati con FRP possono richiedere ulteriori ristrutturazioni o addirittura la completa sostituzione, in seguito ad evento sismico. Si deve infine prestare molta attenzione nel riutilizzare una struttura danneggiata da evento sismico, in particolare se essa ha subito eventuali incendi.

Limiti del rinforzo. Particolare attenzione deve essere prestata alla definizione dei limiti del rinforzo. Tali limiti sono imposti per tutelare il progettista da possibili collassi prematuri causati dalla perdita del rinforzo dovuta, ad esempio, ad incendi o altro. E' auspicabile che l'elemento non rinforzato sia in grado di resistere comunque ad una certa aliquota dei carichi, in modo che la struttura resista sotto i carichi di esercizio senza crollare. Per questo motivo la norma contiene indicazioni al riguardo. Per quanto riguarda gli incendi, la resistenza al fuoco può essere migliorata mediante l'utilizzo di materiali isolanti.

Resistenza strutturale complessiva. Se da un lato i materiali FRP sono in grado di fornire un elevato contributo al miglioramento delle prestazioni strutturali di elementi soggetti a flessione, taglio e pressoflessione, dall'altro, e in alcune situazioni specifiche come quelle causate dal punzonamento o dalla resistenza a schiacciamento delle fondazioni, il loro contributo è pressoché trascurabile.

Applicazioni sismiche. Come visto le presenti linee-guida riguardano i rinforzi a flessione e a taglio, ma anche il rinforzo delle colonne. I materiali compositi vengono impiegati per il miglioramento della resistenza a compressione del conglomerato mediante confinamento, per la riduzione delle lunghezze di sovrapposizione delle armature previste dalle norme e per incrementare la resistenza a taglio. Qualora il progetto di rinforzo interessi travi o solai di edifici situate in zone sismiche, è necessario valutare la resistenza e la rigidezza sia della trave (o del solaio) che delle colonne, per assicurarsi che

la formazione delle cerniere plastiche avvenga lontana sia dal nodo che dalle colonne.

Comportamento in caso di impatto. Le fibre aramidiche e quelle di vetro presentano proprietà migliori rispetto a quelle di carbonio.

Rottura per creep e comportamento a fatica. **Le fibre al carbonio sono quelle che meglio si comportano sia sotto l'azione di carichi costanti che possono indurre rotture per creep, sia nei confronti di sollecitazioni di fatica dovute a carichi ciclici.**

Condiderazioni sulla scelta del tipo di protezione. Un manto protettivo può essere applicato direttamente sull'ultimo strato del rinforzo per proteggerlo da particolari condizioni ambientali. Lo spessore del manto protettivo va determinato in funzione delle caratteristiche del materiale composito e deve quindi rispondere ad esigenze di protezione specifiche (eccessi di umidità, ambiente marino, alte temperature, impatto, esposizione a raggi ultravioletti). Lo scopo del manto protettivo è quello di ritardare il processo di degrado che interessa le proprietà meccaniche dei vari sistemi FRP. A questo scopo è opportuno ispezionare periodicamente tale film protettivo onde evitare che con tempo possa degradarsi.

Proprietà del rinforzo

Le linee-guida affrontano per esteso il problema del rinforzo a flessione, del rinforzo a taglio, del confinamento.

Dettagli per il rinforzo. Molte delle modalità di rottura premature possono essere evitate seguendo le prescrizioni che seguono:

- Non applicare il rinforzo su spigoli interni;
- Prevedere un raggio minimo di 13 mm quando il tessuto viene applicato in corrispondenza di uno spigolo esterno;
- Prevedere un'adeguata lunghezza di ancoraggio nella direzione delle fibre in caso di sovrapposizioni.

Aderenza e delaminazione. Per un sistema in FRP installato su calcestruzzo integro (nessuna fessurazione presente), il punto debole è proprio il calcestruzzo nell'interfaccia calcestruzzo/FRP. La distribuzione elastica delle tensioni normali e tangenziali sono di seguito rappresentate.

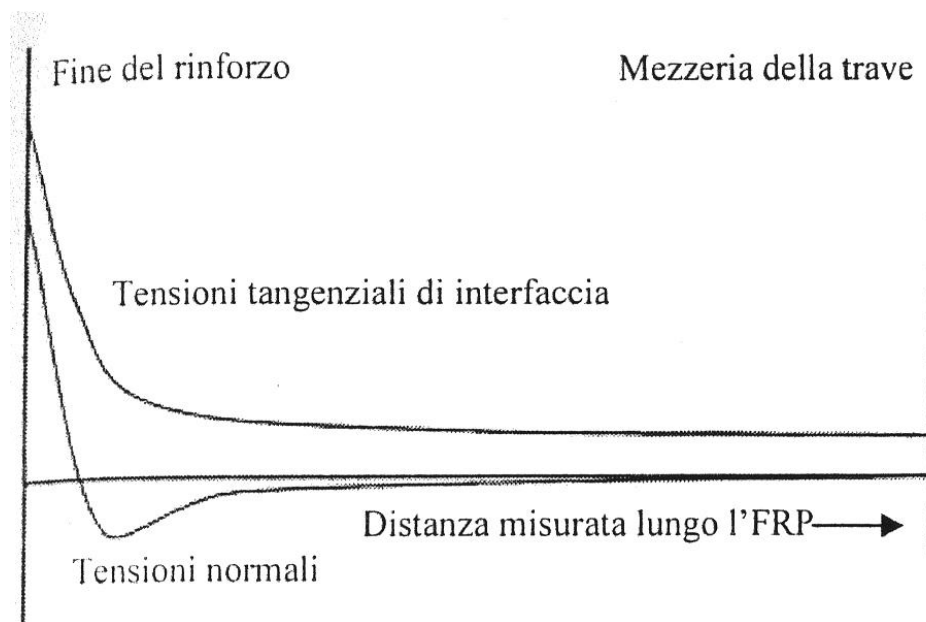


Grafico 4. Distribuzione elastica delle tensioni normali e tangenziali lungo una trave appoggiata

Delaminazione. La perdita di aderenza di un composito ben eseguito può dipendere dalle carenze della superficie di incollaggio. **Il calcestruzzo non è in grado di sopportare le tensioni tangenziali d'interfaccia; di conseguenza si ha un fenomeno di delaminazione nel rinforzo con conseguente asportazione di un sottile strato di calcestruzzo.** I fenomeni di delaminazione o di crisi di interfaccia hanno caratteristiche di rottura fragile. Ancoraggi meccanici possono essere efficaci per aumentare il trasferimento delle tensioni tangenziali.

Asportazione del copriferro. Per questo tipo di delaminazione, la presenza dell'armatura metallica costituisce un elemento di discontinuità tra le due porzioni di calcestruzzo che si trovano sopra e sotto l'armatura. In questo caso la delaminazione del rinforzo esterno avviene con la completa asportazione del copriferro.

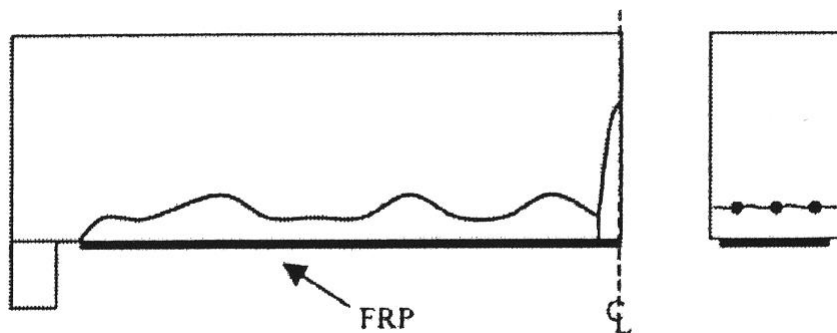


Figura 7. Asportazione del copriferro per delaminazione lato calcestruzzo

La crisi per asportazione del copriferro è legata in particolare al livello tensionale che si attinge nel punto terminale del rinforzo in FRP. Per scongiurare questo tipo di rottura evitando complesse analisi teoriche, si possono eseguire indicazioni di carattere generale per il corretto posizionamento del punto di interruzione del rinforzo:

- Per travi semplicemente appoggiate, gli strati del rinforzo dovrebbero estendersi per una distanza $d > 150$ mm oltre il punto corrispondente al raggiungimento del momento di prima fessurazione M_{cr} . Inoltre se la sollecitazione di taglio dovuta ai carichi agenti è, nel punto terminale del rinforzo, maggiore di $2/3$ della resistenza a taglio fornita dal calcestruzzo, il rinforzo in FRP dovrebbe essere ancorato con un'armatura trasversale per prevenire la crisi per delaminazione del copriferro;
- Per le travi continue rinforzate con più strati, lo strato più corto di FRP dovrebbe terminare ad una distanza pari a $d/2$ o 150 mm oltre il punto di momento nullo.

Queste prescrizioni sono valide sia dove il momento è positivo che negativo.

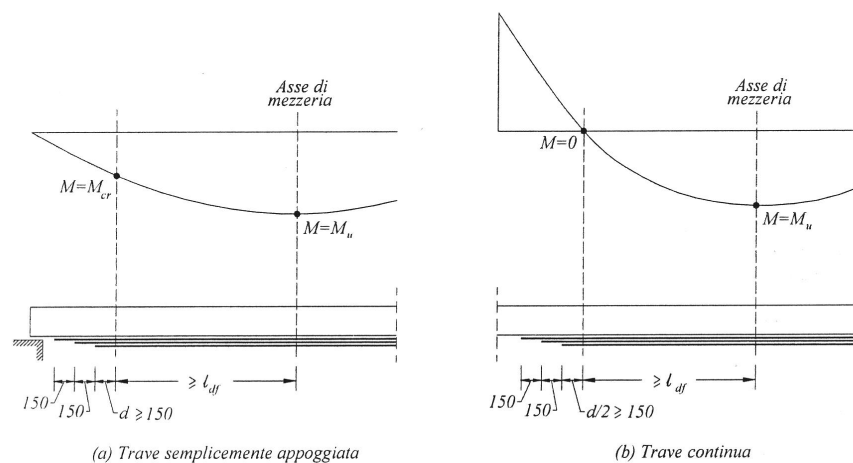


Figura 78. Esempi di ancoraggi dei rinforzi.

Le sovrapposizioni. La lunghezza della sovrapposizione dipende dalla resistenza a trazione e dallo spessore del rinforzo e dal valore di aderenza degli strati sovrapposti. E' necessario che la lunghezza di sovrapposizione sia tale per cui si abbia la rottura a trazione nel rinforzo FRP prima che si inneschino rotture per delaminazione. I sistemi FRP utilizzati per il confinamento di elementi compressi dovrebbero essere progettati in modo da garantire un appropriato sviluppo nelle zone di sovrapposizione in modo da far sì che la rottura avvenga al di fuori di tali zone. Per rinforzi unidirezionali le sovrapposizioni vengono richieste solo nella direzione delle fibre. Per rinforzi con reti la sovrapposizione avviene in tutte le direzioni in cui lavorano le fibre.

Disegni esecutivi e documento di progetto

Il documento fornisce indicazioni dettagliate sul contenuto delle relazioni di calcolo e dei disegni esecutivi. Vengono inoltre precisati:

- *Produttore del sistema FRP.* Il produttore deve far pervenire al progettista del rinforzo tutta la documentazione e tutte le certificazioni necessarie per la redazione completa del progetto;
- *Progettista;*
- *Impresa esecutrice del rinforzo.* Deve fornire, fra l'altro, l'elenco dei lavori precedenti realizzati dall'Impresa, con

particolare riferimento a quelli nei quali l'installazione è simile a quella da realizzare;

- *Ispettore del sistema FRP.*

Le norme italiane.

Le norme italiane sui materiali compositi si compongono di due documenti: " Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati" - CNR-DT200/2004 e "Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a.c.a.p. e murarie mediante FRP"- Consiglio LL.PP. 24.07.2009. Il primo documento, nonostante l'uscita del secondo per rendere rispondente il testo alle intervenute "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14.01.2008, è il testo guida. L'Italia si sia dotata di strumenti normativi innovativi e fondati su numerose ricerche nel campo dell'applicazione dei materiali compositi nell'Ingegneria Civile. Tutti i documenti normativi internazionali, sino ad allora, si riferivano al solo caso di rinforzi di strutture in cemento armato. Le Istruzioni italiane comprendono anche le indicazioni sulle strutture in muratura, essendo il tessuto edilizio esistente italiano prevalentemente di strutture murarie. Scopo delle istruzioni è quello di fornire, nell'ambito delle norme vigenti, un documento orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati. Le Istruzioni non sono norme cogenti ma rappresentano esclusivamente un ausilio per i progettisti strutturali. Per quanto riguarda le strutture di c.a. e c.a.p. e di quelle murarie sono inoltre fornite specifiche indicazioni concernenti le costruzioni in zona sismica, in linea con i più recenti orientamenti recepiti dalle

normative nazionali ed internazionali. Il contenuto del documento è conforme agli eurocodici.

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione σ_r	Deformazione a rottura ε_r	Coefficiente di dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	[g/cm ³]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acciaio da costruzione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	7.8

Tabella 6. Confronto tra le proprietà delle fibre e delle matrici più comuni.

La tabella 6 descrive i principali tipi di fibre per compositi disponibili in commercio.

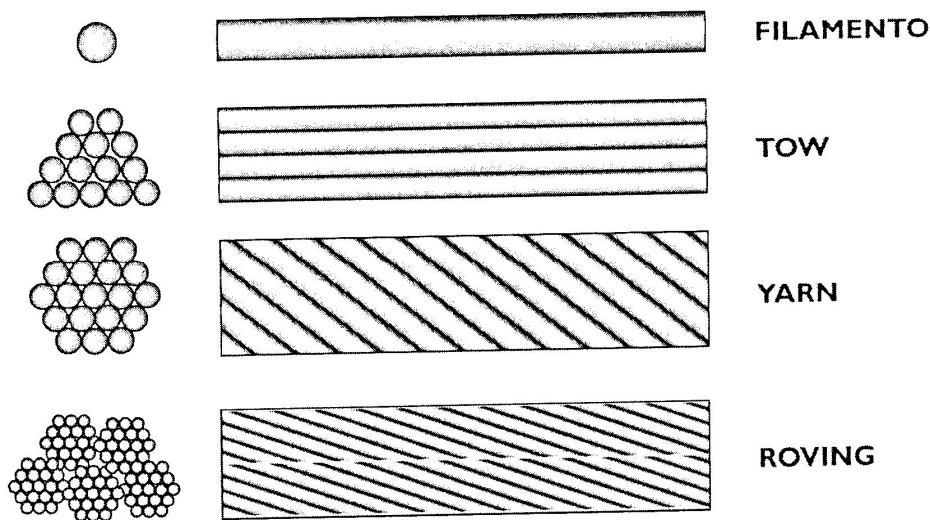


Figura 9. Tipologie di fibre

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo esse sono disponibili commercialmente nelle forme sopra espresse. Combinando insieme alcune centinaia di tows o yarns si ottiene il tape in cui tows e yarns possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti fra loro o fissati ad un supporto.

Fibre di vetro.

Sono molto usate in campo industriale e navale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte. Il vetro è composto prevalentemente da silice (SiO_2). Sono indubbiamente la tipologia di fibre meno costose tra quelle prese in esame dal documento. Le altre normative le ritengono le meno durevoli ma le recenti ricerche hanno dimostrato che è in forte ascesa il rapporto prezzo-prestazioni nel senso che questa tipologia di fibra rappresenta un giusto compromesso tra affidabilità, durabilità ed economicità. Le fibre di vetro hanno un modulo di elasticità normale (circa 80 GPa) inferiore a quello delle fibre al carbonio e di quelle di aramide ed offrono una resistenza all'abrasione modesta, che richiede una certa attenzione nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre **esse hanno una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica.**

Fibre di carbonio.

Si utilizzano per compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro resistenza. Hanno un comportamento a rottura tipicamente fragile caratterizzato da un assorbimento di energia modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate. Sono le fibre meno sensibili allo scorrimento viscoso (creep) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine. La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite, ma ci si avvicina di molto. Il numero di filamenti contenuti nel cavo di filatura (tow) può variare da 400 a 160000. Il trattamento di grafitizzazione avviene a 3000°C .

Fibre aramidiche.

Sono di natura organica, introdotte negli anni settanta, si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alla manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi fra quelli delle fibre al carbonio e quelle di vetro. La loro resistenza compressione è circa 1/10 di

quella a trazione. Esse si degradano per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione del 50%. Sono inoltre sensibili all'umidità. Il comportamento viscoso (creep) è simile a quello delle fibre di vetro, mentre la resistenza a rottura è comunque elevata così come la resistenza fatica. Le fibre aramidiche sono disponibili in commercio sotto forma di Yarn, roving e di tessuti.

Caratteristiche dei filati.

Esistono anche fibre naturali, quali quelle che si usano per fare i tessuti. I filati non sono commercializzabili come materiali per il rinforzo strutturale.

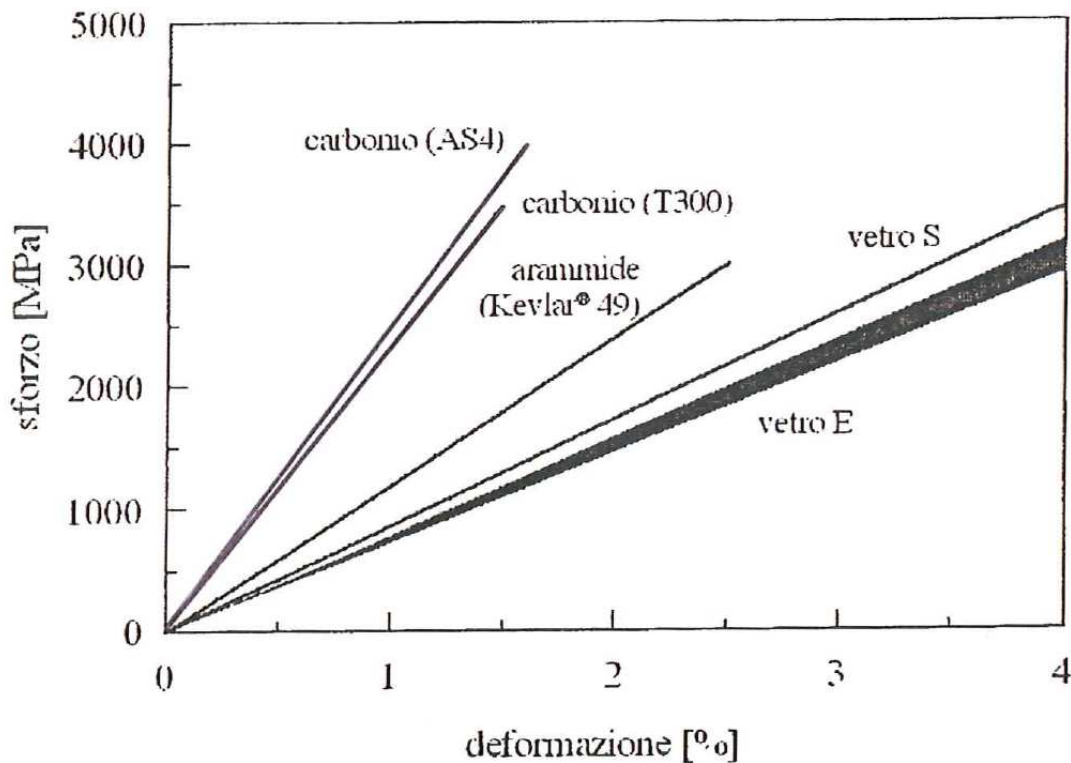


Grafico 5. Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione.

Matrici

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione di compositi per usi strutturali sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con opportuno reagente esse

polimerizzano fino a diventare un materiale solido vetroso. Sono dotate di bassa viscosità e quindi sono facilmente impregnanti, hanno ottime capacità adesive, hanno una buona resistenza agli agenti chimici e non hanno temperatura di fusione, ampio campo di temperature di esercizio limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa T_g , **hanno un comportamento fragile e sensibilità all'umidità in fase di applicazione alla struttura. Le resine termoindurenti più diffuse sono quelle epossidiche**, ma vi sono altre resine assai diffuse: quelle poliestere o vinilestere. La loro applicazione è riservata a personale specializzato. Sono anche disponibili matrici polimeriche termoplastiche, che possono richiedere tecniche di applicazione molto diverse dalle precedenti, quali ad esempio barre di composito che hanno il vantaggio di potere essere applicate in qualsiasi momento mediante un opportuno trattamento termico.

Resine epossidiche.

Sono dotate di buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici e presentano buone capacità adesive. Particolarmente indicate per la realizzazione di compositi nell'ingegneria civile. Presentano il limite della temperatura massima di utilizzo (temperatura di transizione vetrosa T_g) che se supera i 60°C comincia ad evidenziare problemi. La struttura chimica della resina può essere variata a piacere in base alla composizione chimica del prepolimero epossidico. Sono resine termoindurenti.

Resine poliestere.

Queste resine sono meno viscosi di quelle epossidiche e anche la resistenza meccanica e le proprietà adesive sono inferiori. La famiglia delle resine poliestere per materiali compositi è essenzialmente costituita da isoftaliche, orto ftaliche e bis fenoliche. Sono resine termoindurenti.

Altri tipi di resine.

I limiti delle **resine termoindurenti**, in particolare la modesta tenacità, le temperature di esercizio piuttosto basse e la tendenza ad assorbire umidità dall'ambiente, hanno portato allo sviluppo di matrici termoplastiche. Sono più tenaci di quelle

termoindurenti e presentano temperature di esercizio più elevate. Resistono meglio agli agenti atmosferici. **Sono molto viscosi e questo rende problematica la loro capacità impregnante. Per impieghi ad elevata temperatura in ambienti chimicamente aggressivi, sono state sviluppate le resine vinilestere che sono un compromesso fra le resine poliestere e quelle epossidiche.** Le matrici di natura inorganica (cementizie, metalliche, ceramiche, etc.), che si sta sperimentando in molte università italiane ed estere, non sono esaminate dal documento.

Sistemi di rinforzo

I sistemi di FRP idonei per i rinforzi esterni di strutture sono i seguenti.

Sistemi preformati (pre-cured system). Sono ottenuti in stabilimento mediante pultrusione o laminazione, i quali sono incollati all'elemento strutturale da rinforzare.

Sistemi impregnati in situ (wet lay-up system). Sono costituiti da fogli di fibre unidirezionali o multidirezionali o da tessuti che vengono impregnati con resina, la quale funge anche da adesivo con il substrato interessato (calcestruzzo, muratura, etc..)

Sistemi preimpregnati (prepreg system). Sono costituiti da fogli di fibre unidirezionali o multidirezionali o da tessuti preimpregnati con resina parzialmente polimerizzata. Possono essere incollati al substrato da rinforzare con o senza l'uso di resine aggiuntive.

Proprietà meccaniche dei sistemi di rinforzo. In questi sistemi le fibre svolgono un ruolo di elementi portanti in termini di resistenza e di rigidità, oltre a proteggere le fibre e fungono da elementi di trasferimento degli sforzi fra le fibre e l'elemento strutturale cui il rinforzo è applicato. La maggior parte dei compositi è costituita da fibre che hanno elevata resistenza e rigidità, mentre la loro deformazione a rottura è inferiore a quella della matrice. Sono sotto riportati i legami costitutivi di fibre, matrice e composito.

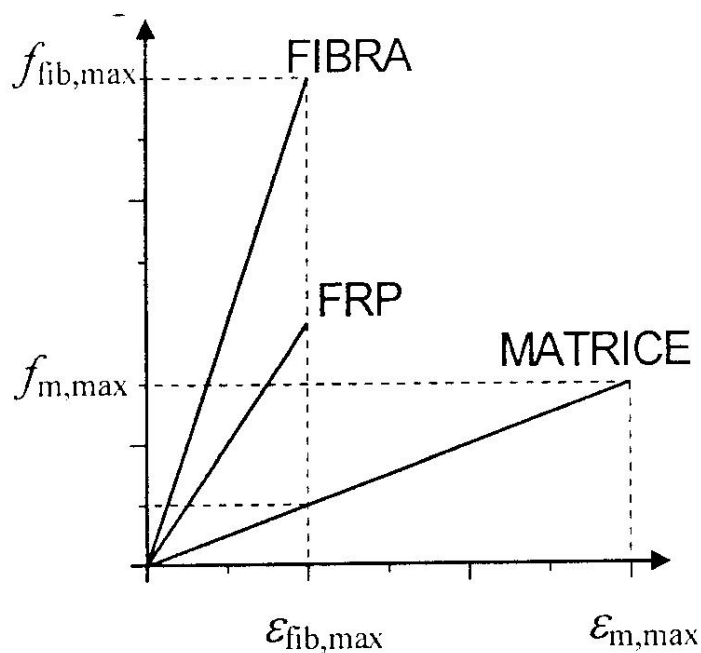


Grafico 6. Legami costitutivi di fibre, matrice e composito.

Qualificazione dei materiali

Il produttore deve provvedere al processo di qualificazione di un prodotto FRP, con i seguenti obiettivi: assicurare la qualità del prodotto ed il rispetto dei valori minimi dichiarati; fornire un numero statisticamente significativo di risultati sperimentali relativi alle caratteristiche fisiche e meccaniche del prodotto che siano un utile strumento per la progettazione del rinforzo; fornire eventuali dati relativi a prove sperimentali da cui possano desumersi informazioni sul comportamento nel tempo del prodotto FRP.

Le prove di qualificazione riguardano le caratteristiche meccaniche (rigidezza e resistenza) e fisiche possedute dai materiali compositi. Vi sono due livelli di qualificazione dei prodotti: livello1 in cui si definiscono le caratteristiche fisiche e meccaniche del composito attraverso un'analisi statistica di una serie sufficientemente ampia di prove; livello2 in cui si definiscono anche le caratteristiche fisiche e meccaniche del composito a lungo termine. Le prove meccaniche devono essere condotte da un laboratorio qualificato.

Accettazione

I materiali fibrorinforzati da utilizzarsi nel rinforzo delle strutture devono rispondere ad un adeguato livello di prestazioni meccaniche e fisiche, ed essere assoggettati ad una serie di controlli. La scelta e la verifica dei materiali compete alle diversi figure professionali e di processo. Il documento esamina i compiti e le responsabilità degli operatori preposti al controllo: produttori/fornitori devono fornire i certificati di prova dei prodotti perché si abbia corrispondenza di ogni lotto di fabbricazione con le specifiche dichiarate. Sui prodotti deve essere riportata una marchiatura per la rintracciabilità. I produttori devono essere in grado di fornire il sistema completo di rinforzo (fibre, resine, etc.) e di certificare, oltre i singoli componenti, anche il sistema nel complesso. Questi sistemi completi saranno indicati come applicazioni di tipo A o B a seconda che sia certificato il materiale più il supporto o solo i materiali. Il progettista deve indicare la qualità e le proprietà dei singoli componenti del sistema di rinforzo, evidenziando nel progetto anche le condizioni di accettabilità dei prodotti nonché le prove di qualità da intraprendere. Imprese appaltatrici e applicatori si preoccupano di organizzare materiali conformi alle prescrizioni del progettista e di verificare la presenza di schede tecniche idonee a giudicare i prodotti e di agire in perfetta sintonia con la direzione lavori. Il direttore dei lavori verifica la rispondenza dei prodotti forniti con le prescrizioni progettuali e controlla le marchiature ove presenti, può richiedere l'esecuzione di prove in situ o in laboratori specializzati dei componenti i compositi. In caso di applicazioni A è facoltà del direttore lavori richiedere prove di accettazione del sistema in generale. Nel caso di applicazioni tipo B il direttore lavori richiede prove di controllo sul prodotto finito e della qualità dell'installazione. Laboratori di prova devono dimostrare adeguata esperienza nel campo dei compositi ed avere attrezzatura idonea e svolgere le attività di prova secondo le norme per la qualità (EN-ISO17025). Il collaudatore deve

verificare la qualità dei materiali impiegati e i certificati di accompagnamento delle forniture, l'avvenuta accettazione da parte del direttore dei lavori e i risultati delle prove condotte.

Trasporto, stoccaggio e movimentazione

Il documento si sofferma inoltre nella descrizione delle modalità di trasporto, stoccaggio (conservazioni secondo le raccomandazioni del produttore, utilizzo nel rispetto delle regole della sicurezza, etc.), e la movimentazione (utilizzo di componenti i sistemi compositi quali le resine che devono essere mescolate in situ, etc.).

Principi generali del progetto di rinforzo

Il documento prosegue con i principi generali del progetto di rinforzo, con la valutazione della resistenza nei confronti della delaminazione

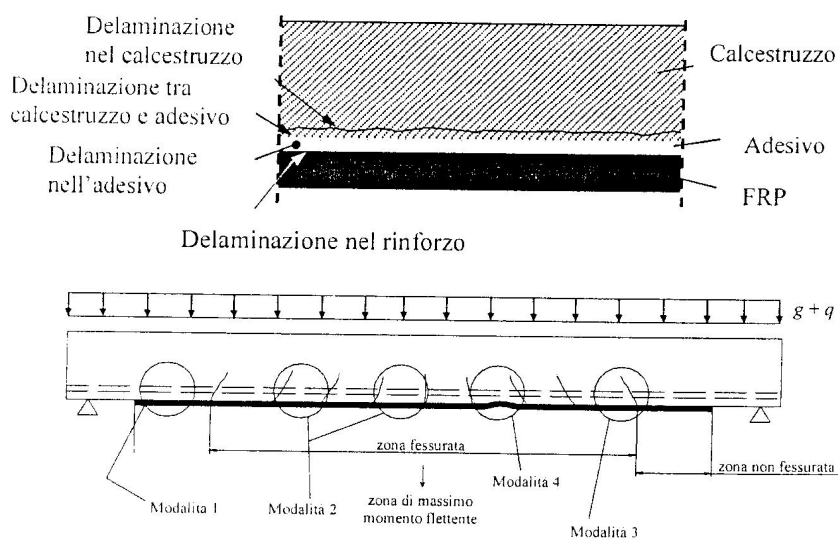


Figura 10. Trave rinforzata a flessione: delaminazione

Rinforzo a flessione

Quando negli elementi strutturali soggetti a momento flettente il momento di progetto supera quello resistente ultimo è necessario il rinforzo a flessione. Il documento affronta in maniera esaustiva l'argomento indicando tutte le formule e le modalità di calcolo.

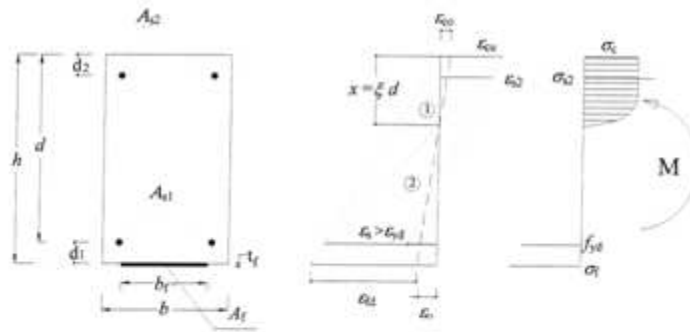


Figura 11. Modalita' di rottura di una sezione inflessa in c.a. rinforzata con frp

Rinforzo a taglio

Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo sia superiore alla relativa resistenza di calcolo. Il documento affronta in maniera esaustiva l'argomento indicando tutte le formule e le modalita' di calcolo.

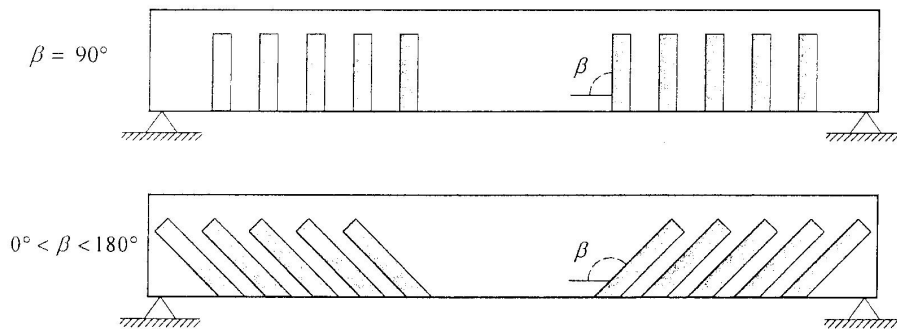


Figura 12. Orientamenti del rinforzo a taglio in forma di strisce.

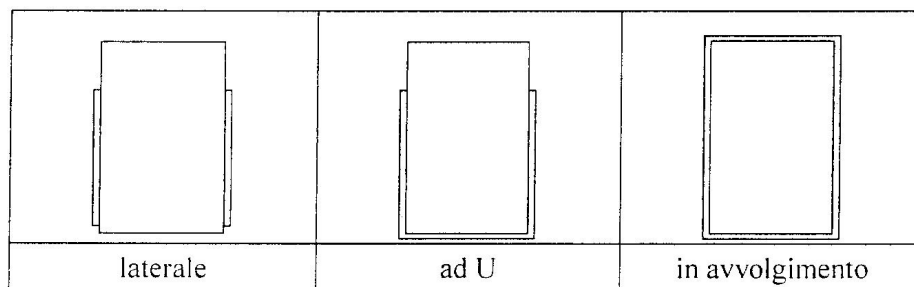


Figura 13. Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione.

Rinforzo a torsione

Il rinforzo a torsione si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il momento torcente di calcolo sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Il documento

affronta in maniera esaustiva l'argomento indicando tutte le formule e le modalità di calcolo.

Confinamento

Un adeguato confinamento degli elementi strutturali in c.a. può determinare un miglioramento delle prestazioni dell'elemento strutturale, sia in termini di resistenza ultima che in termini di duttilità. Il documento affronta in maniera esaustiva l'argomento indicando tutte le formule e le modalità di calcolo.

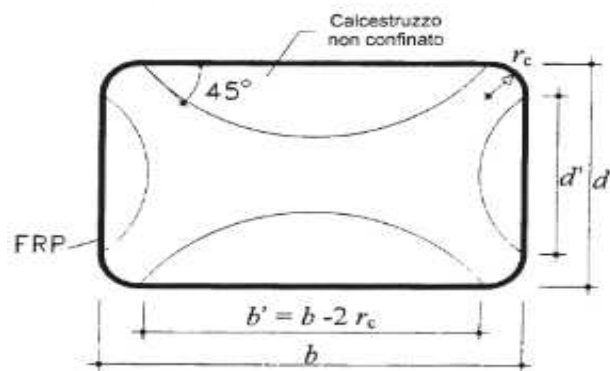


Figura 14. Confinamento di colonne.

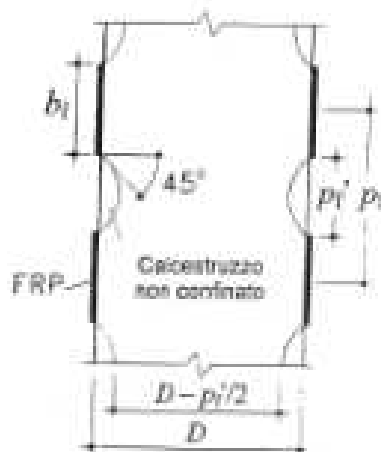


Figura 15. Confinamento di sezioni rettangolari in c.a.

Rinforzo a flessione di strutture in c.a.p.

Anche per questo tipo di elementi strutturali, il documento riporta le indicazioni del caso.

Materiali di rinforzo per la sperimentazione condotta

Per la sperimentazione condotta, si è utilizzato il sistema Betontex IPN, prodotto e commercializzato da Ardea Progetti e Sistemi di Casalecchio di Reno (Bo). Il sistema Betontex IPN comprende sia gli adesivi (resine) che i rinforzi (fibre di carbonio) che devono essere applicati assieme (non separatamente).

1-Adesivo Betontex IPN

Si tratta di una resina bicomponente a base acqua, costituita da due o più resine supportate su una matrice inorganica microcristallina tixotropica. Nella fase di polimerizzazione si crea un reticolo interpenetrato (IPN) rinforzato dai microcristalli della fase inorganica attiva, che conferisce alla matrice elevate proprietà meccaniche e termiche, nonché una buona porosità al vapore acqueo (traspirabilità). Gli adesivi Betontex IPN possono essere utilizzati per adesione diretta del rinforzo su supporti in calcestruzzo, muratura, legno, opportunamente preparati, o quali promotori di adesione per l'inglobamento diretto del rinforzo, su strati di malta cementizia o a base calce. La loro compatibilità e capacità di **impregnazione delle fibre risulta particolarmente elevata**, determinando notevoli proprietà meccaniche del composito finale. Gli adesivi Betontex IPN sono resistenti all'ambiente alcalino delle malte cementizie o a base calce, **non presentano transizioni termiche del secondo ordine (T_g) o temperature di fusione**, non bruciano, e evidenziano una resistenza termica superiore ai 160°C.

Caratteristiche degli adesivi Betontex IPN			
Proprietà / Tipo	IPN 01	IPN 02	IPN 03
	Primer	Impregnante	Adesivo rasante
Componenti	A+B	A+B	A+B
Rapporto di catalisi	1/2	1/2	1/4
Viscosità sistema	Bassa viscosità	Media viscosità	Alta viscosità -Tixo
Applicazione	rullo o pennello	rullo o pennello	spatola / rasatura
Tempo di gelo a 20 °C	40 minuti	40 minuti	40 minuti
Tempo indurimento	80-120 minuti	80-120 minuti	80-120 minuti
Tempo indurimento totale	48 ore	48 ore	48 ore

Caratteristiche fisico-meccaniche adesivi Betontex IPN			
Proprietà / Tipo	IPN 01	IPN 02	IPN 03
	Primer	Impregnante	Adesivo rasante
Adesione calcestruzzo	≥ 3 MPa	≥ 3 MPa	≥ 3 MPa
Resistenza a flessione	≥ 5 MPa	≥ 5 MPa	≥ 5 MPa
Deformazione a rottura	≥ 1,2-5 %	≥ 1,2-5 %	≥ 1,2-5 %
Modulo elastico a flessione	50 MPa	100 MPa	100 MPa
Carico di rottura a trazione	≥ 3 MPa	≥ 3 MPa	≥ 3 MPa
Assorbimento d'acqua da porosità residua	2 - 4,5 %	2 - 4,5 %	2 - 4,5 %
Resistenza alla temperatura	>150 °C	>150 °C	>150 °C
Resistenza al fuoco Metodo UNI 9177 (1987)	Classe 1 (Uno)	Classe 1 (Uno)	Classe 1 (Uno)

2- Rinforzi

Il sistema resina più rinforzo IPN utilizzato prevede l'impiego di fibre di carbonio. Il sistema può essere utilizzato con l'impiego di fibre di vetro, ma non è il nostro caso applicativo.

**Proprietà delle fibre di carbonio e fibre di vetro utilizzate
per la produzione dei rinforzi per il Sistema IPN**

Tipologia di fibra /filato		Carbonio HT TENAX UTS	Vetro AR ZIRCONGLASS
Proprietà delle fibre	Unità	Valore	Valore
Peso del filato	Tex	800	600
Tensione di rottura a trazione	MPa	≥ 4800	≥ 1400
Modulo elastico a trazione	GPa	240	74
Allungamento a rottura	%	2,10	2,00
Densità	g/cm³	1,78	2,5

Il rinforzo adottato nella sperimentazione è del tipo unidirezionale a base di fibra di carbonio. Si prevede, per i rinforzi a flessione, l'impiego di 2 strati di rinforzo unidirezionale in fibra di carbonio da 160 gr/mq e 2 strati di rinforzo unidirezionale in fibra di carbonio da 300 gr/mq. Per i rinforzi a taglio, si adotta un unico strato di fibra di carbonio unidirezionale da 300 gr/mq. Le caratteristiche sono riportate nella seguente tabella; le proprietà sono riferite al rinforzo impregnato con la resina IPN.

Proprietà dei rinforzi unidirezionali in fibra di carbonio - Sistema IPN

Tipologia di rinforzo		GV160-60 U-IPN	GV300-60 U-IPN
Proprietà del rinforzo	Unità	Valore	Valore
Peso in fibra di carbonio	g/m²	160	300
Larghezza del rinforzo	cm	10-20-50-60	10-20-50-60
Spessore della fibra nella direzione principale	mm	0,088	0,165
Sezione della fibra nella direzione principale	mm²/cm	0,88	1,65
Carico di rottura del rinforzo nella direzione principale	MPa	≥ 2800	≥ 2800
Modulo elastico del rinforzo nella direzione principale	GPa	≥ 210	≥ 210

Applicazione

Le resine IPN si basano su un sistema polimerico disperso in acqua (Componente A) e un induritore costituito da un sistema polimerico in polvere estremamente suddivisa, supportata su una

carica minerale attiva (Componente B). L'applicazione può avvenire disponendo il rinforzo:

- Con il sistema completo di resine IPN direttamente sulla struttura da rinforzare;
- Applicando il rinforzo fra due strati di malta, impiegando la resina IPN quale promotore di adesione.

Nel primo caso l'adesione all'elemento da rinforzare viene ottenuta direttamente con il sistema IPN, nel secondo caso l'adesione all'elemento da rinforzare avviene attraverso lo strato di malta, che contiene al suo interno il rinforzo reso compatibile con il sistema IPN. Viene eseguita anche una sperimentazione avente, quale matrice, la sola malta cementizia (senza IPN).

- Miscelazione dei componenti del sistema IPN

La miscelazione del componente A con il componente B, deve essere eseguita in modo molto preciso, usando un agitatore meccanico a media velocità, con pesatura, avente approssimazione ad 1 grammo rispetto alle quantità indicate nelle schede tecniche, considerando un tempo di applicazione di 30 minuti alla temperatura di 20-25°C. In tutti i casi è consigliabile mantenere la quantità di resina da preparare compresa fra 0,5 Kg e 3Kg di miscela.

Applicazione diretta al calcestruzzo

Occorre osservare le seguenti prescrizioni:

- ✓ La superficie del calcestruzzo deve essere accuratamente pulita mediante idropulitrice o sabbiatura, con demolizione e ricostruzione delle parti incoerenti, mediante trattamenti consueti: passivazione delle armature metalliche e uso di malte cementizie, in modo da ottenere una superficie ruvida.
- ✓ Applicare mediante pennello o rullo in acciaio scanalato, le resine sulla superficie del calcestruzzo previamente inumidita con acqua, con uno strato di IPN-Primer in quantità di circa 600 g/mq di superficie da trattare. Se

la superficie si presenta secca, occorre bagnare con acqua e attendere 10-20 minuti prima di applicare il primer, per consentire all'acqua di penetrare nella porosità del calcestruzzo.

- ✓ Dopo 15-30 minuti, applicare il primo strato di impregnante in quantità di 600 g/mq di rinforzo da applicare.
- ✓ Disporre il tessuto unidirezionale della grammatura prevista e rullare con lo speciale rullo in acciaio scanalato, in modo da far fuoriuscire l'aria dal tessuto e consentire una buona impregnazione della fibra.
- ✓ Applicare il secondo strato di resina impregnante.
- ✓ Applicare il tessuto di rinforzo. E così via...
- ✓ Sullo strato di resina finale, a resina fresca prima del suo indurimento, applicare uno strato di malta cementizia o spolverare con sabbia per poter poi applicare uno strato protettivo (intonaco o vernice).

Applicazione su muratura

La superficie della muratura deve essere accuratamente pulita mediante idrogetto o sabbiatura, con rimozione e ricostruzione delle parti incoerenti e l'uso di malte cementizie strutturali o malte a base calce, in modo da ottenere una superficie abbastanza ruvida tale da consentire un buon aggrappo della resina. A malta ancora fresca e umida, dopo 15 minuti dalla sua applicazione, si applicherà il rinforzo. E così via per tutti gli strati di tessuto da stendere. Sullo strato finale di resina, a resina fresca, applicare uno strato di malta cementizia o a base calce.

I connettori ardifix

La tecnologia in questione consiste nell'infilaggio nella struttura di un pezzo di barra di carbonio, di diametro fra i 7 e i 10 mm, accompagnato da uno o più nastri di rinforzo

unidirezionali di opportuna lunghezza previamente impregnati con resina che vengono risvoltati sulla faccia esterna della struttura. Nella fase successiva viene laminato il rinforzo sopra ai connettori così da ottenere un ancoraggio che aumenti l'aderenza ed eviti di forare il nastro di rinforzo. Il connettore può essere passante o non passante.

Fasi applicative:

Esecuzione di fori di 14-18 mm di diametro, della lunghezza prevista.

Preparazione di due strisce di nastro CFRP di lunghezza di 50 cm disposte a croce sul foro e previamente impregnate con resina.

Inserimento del tondino in fibra di carbonio (o di vetro) del diametro di 7-10 mm trattato in superficie con resina, avendo cura che il tondino che entra nel foro spinga i due nastri previamente impregnati e disposti a croce.

Saturazione del foro con resina, risvolto dei tessuti nella faccia della struttura e successiva applicazione di un fazzoletto di tessuto unidirezionale con disposizione della fibra prevista per il rinforzo.

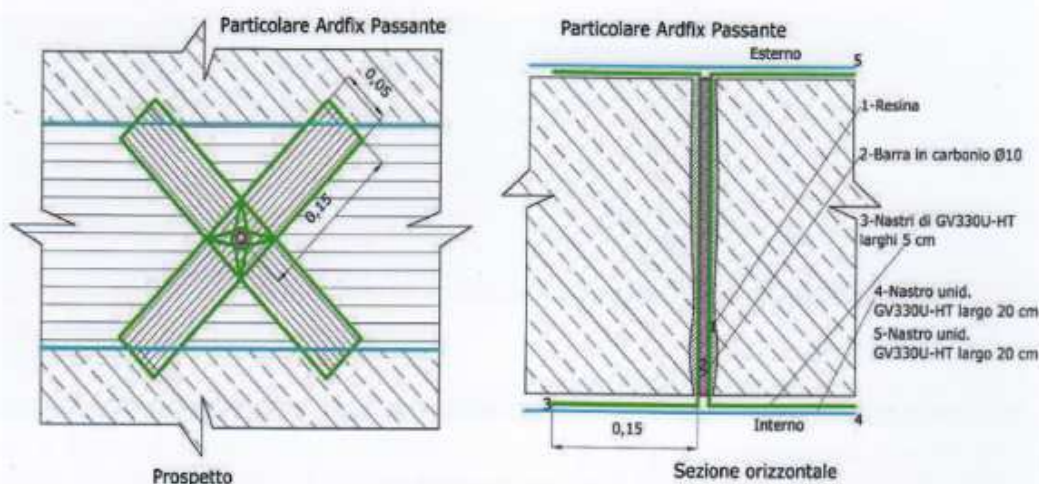


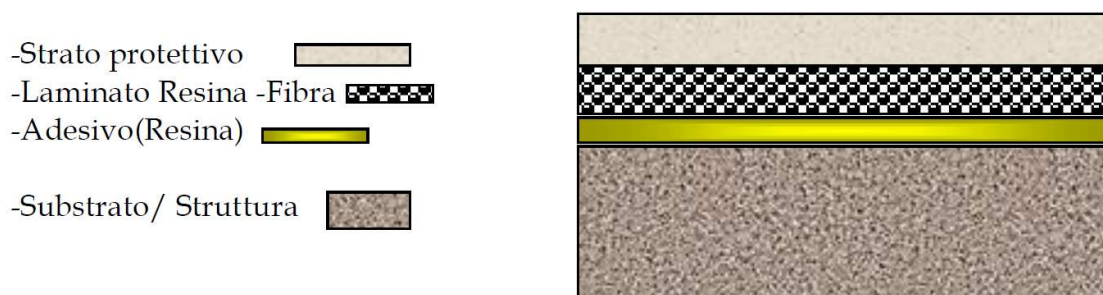
Figura 16. Esempio di applicazione ardifix.

Comportamento al Fuoco dei materiali compositi FRP e del sistema IPN

Aspetti Generali

I materiali compositi trovano largo impiego in Edilizia come rinforzi per il recupero strutturale generalmente in forma di nastro, applicato sulla superficie della struttura, per laminazione diretta.

Nella sua forma più frequente il materiale composito si presenta come una lamina, costituita da una matrice polimerica (Resina) che ingloba le fibre di rinforzo, incollata direttamente sulla struttura. Generalmente l'adesivo di incollaggio e la resina di impregnazione sono della stessa natura se non lo stesso materiale, secondo il seguente schema:



Sulla faccia esterna del laminato viene generalmente applicato uno strato protettivo che può essere nel caso più frequente un intonaco oppure una vernice per la protezione agli agenti esterni, od altro materiale per casi specifici.

In caso di incendio, che può verificarsi in una struttura rinforzata strutturalmente con questi materiali, risulta importante analizzare il comportamento di questi sia verso l'aumento della temperatura, sia come reazione al fuoco.

Il materiale composito che costituisce il laminato che ha la funzione di rinforzo, si presenta di fatto formato da due elementi diversi: La Fibra e la Resina, comprendendo in questa anche l'Adesivo per l'adesione al substrato.

Per le fibre si considerano le Fibre di Carbonio, essendo quelle maggiormente utilizzate in queste applicazioni, come resine si considerano le resine Epossidiche

Fibre di Carbonio:

Le fibre di carbonio sono costituite da Filati di peso variabile a loro volta formati da 1000- a 25000, fibre continue di diametro di circa 5-6 micron, che vengono utilizzate con operazioni di tessitura per formare i nastri di rinforzo.

La fibra è costituita da grafite purissima ad altissima cristallinità (>99,9%), con una struttura esagonale, lamellare, come rappresentata nella figura sottostante.

Tale struttura viene formata attraverso un complesso procedimento di ricottura, in forni speciali ad altissime temperature, oltre 2000 ° C.

In conseguenza di tale struttura la fibra, pur essendo a base di carbonio, **non brucia e presenta una resistenza termica elevatissima oltre i 1000 ° C**

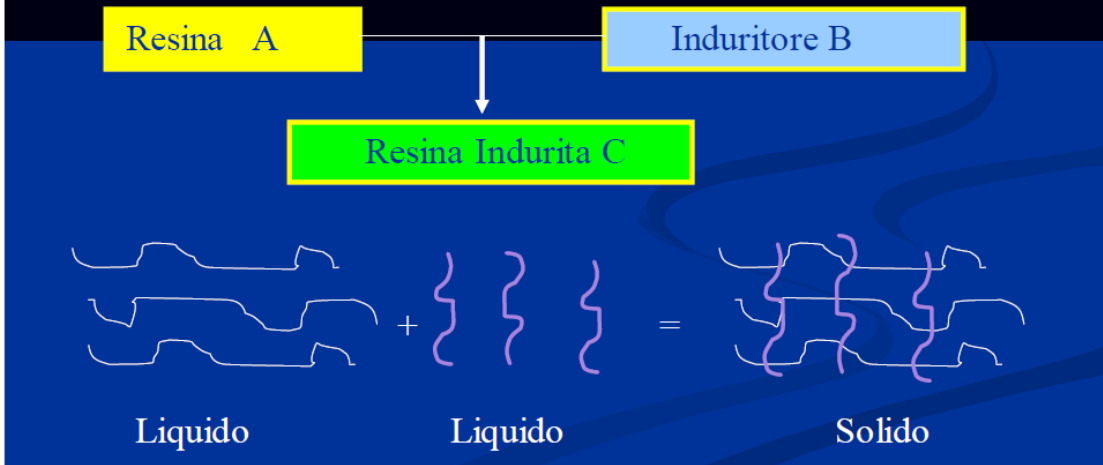
Resine Epossidiche:

Le resine epossidiche di tipo bicomponenti (A+B) sono materiali polimerici reticolati che presentano una struttura tridimensionale, derivante dalla reazione chimica del componente A e del componente B secondo lo schema seguente:

Messa in Opera dei Rinforzi

Nastri – Reti - Tessuti - Impregnazione in Situ: LA RESINA

Le Resine Epossidiche sono **BICOMPONENTI**



Queste resine essendo **Reticolate**, cioè con una struttura tridimensionale, presentano un comportamento completamente diverso dai materiali polimerici lineari (Termoplastici), più noti con il nome generico di Plastica, nei riguardi della temperatura.

Infatti i materiali **Polimerici Termoplastici** generalmente di tipo semicristallino presentano, con l'innalzarsi della temperatura, due transizioni di fase (reversibili) :

Una prima modifica corrispondente ad una temperatura chiamata *Tg* o *Temperatura di transizione secondaria del secondo ordine* in cui la componente amorfa del polimero presenta una variazione di mobilità delle catene polimeriche. Il polimero resta ancora allo stato solido e dimensionalmente stabile senza subire variazioni di dimensione, tuttavia subisce variazioni di alcune proprietà ed in particolare una diminuzione del modulo elastico.

Una seconda modifica del polimero chiamata **Tm** o **temperatura di fusione** (melting) in cui si ha la fusione della componente cristallina del polimero, con passaggio dallo stato solido allo stato liquido.

(Tutto ciò è facilmente determinabile attraverso un. In questo tipo di analisi la T_g si presenta come un flesso della curva, mentre la T_m come un picco).

Le resine **Epossidiche Bicomponenti Reticolate** (come peraltro tutte le resine del tipo *Termoindurente*) con l'innalzarsi della temperatura subiscono unicamente una prima modifica quando raggiungono la temperatura T_g e **non presentano alcuna temperatura T_m di fusione.**

Pertanto con l'innalzarsi della temperatura le resine epossidiche **non presentano mai fenomeni di fusione con perdita di forma e passaggio dallo stato solido allo stato liquido**, ma subiscono alcune variazioni di caratteristiche quando raggiungono la temperatura di transizione T_g , con una variazione del calore specifico c_{sp} (ciò comporta una variazione di pendenza nella curva DSC) e con una significativa diminuzione di modulo elastico. Una tipica curva per la determinazione della T_g di un polimero termoplastico e di una resina epossidica e riportata nella seguente figura, la T_g viene valutata nel punto mediano del flesso.

Nel grafico di sopra si nota un tipico andamento di un polimero Termoplastico: T_g (variazione di c_{sp} -flesso) temperatura di transizione; **T_c** (picco esotermico) **temperatura di cristallizzazione**; **T_m** (picco endotermico) **temperatura di fusione.**

Nel grafico di sopra è riportato il classico flesso della curva di una resina epossidica con la possibilità di determinare la T_g . I picchi che si riferiscono a T_c e T_m non compaiono.

La T_g di una resina epossidica bicomponente è fortemente influenzata dalla temperatura di reazione dei due componenti : **per le applicazioni in edilizia**, dove l'impiego della resina avviene a temperatura ambiente, **il valore di T_g si attesta su circa 80 - 100 °C**. Per componenti meccanici dove la temperatura di reticolazione della resina supera i 120°C la T_g è generalmente compresa tra 120-150°C.

I cambiamenti che avvengono in una resina epossidica quando si supera la T_g sono : variazione del calore specifico, variazione

del coefficiente di dilatazione termica lineare, diminuzione del valore di modulo elastico.

La variazione di modulo elastico comporta che una resina epossidica pura (non rinforzata) presenti una flessione sotto un determinato carico quando si raggiunge la T_g . Pertanto tale valore può anche essere determinato da misure di Temperatura di Distorsione (HDT), alla quale il campione, sotto carico costante, presenta una repentina distorsione. Tale prova può essere eseguita secondo la norma ASTM D 648 : 2001 Metodo A (Carico applicato 0,455MPa).

In presenza di un rinforzo (Composito) il valore della temperatura di distorsione HDT della resina risulta più elevato, segno di un diverso comportamento della resina in presenza della fibra. In tale caso si utilizzerà il Metodo ASTM D648 B (Carico Applicato 1,82MPa).

In presenza di un innalzamento della temperatura un composito, una volta superato il valore della T_g della resina, non subisce alcuna ulteriore variazione finché non si raggiunge la temperatura di decomposizione della resina stessa (circa 600-800 °C).

Tuttavia occorre tenere presente che: in presenza di ossigeno (Aria) ad alta temperatura si innesca un fenomeno di combustione (la resina brucia); se il composito non è a contatto con l'aria o l'ossigeno, si innesca un fenomeno di pirolizzazione o di carbonizzazione, che in condizioni controllate può portare a compositi Carbonio/ Carbonio (cioè compositi a matrice di grafite rinforzata da fibre di carbonio: così vengono prodotti diversi manufatti per resistenze termiche altissime quali i coni di uscita dei razzi o le pastiglie dei freni).

La Normativa

Ad oggi una significativa sperimentazione dell'effetto della T_g delle resine epossidiche nelle applicazioni in edilizia non è mai stata riportata. Ciò rappresenta una notevole lacuna che da adito

a cattiva informazione o ad una errata valutazione del problema sia in eccesso sia sottostimandolo.

Nella pratica corrente i materiali compositi vengono applicati su strutture esistenti, la cui sicurezza rispetto alle combinazioni di carico, che prevede l'effetto combinato dei carichi permanenti, accidentali e dell'evento eccezionale *fuoco*, è garantita senza l'apporto esterno in composito.

A fronte di questa situazione, è buona norma, la dove si ritiene necessario, applicare sistemi di protezione del rinforzo in composito analogamente a quanto viene fatto con le strutture in acciaio.

Se invece la sicurezza rispetto alla suddetta combinazione di carico (permanentemente, accidentali, fuoco) è garantita dall'azione del rinforzo esterno in composito, è necessario prevedere una protezione attiva o passiva del rinforzo nel rispetto della normative vigenti in materia, ossia il documento CNR DT 200 /2004 e DM 14/01/2008

Occorre fare presente che già nelle condizioni di normale impiego il composito viene applicato sotto l'intonaco, e già questo porta ad una protezione nei riguardi della fiamma diretta e nei riguardi del contatto con l'aria e l'ossigeno.

Resta da risolvere comunque, **nei casi in cui sia necessario, applicare sul rinforzo uno strato di protezione con la garanzia di non superare la temperatura di distorsione del composito (HDT) compresa, in prima approssimazione tra 100 e 130 °C.**

Nuovi sistemi di protezione

Le resine epossidiche bicomponenti, utilizzate da Ardea srl per le applicazioni dei rinforzi in fibra di carbonio, indicati con il nome commerciale **Betontex** (linea Betontex), sono : Primer RC 01, Resina Adesiva e Impregnante RC02, Rasante RC30. Le resine tipo Impregnante RC02 ed il tipo Rasante RC30, che sono le resine che creano il legame strutturale tra supporto e fibra, presentano una transizione Tg misurata in termini di HDT compresa tra 98- 101 °C.

Pertanto si ritiene prudente, la dove richiesto dalla normativa, applicare una protezione termica in modo da non raggiungere un valore di temperatura superiore all'HDT (100-110 °C) entro un determinato tempo.

A tale scopo, possono essere utilizzati diverse tipologie di materiali di rivestimento per la protezione al fuoco, quali quelli impiegati per materiali tradizionali, comprendendo resine e vernici intumescenti.

Tuttavia, Ardea srl, si è posta l'obiettivo di mettere a punto un sistema di protezione specifico per i rinforzi in carbonio, applicati con resine epossidiche.

Tale sistema, in corso di messa a punto, consiste in un prodotto a base inorganica contenente una parte di cemento più altri additivi, applicato in spessore di circa 2 cm a spatola o a spruzzo, ed ha già ottenuto un risultato interessante in una prova al fuoco, con forno a temperatura compresa tra 800 e 1000 °C.

Si deve fare notare che il lato non esposto alla temperatura del forno risulta quello incollato al supporto, muratura o calcestruzzo, durante l'applicazione.

Il risultato ottenuto (media di 5 punti di misura) mostra che il lato non esposto raggiunge la Temperatura media (T_m) di 100 °C dopo circa 45 minuti (con una temperatura del forno di 900 °C circa), tempo ragionevole per mantenere una buona prestazione del composito, ai fini della sicurezza (vedi grafico allegato).

Inoltre si è potuto osservare che il composito, pur raggiungendo, dopo circa 70 minuti, una temperatura massima sul lato esposto di circa 320°C (con una temperatura del forno di 1000 °C), si presentava perfettamente integro.

La messa a punto di questo protettivo è ancora in corso e necessita di una ottimizzazione e di relativa certificazione.

Altri aspetti di ricerca, ancora in corso, sono l'impiego di resine che non presentano transizioni del secondo ordine (T_g) o del primo ordine (T_m) (non fondono), ma temperature di decomposizione superiori ai 280 °C, e che pertanto necessiteranno esigenze di protezione nel tempo solo fino a queste temperature.

La NTC 2008 descrivono il comportamento, in caso d'incendio, delle strutture in c.a., acciaio, legno, mentre non riportano nulla a proposito dei materiali compositi. Neppure la Circolare n. 617 fornisce elementi utili per una simile applicazione. Il rinforzo con materiali compositi richiede una serie di protezioni dall'incendio, ad esempio mediante la predisposizione di una adeguata compartimentazione delle strutture (l'isolamento realizzato con il cartongesso in classe 1). Altrimenti il rinforzo può diventare inefficace durante un incendio a causa dell'indebolimento della matrice adesiva, con perdita di resistenza meccanica del rinforzo stesso. Oltre alla perdita di resistenza meccanica e di adesione, l'incendio può causare esalazione di sostanze tossiche, deleterie per la salute dell'uomo.

Le NTC 2008 prendono in esame solo la resistenza al fuoco, intesa come la capacità di un elemento strutturale o di un componente, di mantenere le sue caratteristiche in caso d'incendio, per un periodo di tempo determinato, stabilito dalla normativa stessa, attraverso varie classi di resistenza (ad esempio REI 60). La procedura di analisi della resistenza al fuoco considera un incendio di progetto, la determinazione dell'evoluzione della temperatura e quindi una analisi del comportamento meccanico. A quanto sopra seguono le verifiche di sicurezza.

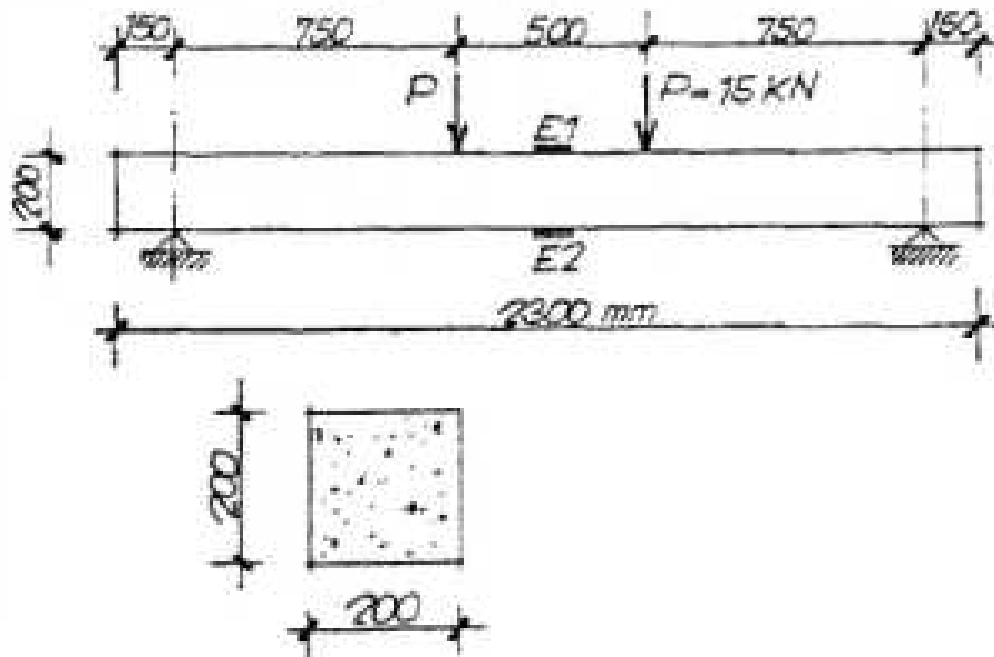
Resistenza al fuoco dell'IPN

L'IPN non ha praticamente T_g (temperatura di transizione vetrosa). A 160°C accusa una diminuzione della massa con perdita di acqua di cristallizzazione, ma non un calo delle proprietà meccaniche. A 600-800°C comincia a degradare con perdita del potere adesivo

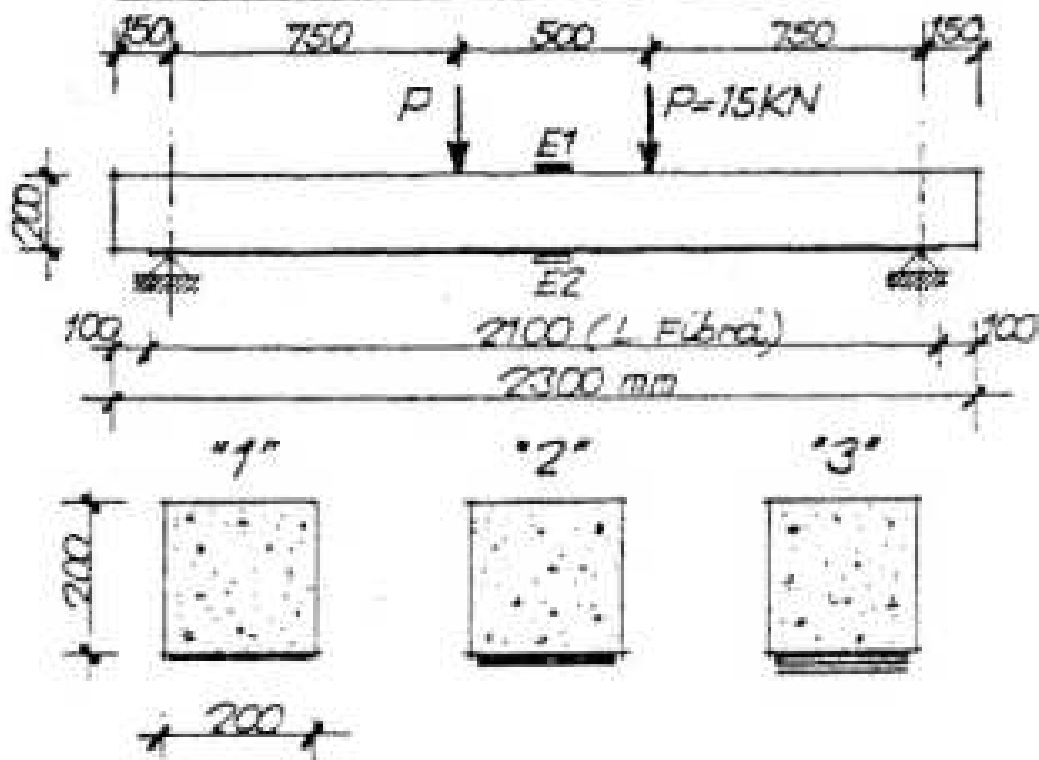
della resina. Praticamente il suo comportamento al fuoco è simile a quello delle malte cementizie. Come del resto le resine epossidiche, anche le resine IPN non sono materiali isolanti ma materie prime da costruzione. Attraverso prove effettuate su pannelli di fibra di carbonio trattate con IPN, senza protezioni, investiti dalla fiamma, si è visto degenerare il preparato in un lasso di tempo superiore a 5 minuti, mentre lo stesso non può dirsi con le prove effettuate con pannelli trattati con resine epossidiche che hanno visto la decomposizione in meno di 1 minuto. Se si pensa che comunque si deve considerare almeno un intonaco protettivo, di spessore supposto di cm.2,5-3, la sua resistenza al fuoco (REI=resistenza meccanica, tenuta al fumo e isolamento termico) di oltre 65-120 minuti. Esistono inoltre in commercio vernici ignifughe in grado di mantenere la temperatura superficiale < di 80 °C per una durata di 90 minuti. In questo modo la protezione che può essere raggiunta è più che accettabile.

Sperimentazione

Modalità di prova: Travetto "0"



Modalità di prova Travetti: "1" - "2" - "3"



Il rinforzo fu eseguito con fibre di carbonio e con matrice di resine epossidiche. Furono considerate tre condizioni di rinforzo:

una con 0,3 cmq di carbonio, un'altra con 0,6 cmq e un'altra ancora con 0,9 cmq. Durante le prove a flessione, condotte lentamente e con il controllo degli spostamenti, sono stati rilevati i carichi complessivi (2P KN) attivati dai martinetti, nonché le frecce in mezzeria e le dilatazioni (con estensimetri), di intradosso e di estradosso nella sezione di mezzo delle travi. Sono inoltre stati provati travetti con le armature metalliche suddette, ma senza rinforzi.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

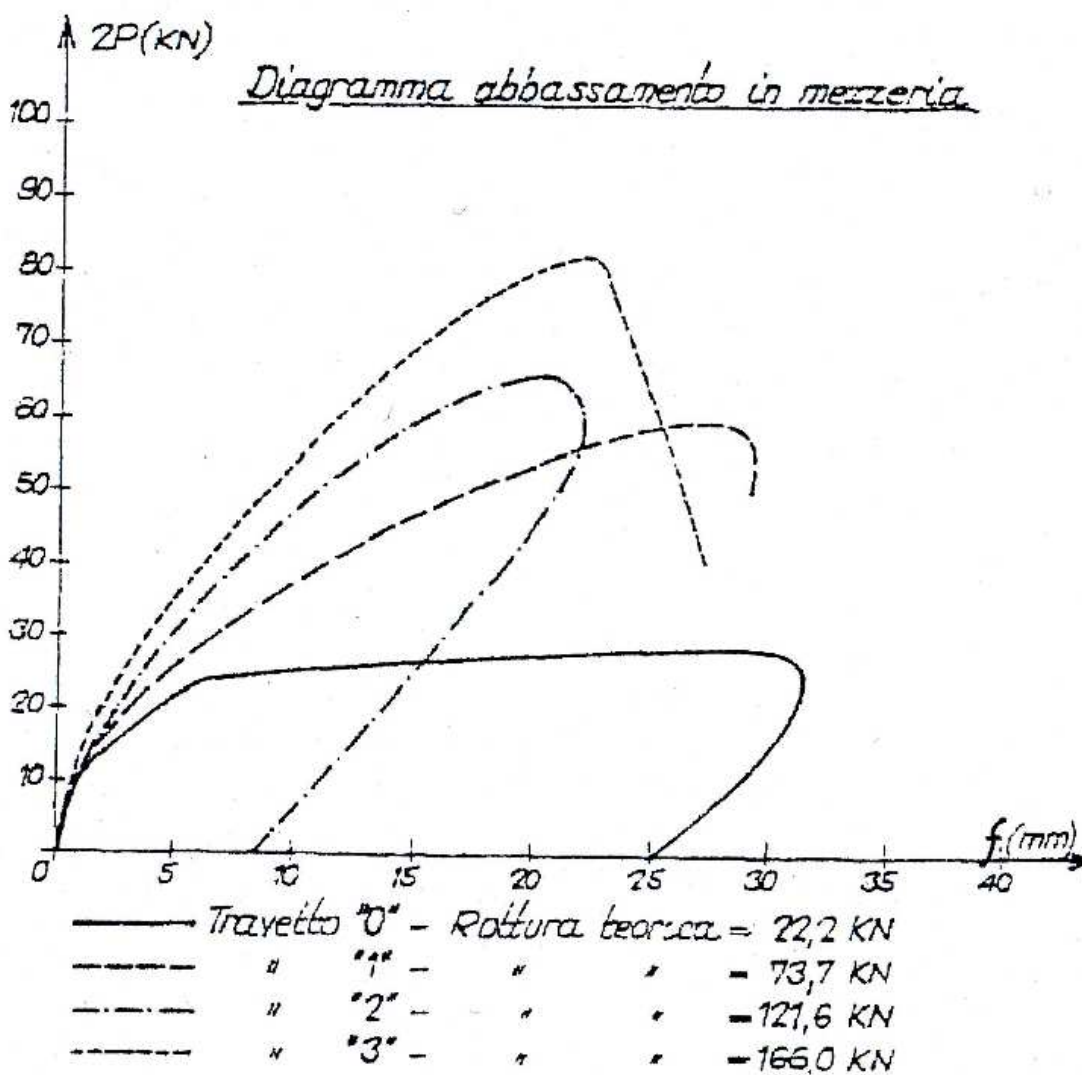
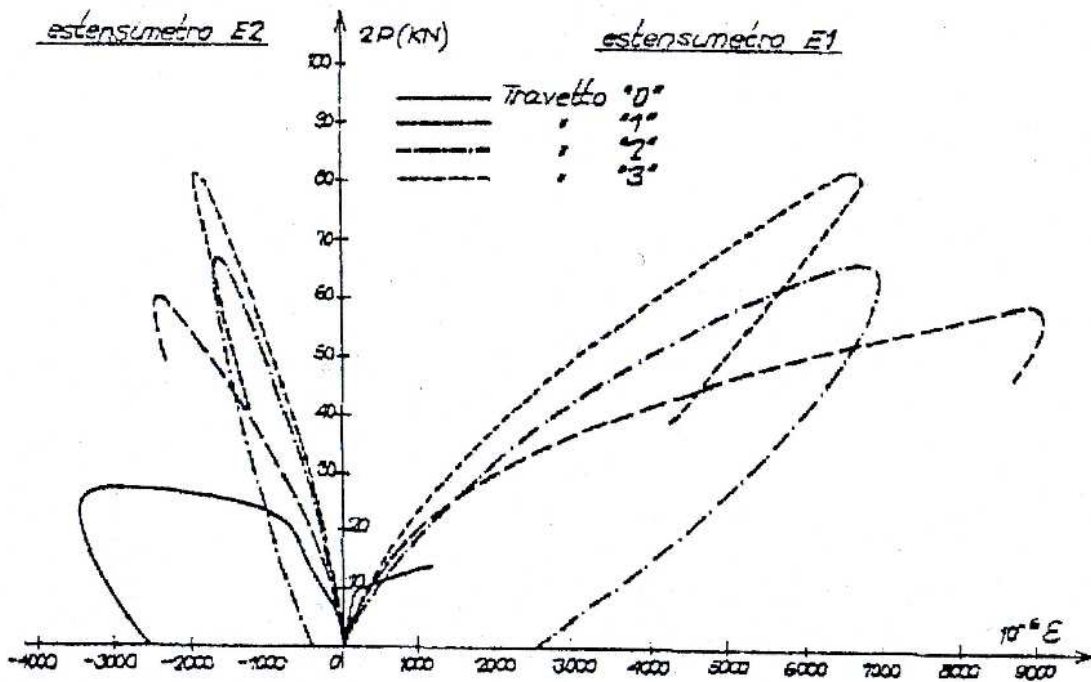


Diagramma delle dilatazioni



La finalità della sperimentazione era quella di ottenere informazioni utili sul comportamento delle travi in c.a. rinforzate con compositi, nei confronti della fessurazione.

In sintesi i risultati furono i seguenti:

- 1- Il carico in corrispondenza del quale iniziano a manifestarsi le fessure risente poco della presenza delle fibre, nel senso che le lesioni iniziali sono le stesse di quelle che ci si potesse aspettare senza rinforzo;
- 2- All'aumentare del carico si è ottenuto un normale raffittimento delle lesioni;
- 3- L'incremento delle lesioni e delle loro aperture viene contrastato dal graduale impegno delle fibre, a snervamento avvenuto dell'acciaio. Quindi questo incremento delle lesioni è meno marcato per gli elementi più rinforzati;
- 4- I travetti più rinforzati si sono manifestati più rigidi e meno fessurati;
- 5- L'applicazione della fibra determina un comportamento fortemente irrigidente, pur lasciando campo ad una buona deformabilità e, conseguentemente, ad una buona duttilità

strutturale. Quanto sopra finchè prevale la flessione e non si ha distacco del rinforzo o rottura per taglio:

- 6- La rottura avviene quasi sempre per distacco delle fibre del calcestruzzo (debonding) e questo specie in corrispondenza delle lesioni a taglio (effetto "pettine");
- 7- L'incremento di resistenza si è sempre manifestato rilevante, crescente con le quantità del composito applicato, comunque lontano dal determinare il collasso per rottura a trazione della fibra;
- 8- La rottura della trave priva di rinforzo avviene per un carico $2P=22,2$ KN, mentre il carico di rottura del travetto rinforzato con tre strati di fibra di carbonio, corrispondente a $0,9$ cmq di sezione, è circa il triplo. L'abbassamento massimo in mezzeria supera i 30 mm.

Per completezza di informazioni, si confrontano i risultati delle prove, oltreché con l'esperienza condotta dal Prof. Poluzzi, anche con quella condotta dal Prof. Bartoli dell'Università di Firenze, sempre per conto di Ardea Progetti e Sistemi, eseguita con modalità analoghe ad entrambe le prove trattate in questa tesi. I risultati principali, che si possono desumere dalle seguenti tabelle riepilogative, mostrano risultati sostanzialmente in linea con gli altri.

LA NUOVA SPERIMENTAZIONE

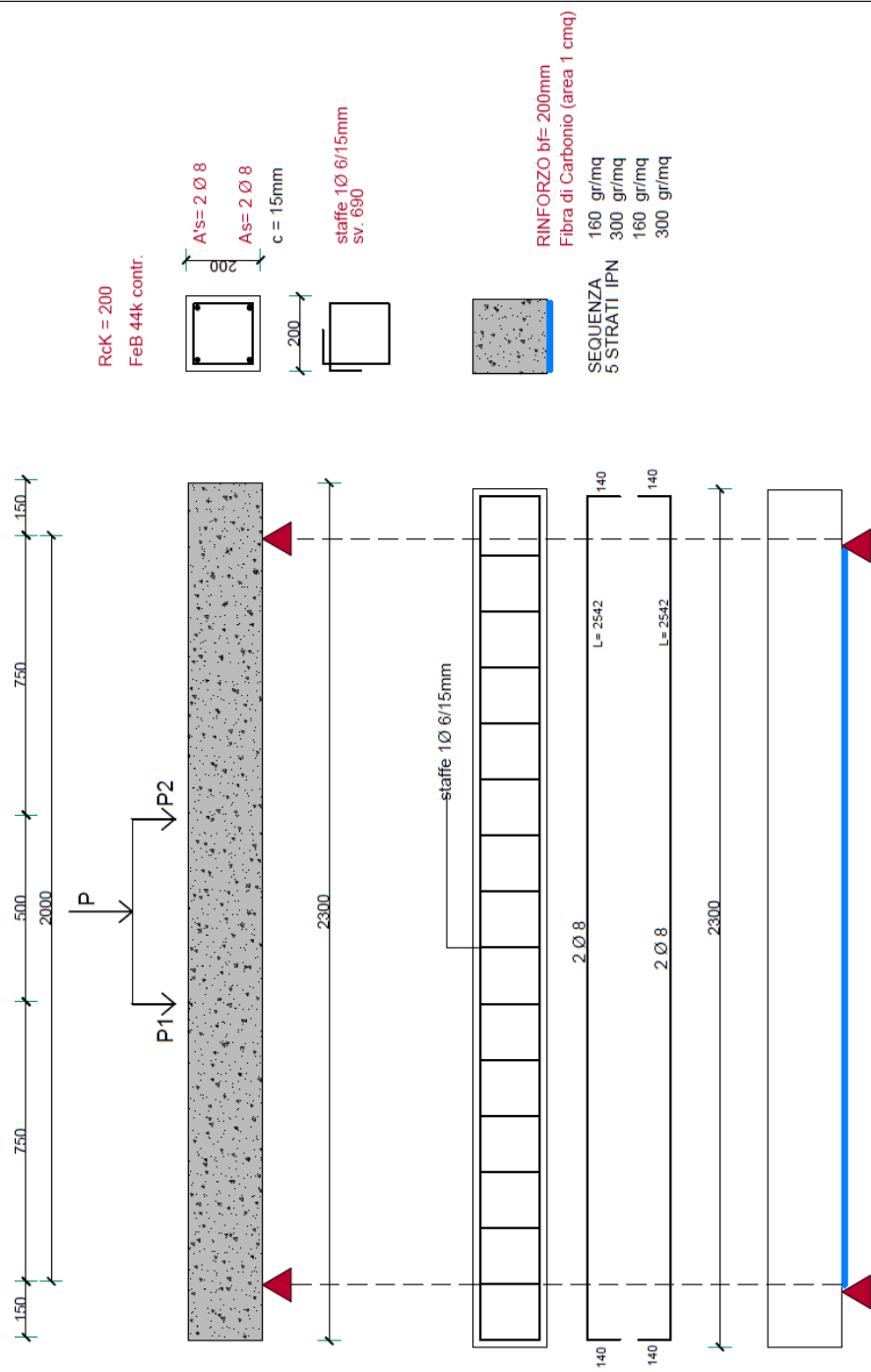
Consapevoli di quanto già fatto dal Prof. Poluzzi e basandoci sulla sua esperienza ("Sperimentazione su travi in cemento armato rinforzate con FRP"), abbiamo creato le basi per proseguirla ed ampliarla. Si è pensato di verificare il comportamento di analoghe travi in c.a., rinforzate sia a flessione che a taglio. Trattate con fibre di carbonio ma con matrici diverse: resine epossidiche, resine a base acqua (sistema IPN) e malte cementizie. Abbiamo considerato undici. In totale sono state testate 18 travi in c.a., lunghe 2,30 m. Di queste travi 11 sono state rinforzate a flessione (con debole armatura flessionale e normale staffatura a taglio), mentre 7 di esse sono state rinforzate a taglio (con sostenuta armatura flessionale e debole staffatura a taglio). Le 11 travi rinforzate a flessione sono state preparate in vari modi utilizzando solo resine IPN e malta cementizia. Le 7 travi armate a taglio sono state rinforzate sia con resine epossidiche che con resine a base acqua del tipo IPN, che con malta cementizia. Per molte travi sono stati provati almeno 2 campioni.

TRAVI RINFORZATE A FLESSIONE

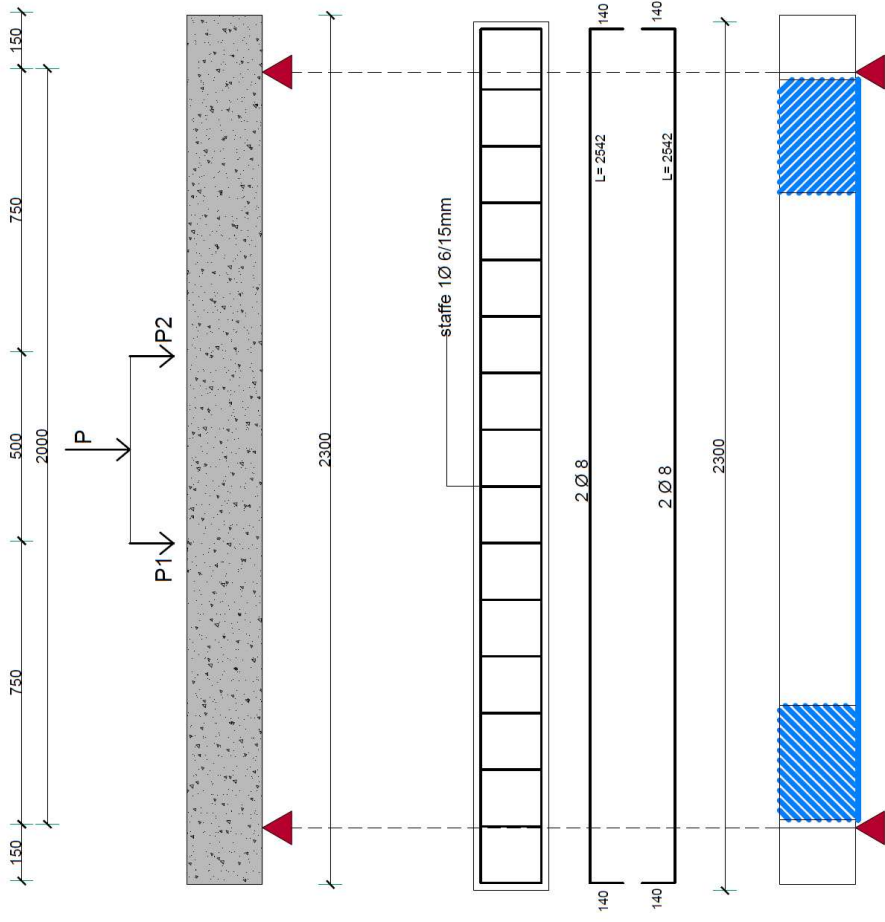
Esse sono dotate di debole armatura flessionale (4 Fi 8) e discreta armatura a taglio (staffe Fi 6/15 cm), con probabile rottura lato flessione. Il rinforzo consiste in 4 strati di fibre di carbonio, nella seguente sequenza di grammatura: 160 gr/mq, 300 gr/mq, 160 gr/mq, 300 gr/mq, per una superficie totale di fibra secca di 1 cmq circa. (Nell'esperienza del Prof. Poluzzi la sezione del carbonio era 0,9 cmq). Ove è stato usato il sistema IPN, nel caso di rinforzi a flessione, si è provveduto a stendere i seguenti strati di composito: primer sulla superficie del calcestruzzo, IPN, fibra, IPN, fibra, IPN, fibra, IPN. Nel caso di rinforzo a taglio, gli strati sono i seguenti: primer, IPN, fibra,

IPN. Dove si è rinforzato con matrice di malta cementizia e sistema IPN, le stratigrafie sono le stesse di cui sopra, con l'avvertenza che a contatto con la fibra vi fosse sempre IPN. Nel caso di matrice di malta cementizia pura, non è stato usato IPN.

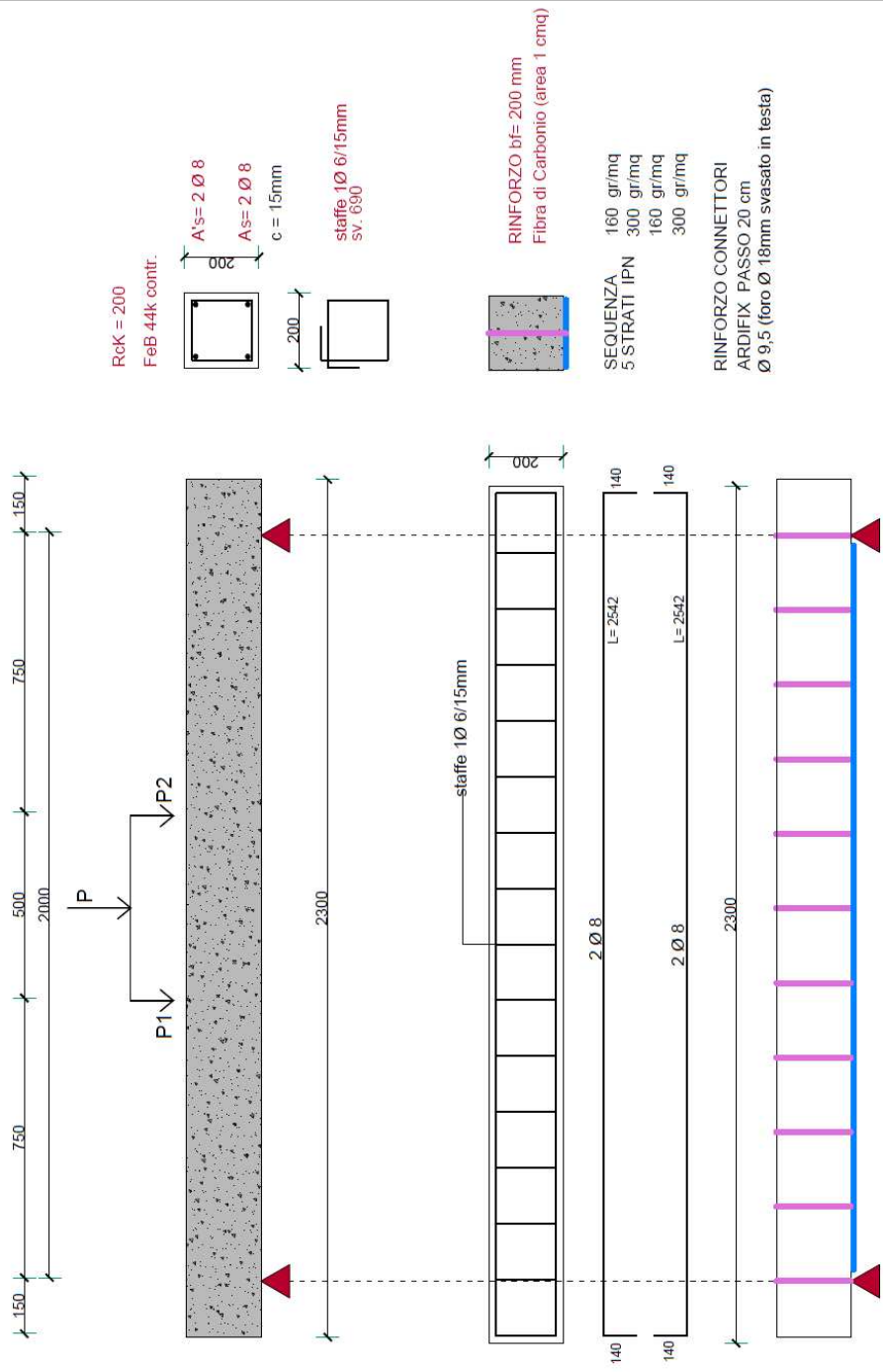
SCHEMI DELLE TRAVI RINFORZATE A FLESSIONE



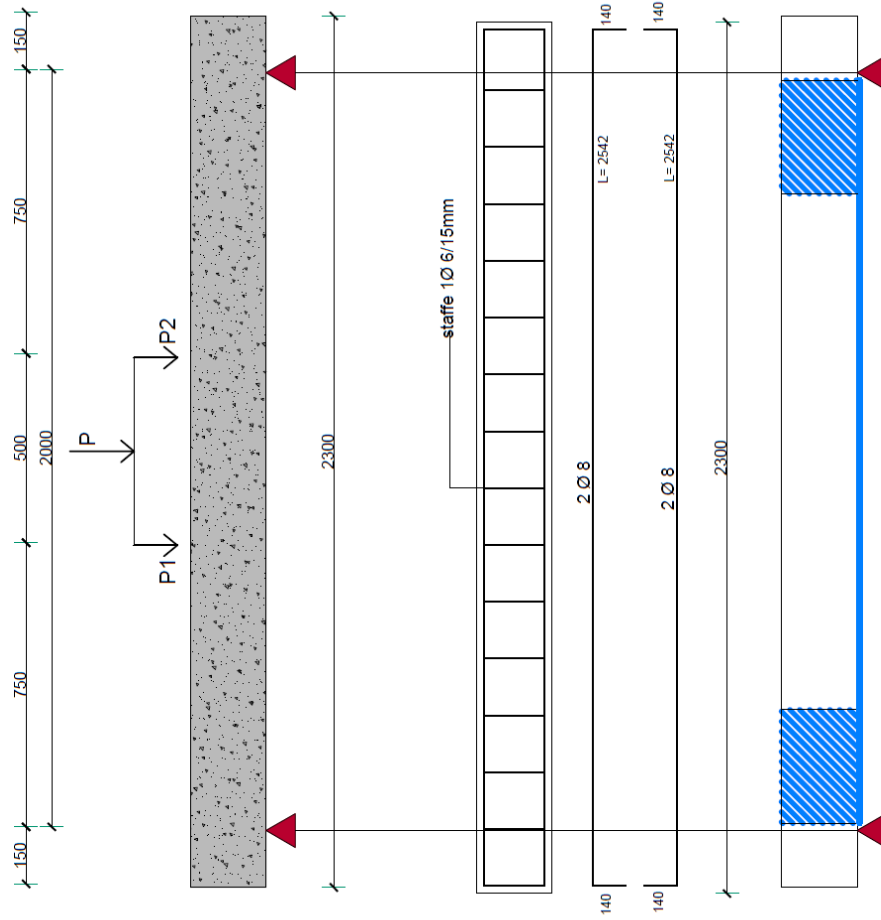
TF1



TF2



TF3



Rck = 200

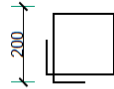
FeB 44k contr.



$A_s = 2 \varnothing 8$

$A_s = 2 \varnothing 8$

c = 15 mm



staffe 1 $\varnothing 6/15$ mm

sv. 690



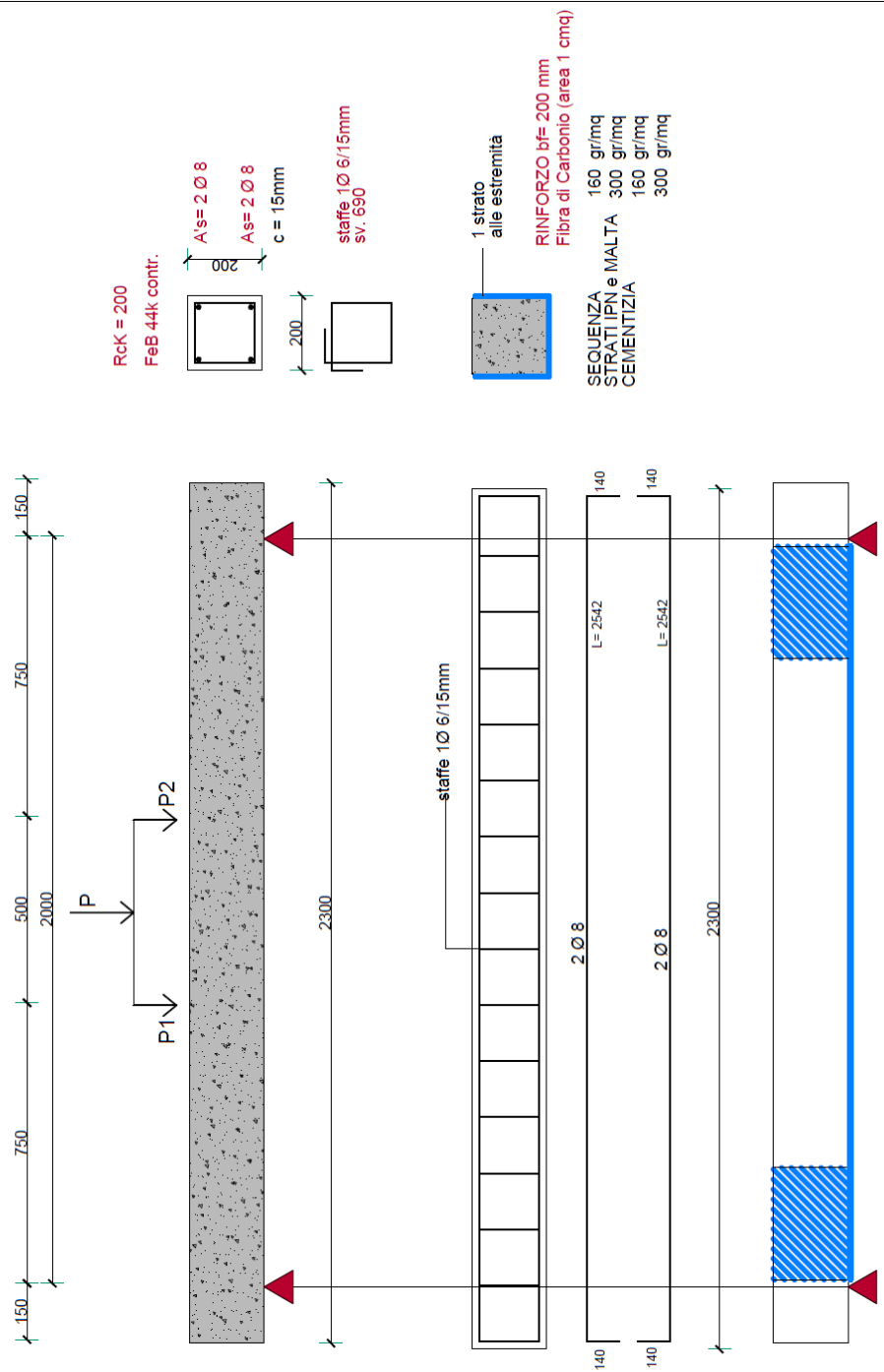
1 strato alle estremita

RINFORZO bf= 200 mm
Fibra di Carbonio (area 1 cmq)

SEQUENZA STRATI IPN e MALTA CEMENTIZIA

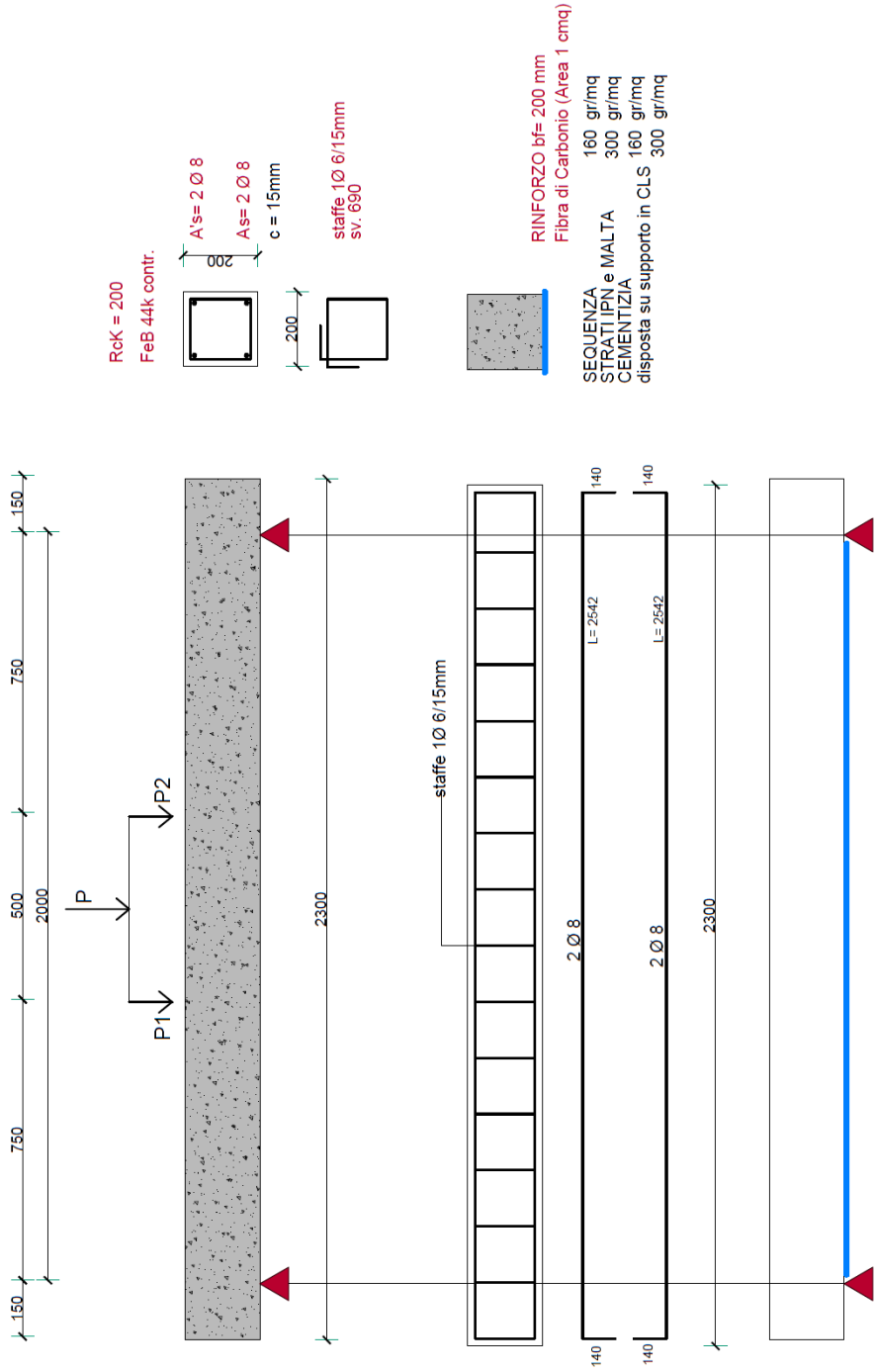
160 gr/mq
300 gr/mq
160 gr/mq
300 gr/mq

TF4

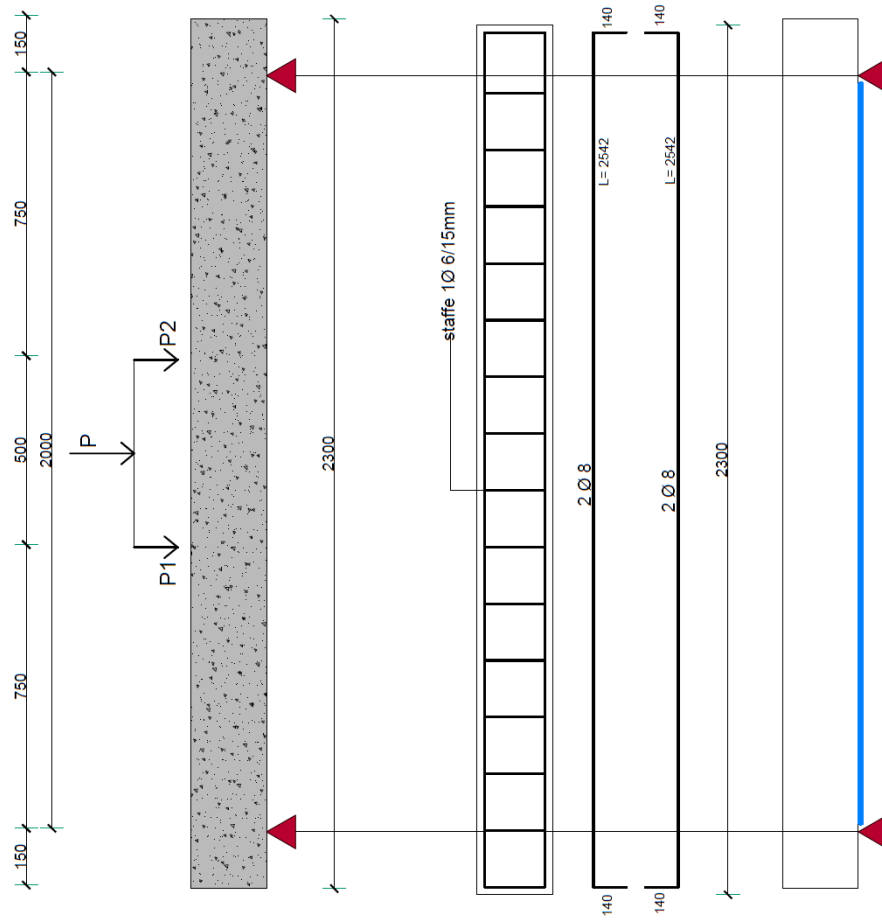


(Ri-Rinforzo TF4-b)

TF4 - ter



TF5

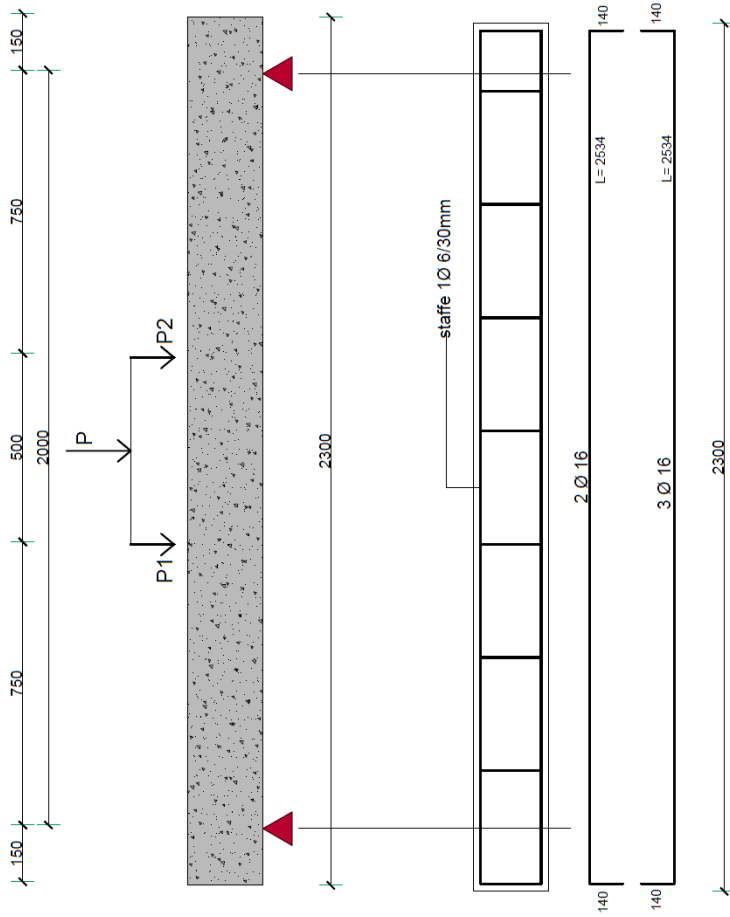


TF5-b

TRAVI RINFORZATE A TAGLIO

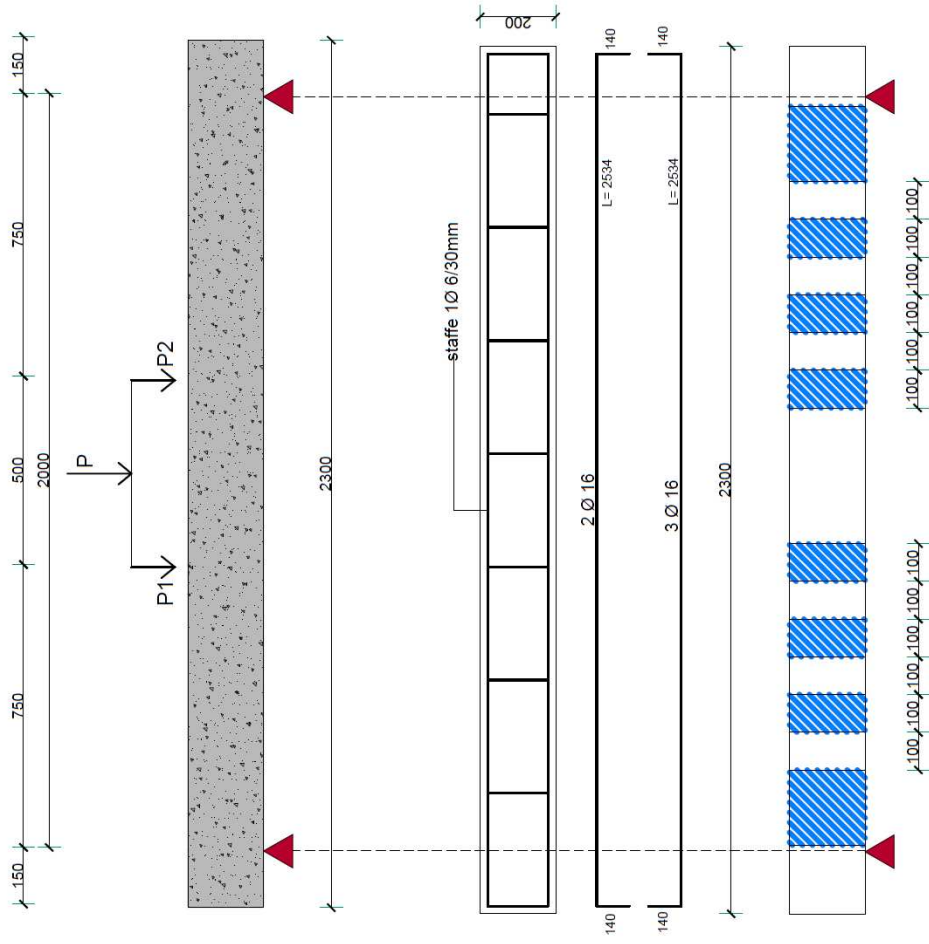
Esse sono dotate di forte armatura a flessione (5Fi16) e debole armatura a taglio (staffe Fi 6/30 cm), con probabile rottura lato taglio. Il rinforzo consiste in uno strato di fibra di carbonio, della grammatura di 300 gr/mq, per un totale di sezione di fibra secca di circa $0,165 \times 200 = 0,33$ cmq. Il Prof. Poluzzi non aveva condotto verifiche a taglio. Il sistema di applicazione dell'IPN è analogo a quello messo in campo per le travi rinforzate a flessione.

SCHEMI DELLE TRAVI RINFORZATE A TAGLIO

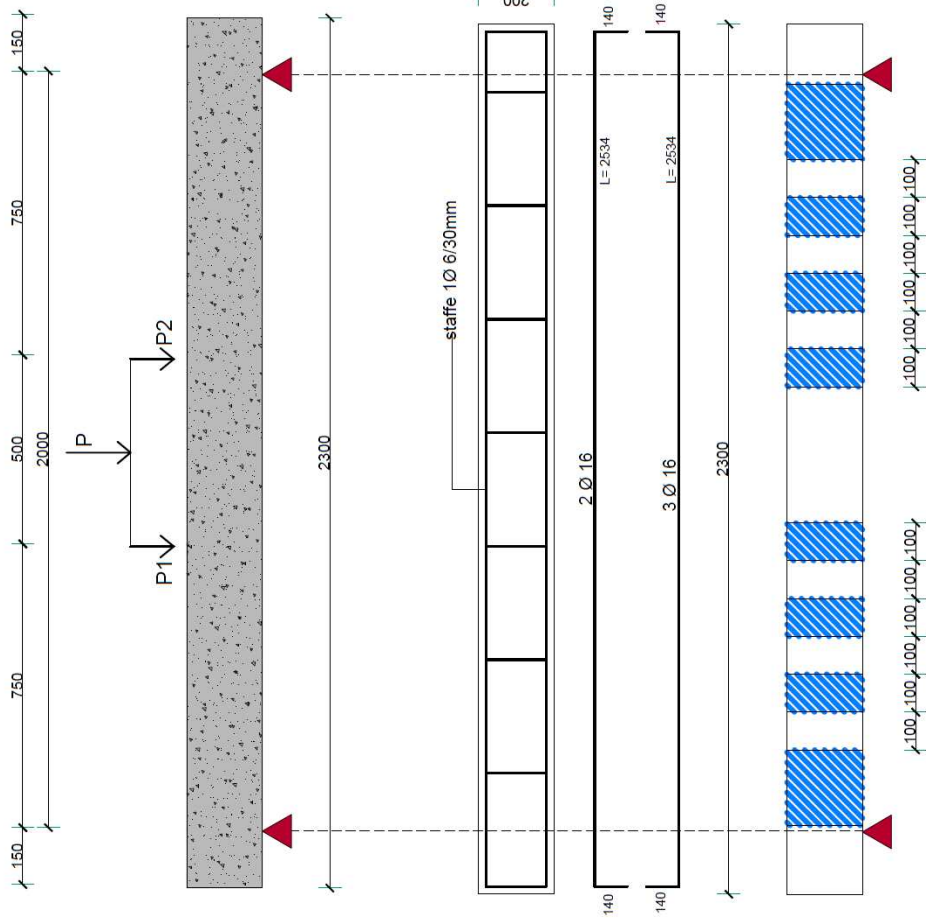


Trave non rinforzata

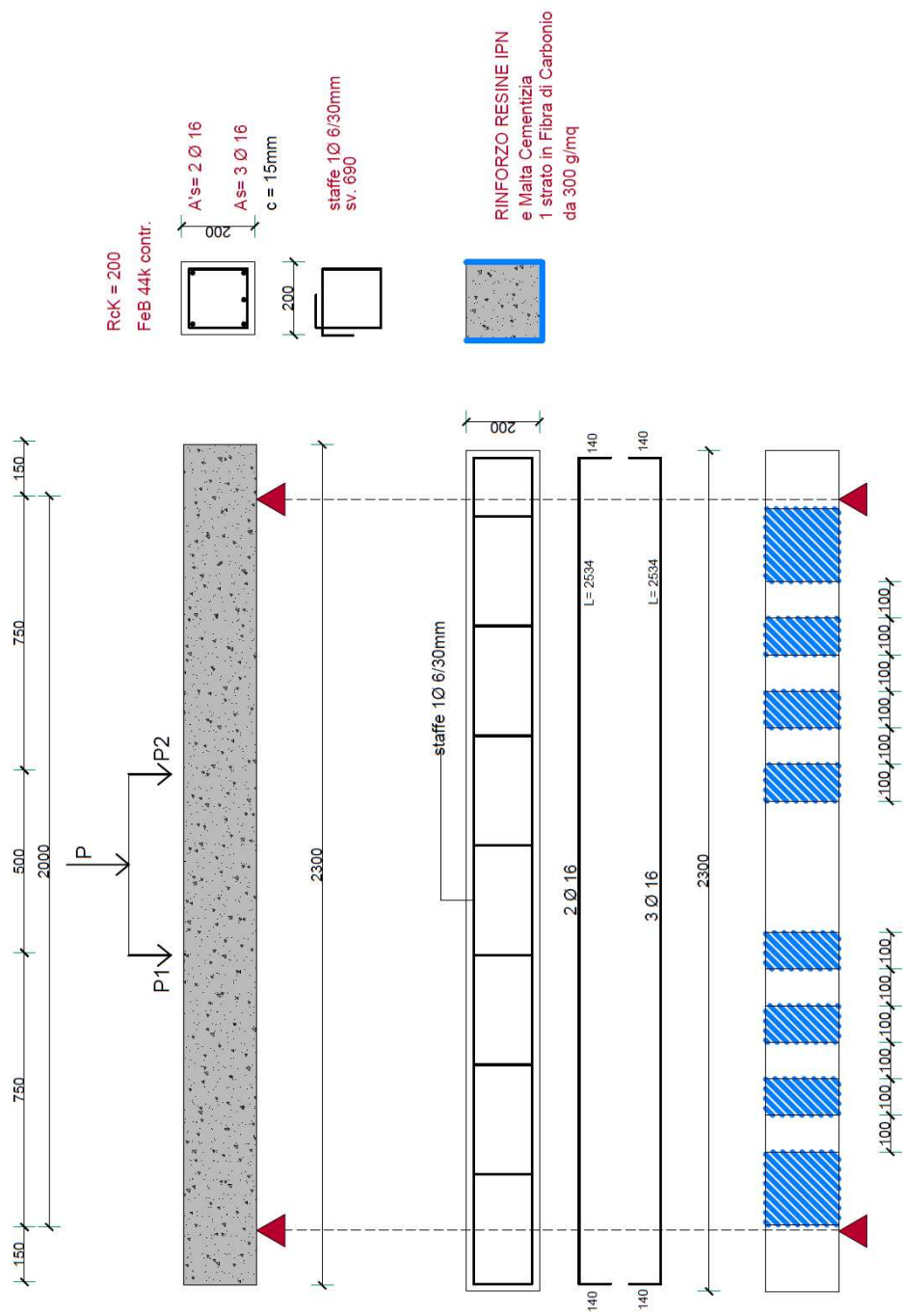
TT1



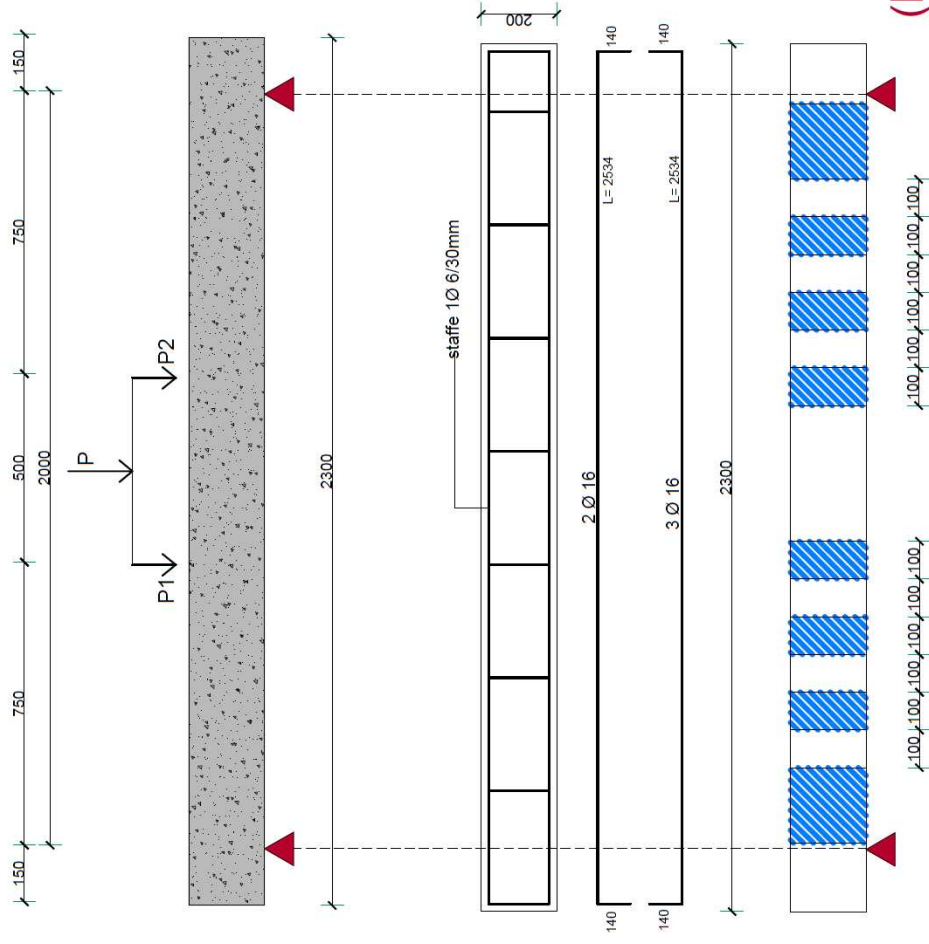
TT2



TT3



TT4



$R_{ck} = 200$
 FeB 44k contr.
 $A_s = 2 \text{ } \varnothing 16$
 $A_s = 3 \text{ } \varnothing 16$
 $c = 15\text{mm}$
 staffe $1 \text{ } \varnothing 6/30\text{mm}$
 sv. 690

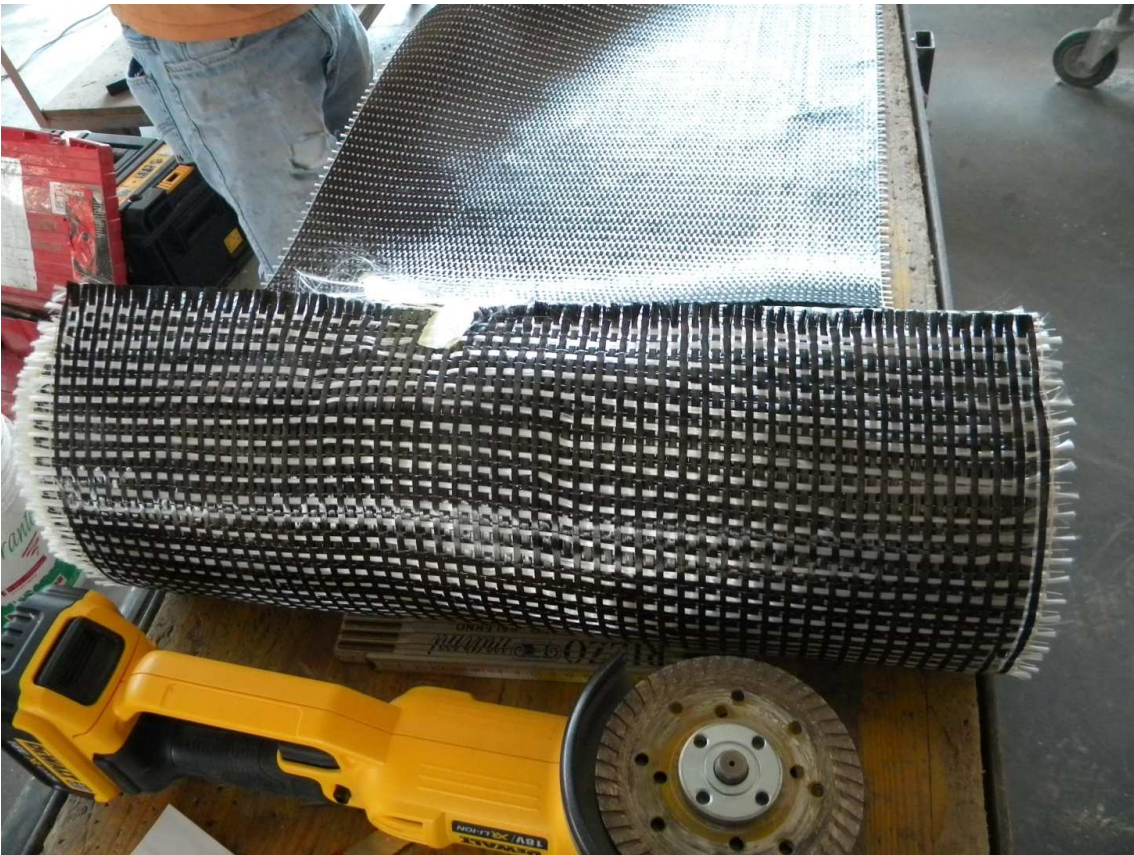


Rinforzo con Malta Cementizia
 1 strato in Fibra di Carbonio
 da 300 g/mq

(RI-Rinforzo trave TT1)

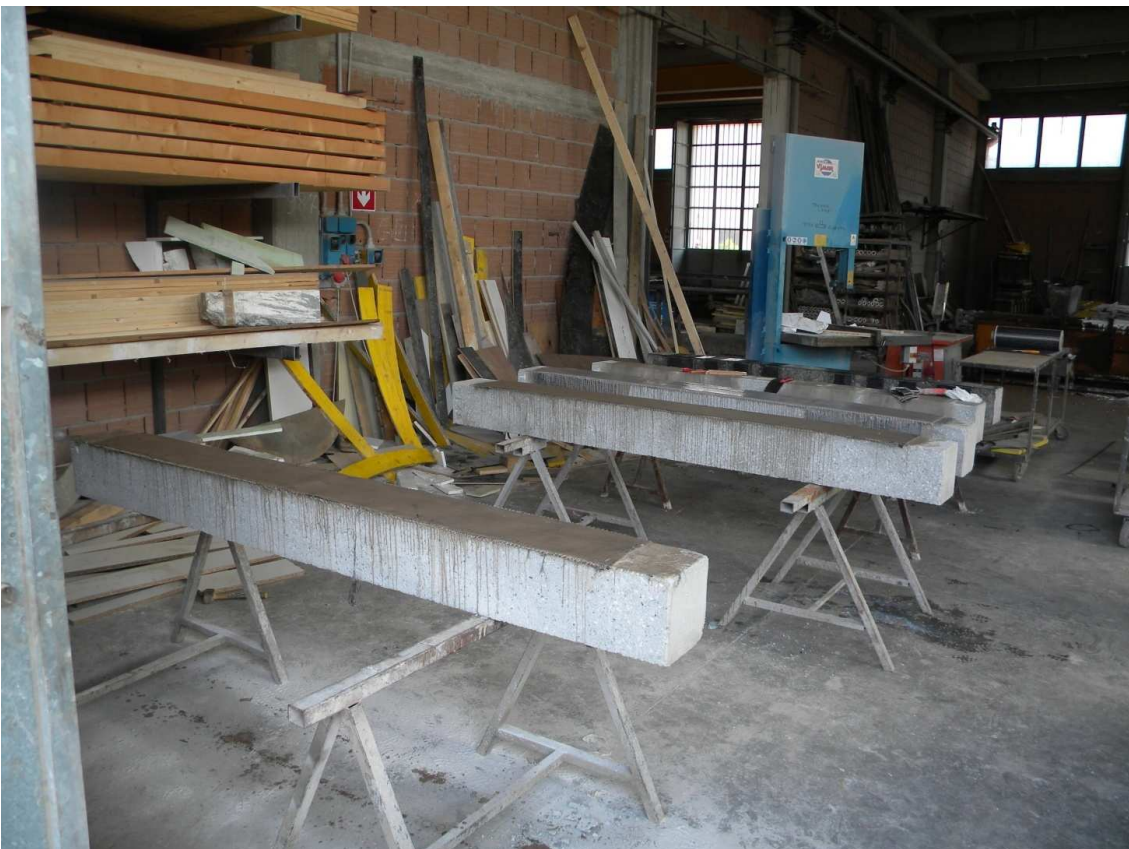
TT4-b

MODALITA' DI RINFORZO

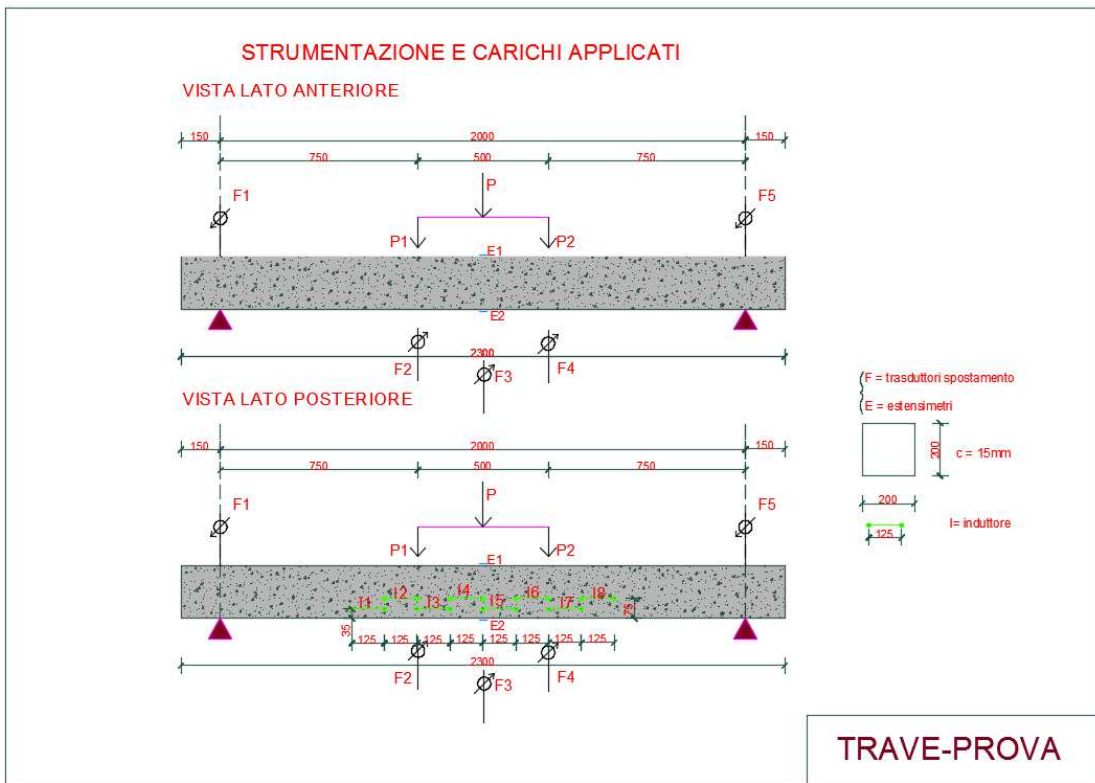








SCHEMA DI CARICO E DELLA STRUMENTAZIONE DELLE TRAVI PROVATE



Tutte le travi provate, sia rinforzate a flessione che a taglio, sono state interessate da carichi e strumentazioni come da soprastante figura. Le prove di carico, spinte sino a rottura delle travi, sono state precedute di un lento precarico di 4-5KN seguito da un altrettanto lento scarico, per costituire l'assestamento delle travi prima della prova vera e propria.

Nel seguito si riportano, per ogni tipologia di trave, i risultati medi ottenuti dalle prove di carico.

RISULTATI:

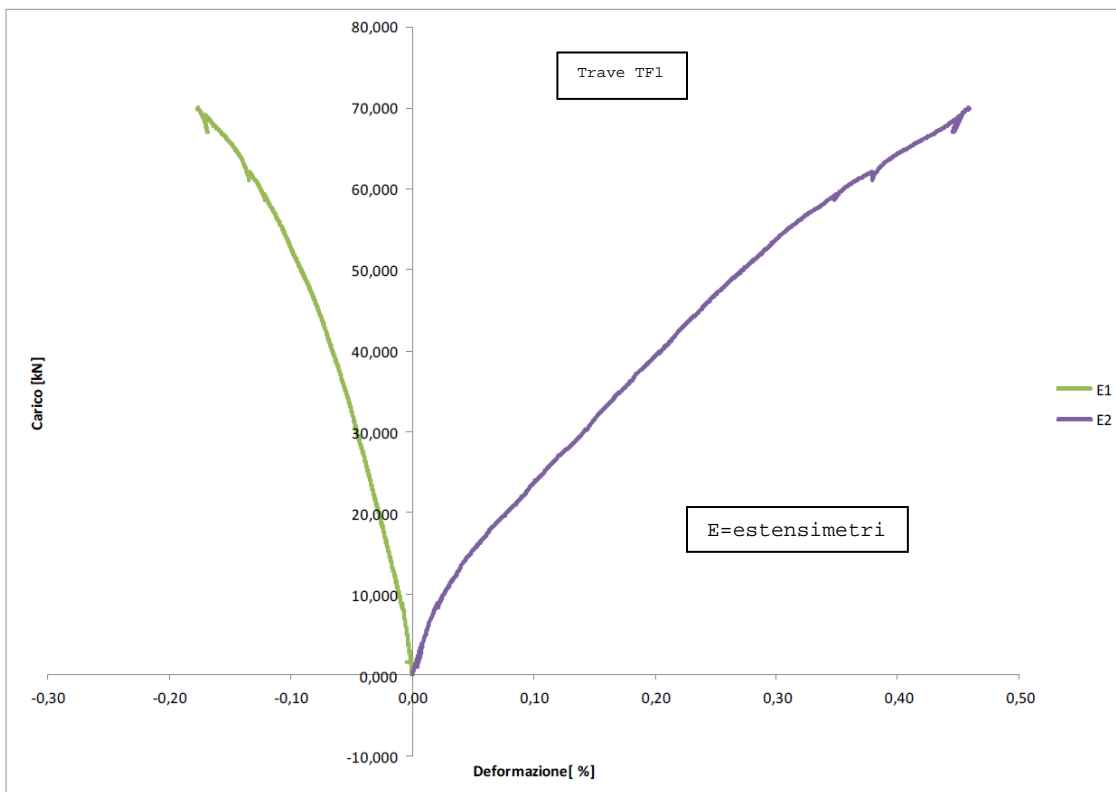
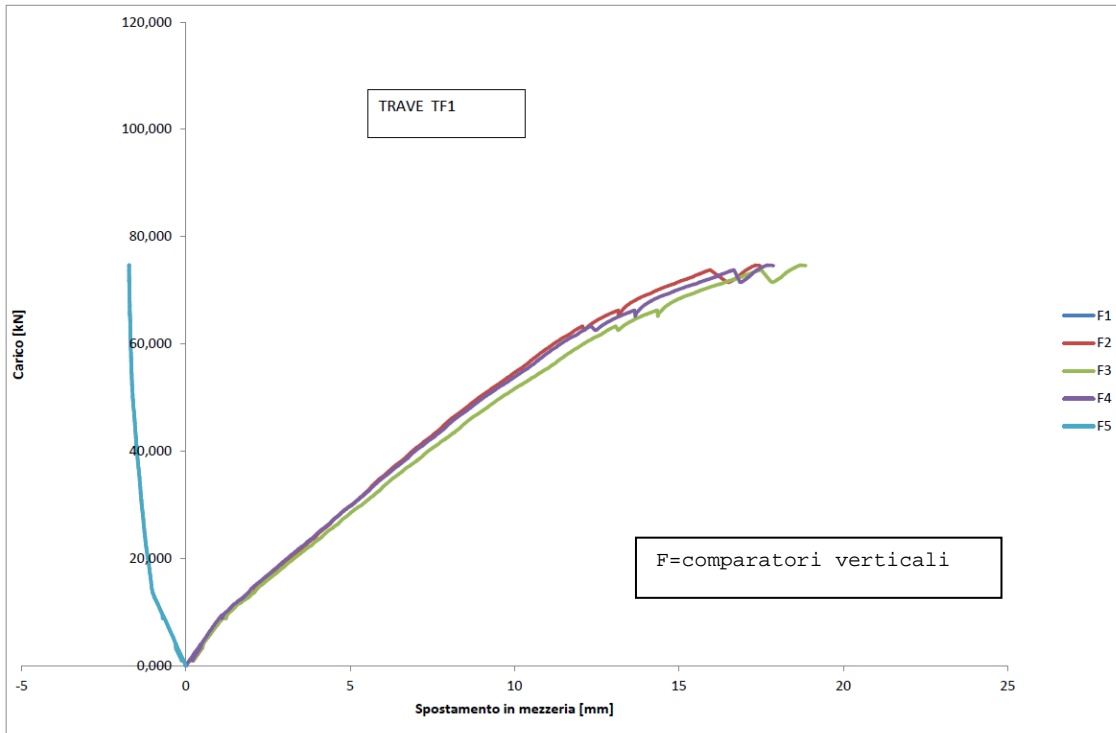
TRAVE TF1



Rinforzata con fibra di carbonio a 4 strati all'intradosso (area complessiva 1 cmq. circa), con resine IPN a base acqua.



GRAFICI CON I RISULTATI DELLE PROVE
(Carico di rottura= 74 KN)



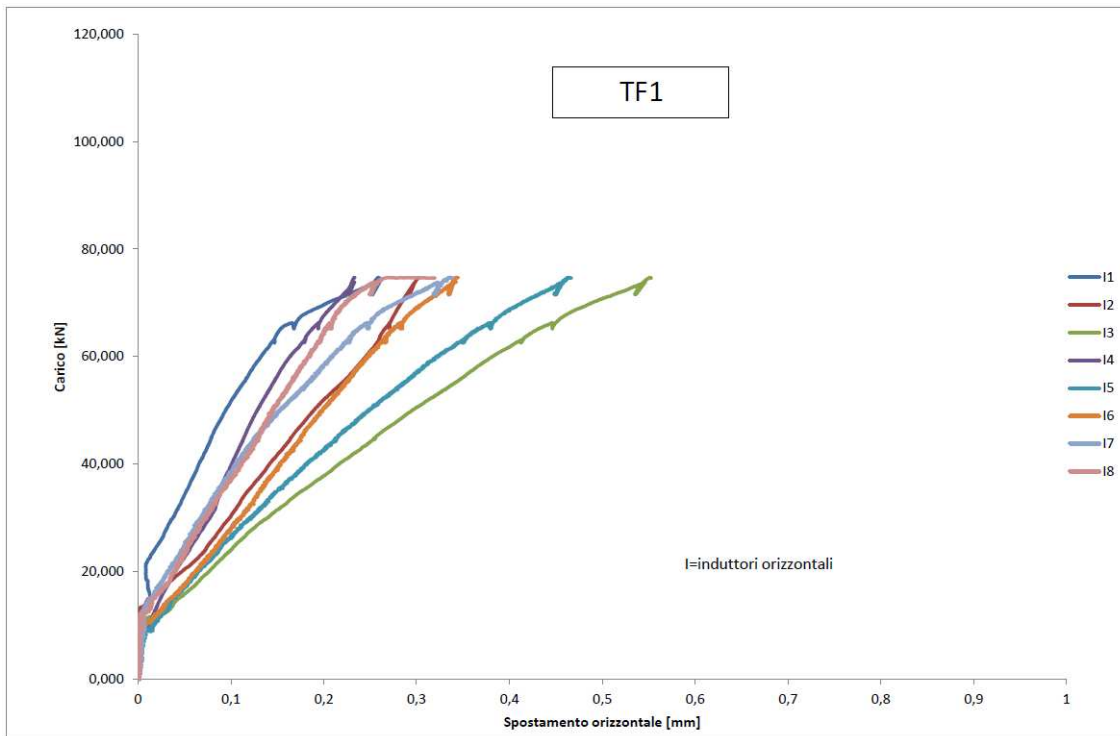
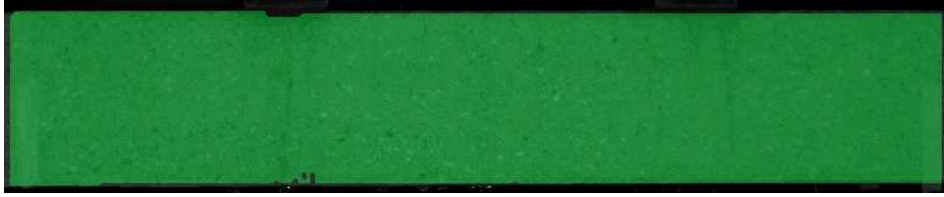


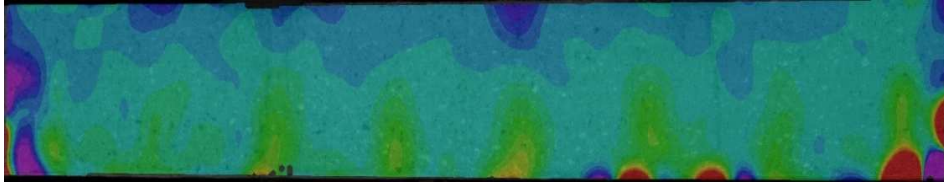
Foto DIC

Analisi eseguita con telecamera DIC (Digital Image Correlation)

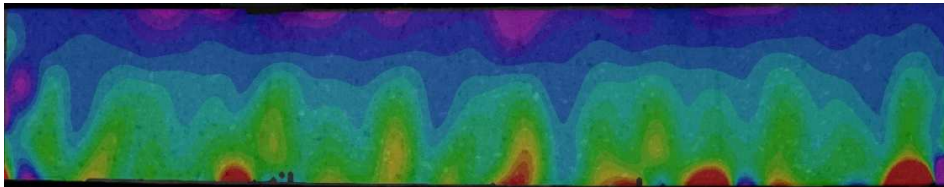
Questo è uno strumento virtuale dotato di proprio software che consente di riconoscere punti prefissati nel piano della parte verticale della trave frontestante. Fotografa una immagine e confronta punti prefissati con immagini successive (nel tempo), interessate a stati tensionali e fessurativi diversi e in evoluzione nel tempo. Valuta cioè gli spostamenti avvenuti sulla parete verticale della trave. Quindi assegna agli spostamenti rilevati colori diversi a seconda degli stati tensionali secondo una prefissata scala graduata. Questo nel piano con una telecamera. Disponendo di due telecamere si leggono anche gli spostamenti nello spazio (immagine stereoscopica).



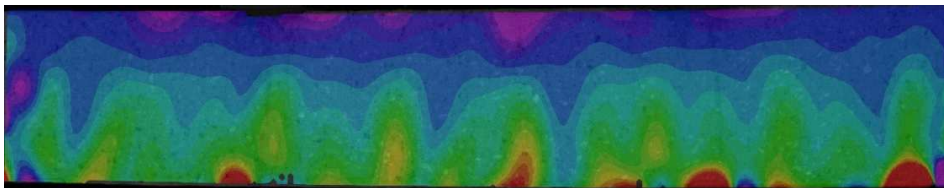
Carico 20 kN



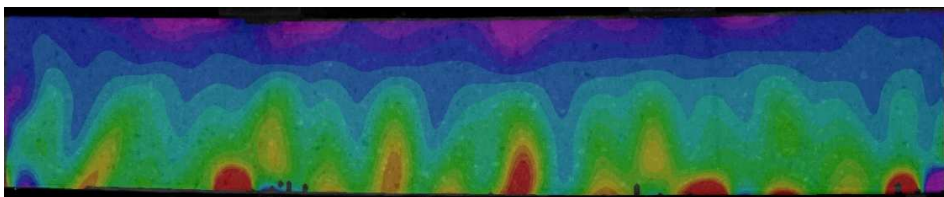
Carico 40 kN



Carico 60 kN



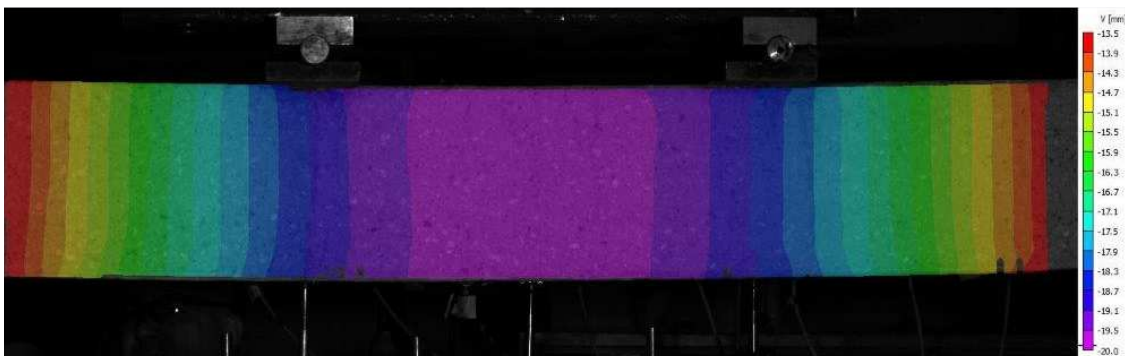
Carico max ~ 74 kN



Andamento tensionale per vari steps di carico



Abbassamenti trave con DIC



Stato tensionale/Deformativo

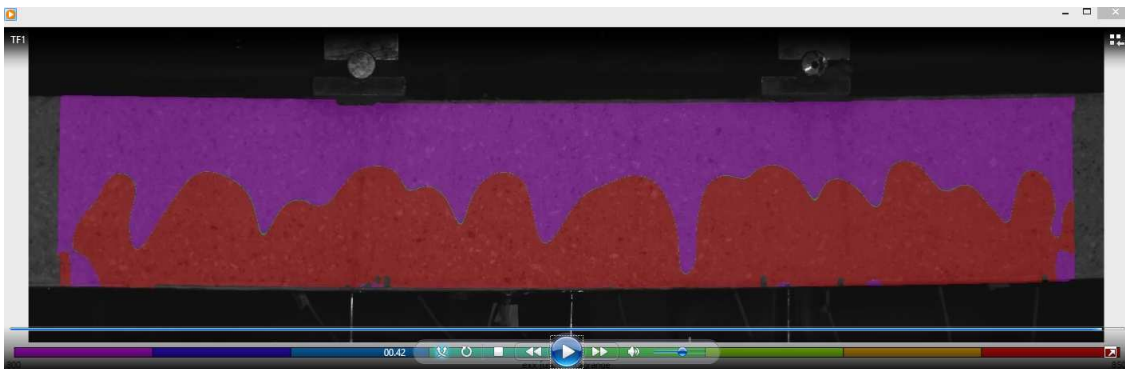
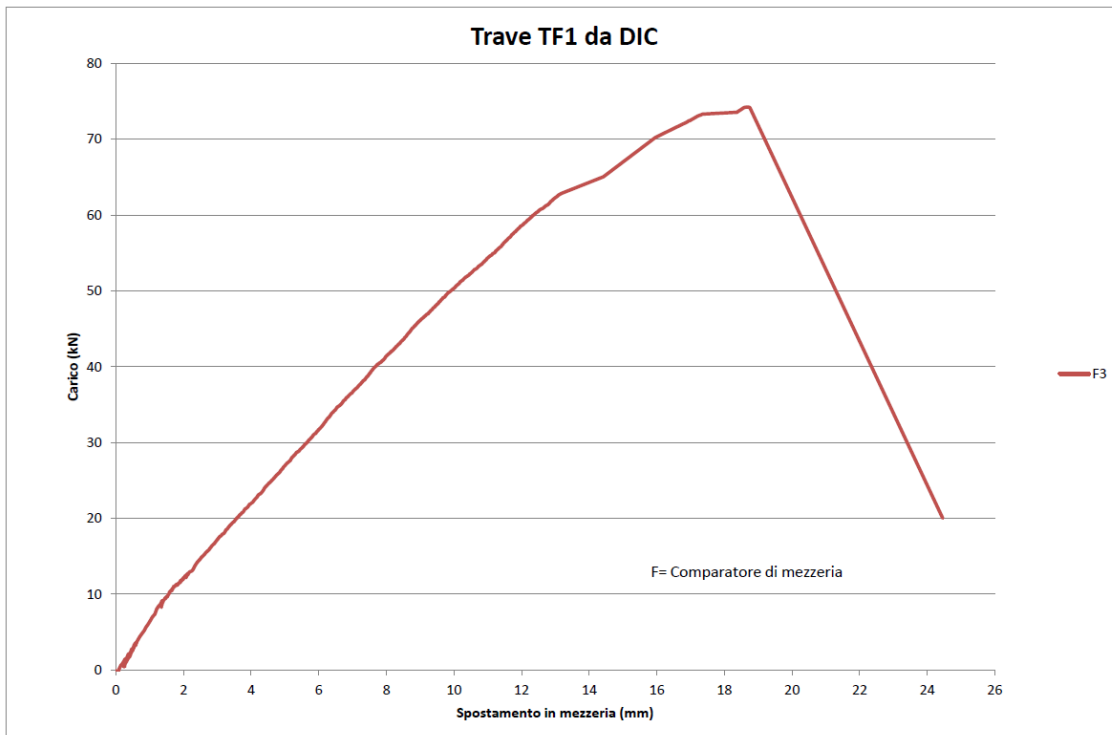


Grafico TF1-DIC

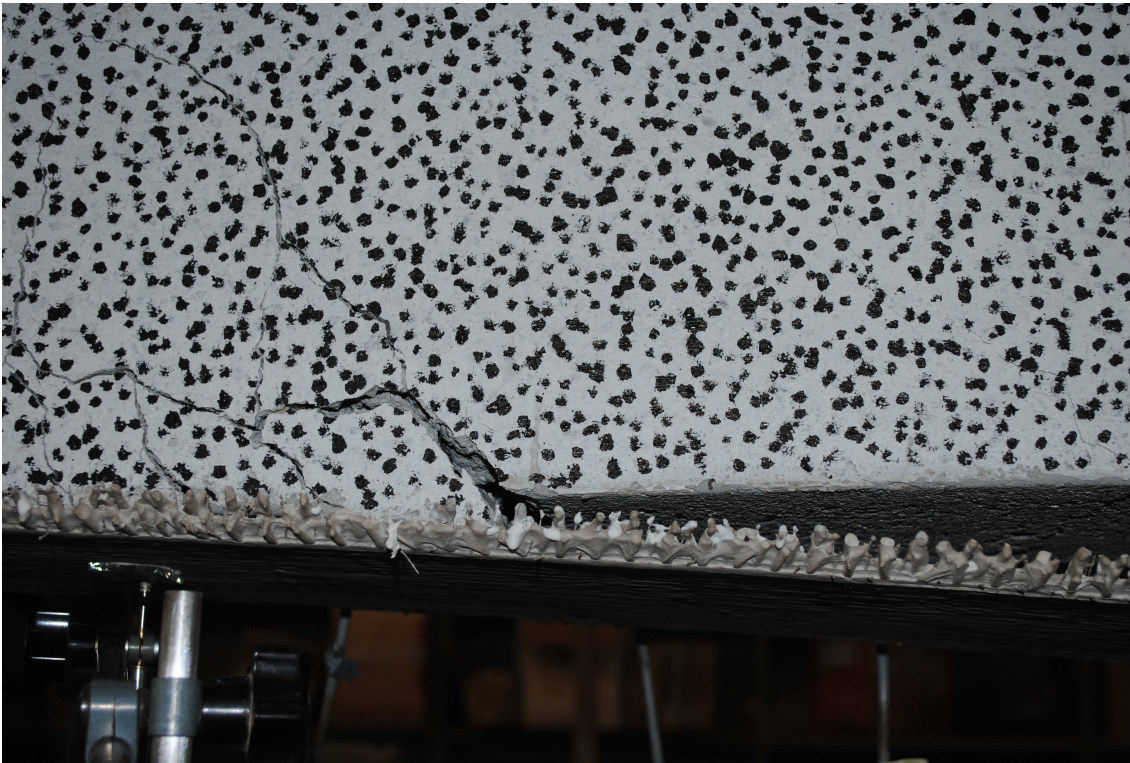


TRAVE TF1-b

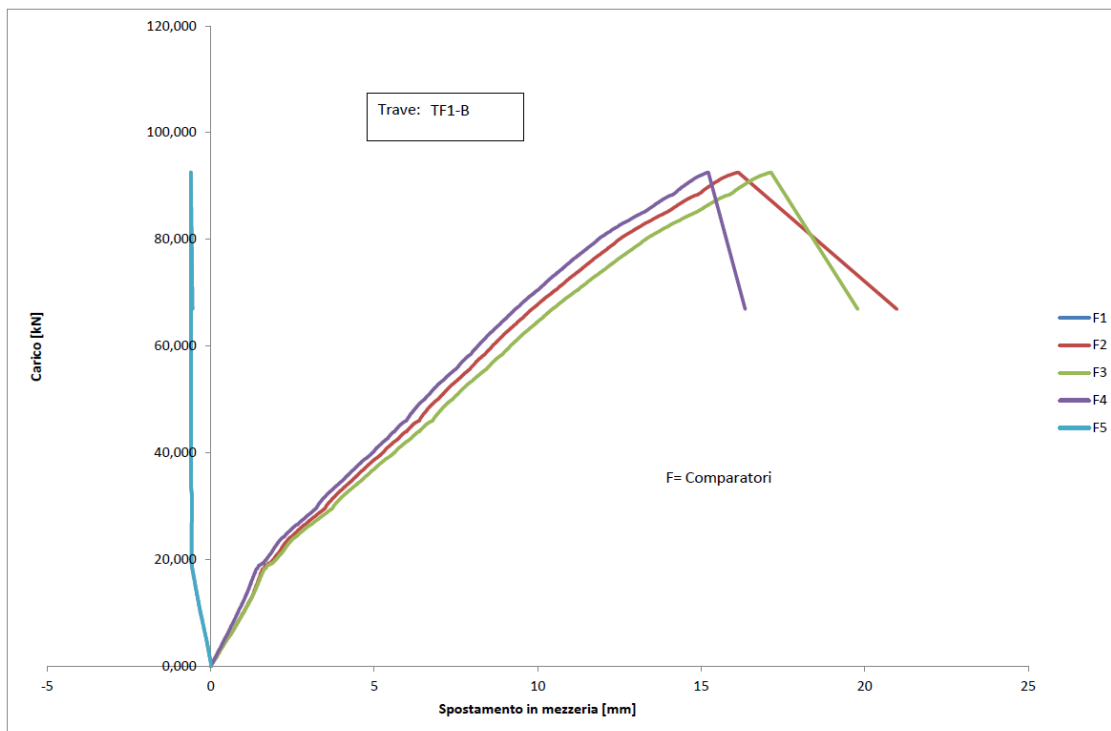


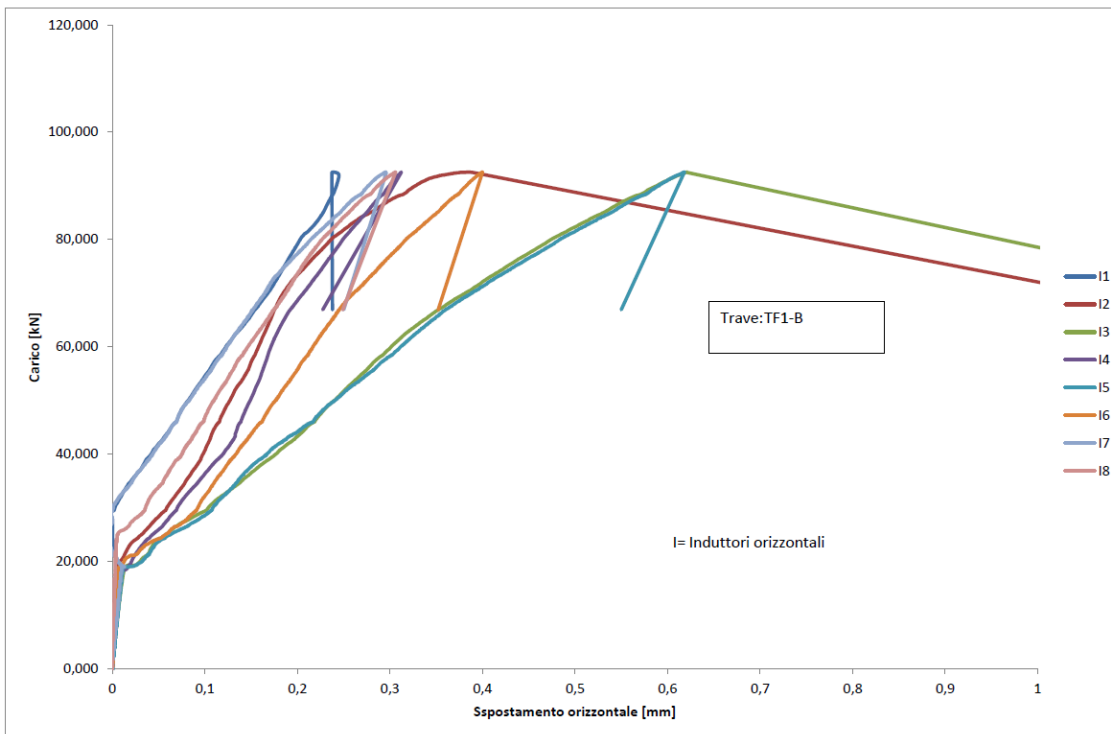
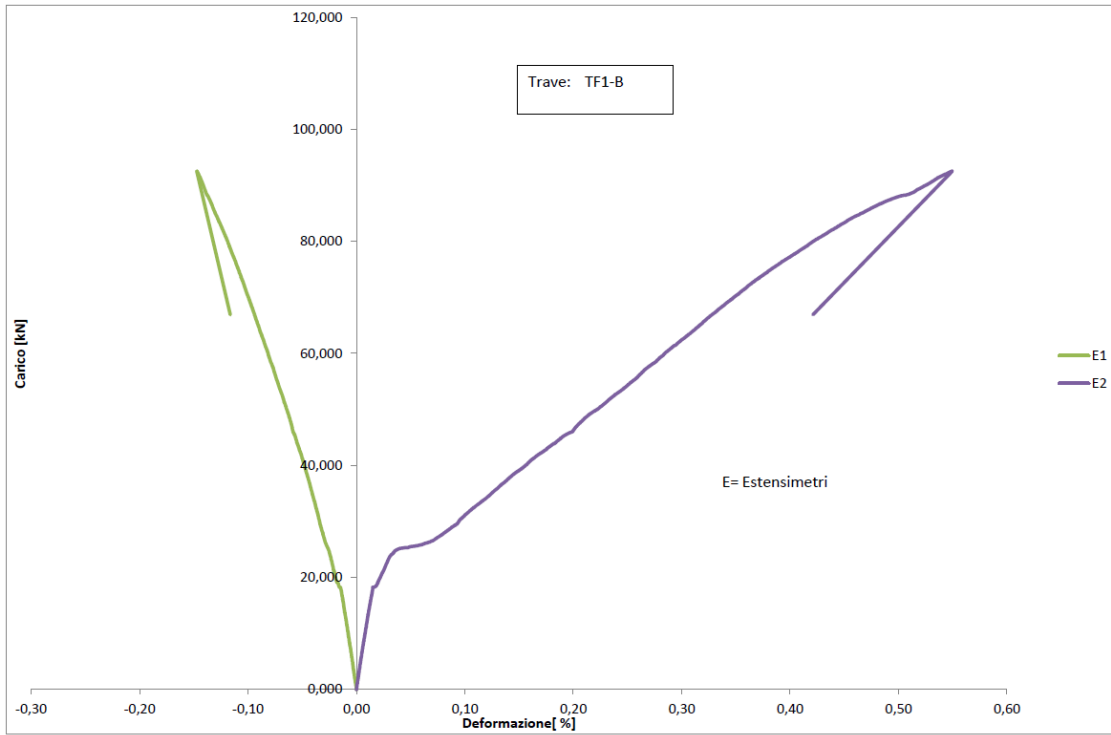
Rinforzata con fibra di carbonio a 4 strati all'intradosso (area complessiva 1 cmq. circa), con resine IPN a base acqua.

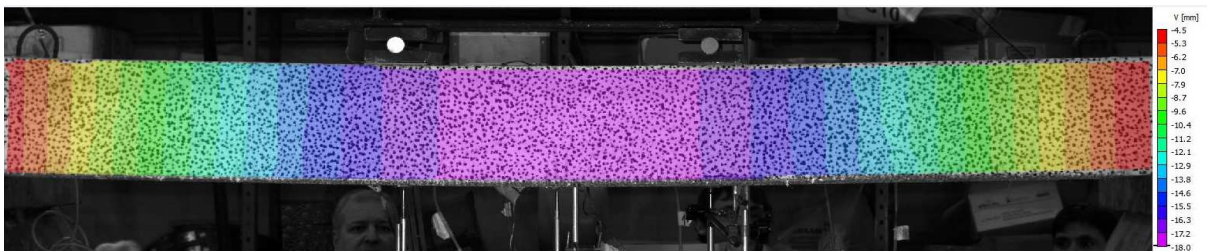
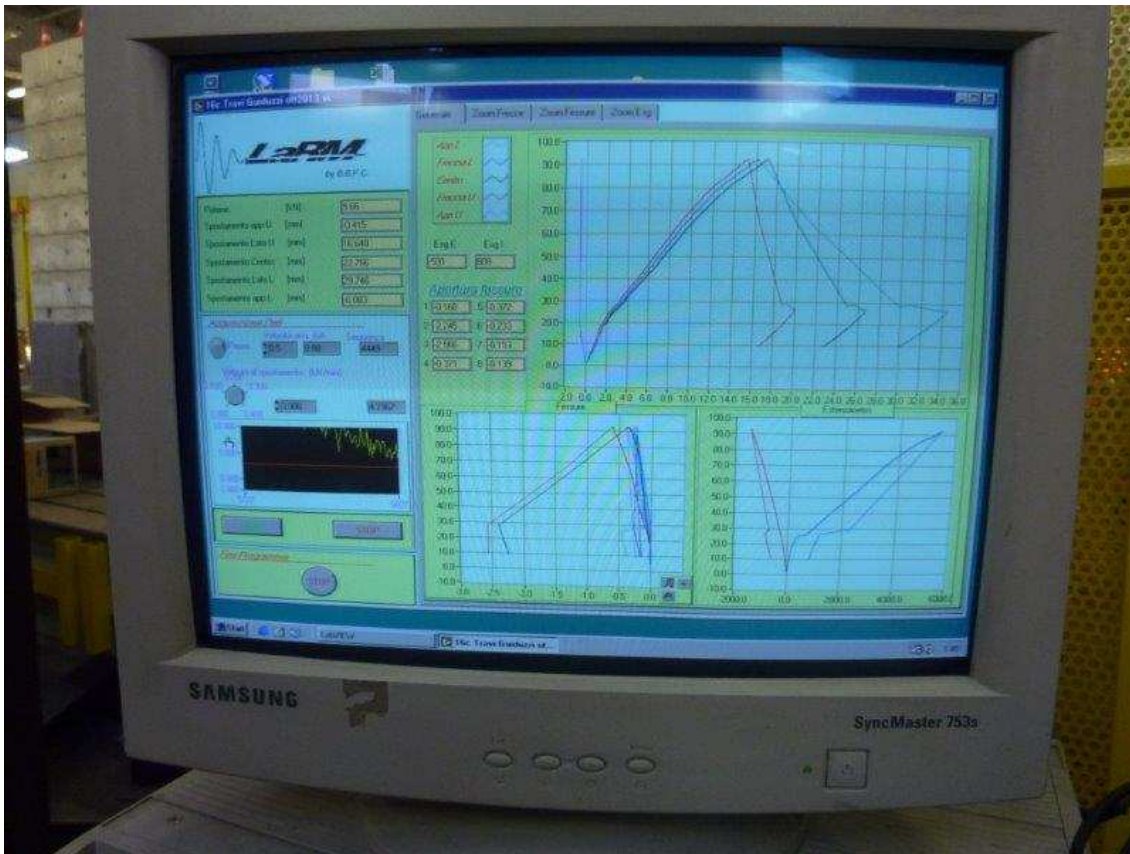




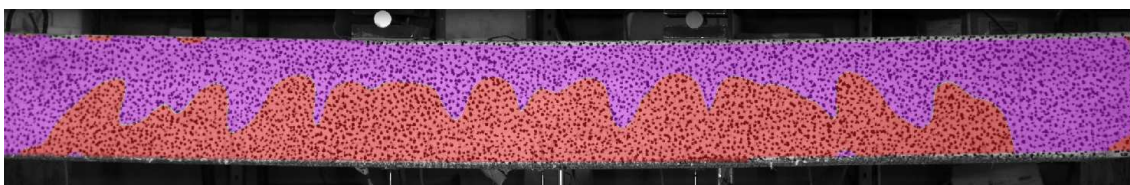
Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 85KN)





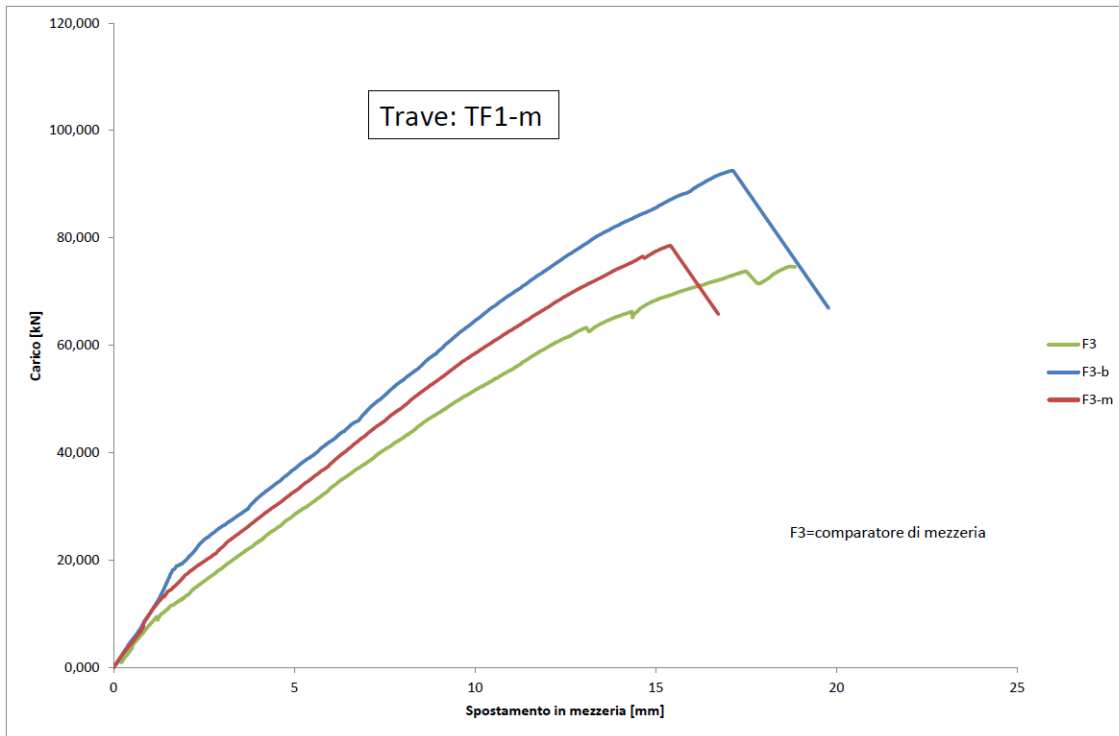


Abbassamenti verticali in mezzeria

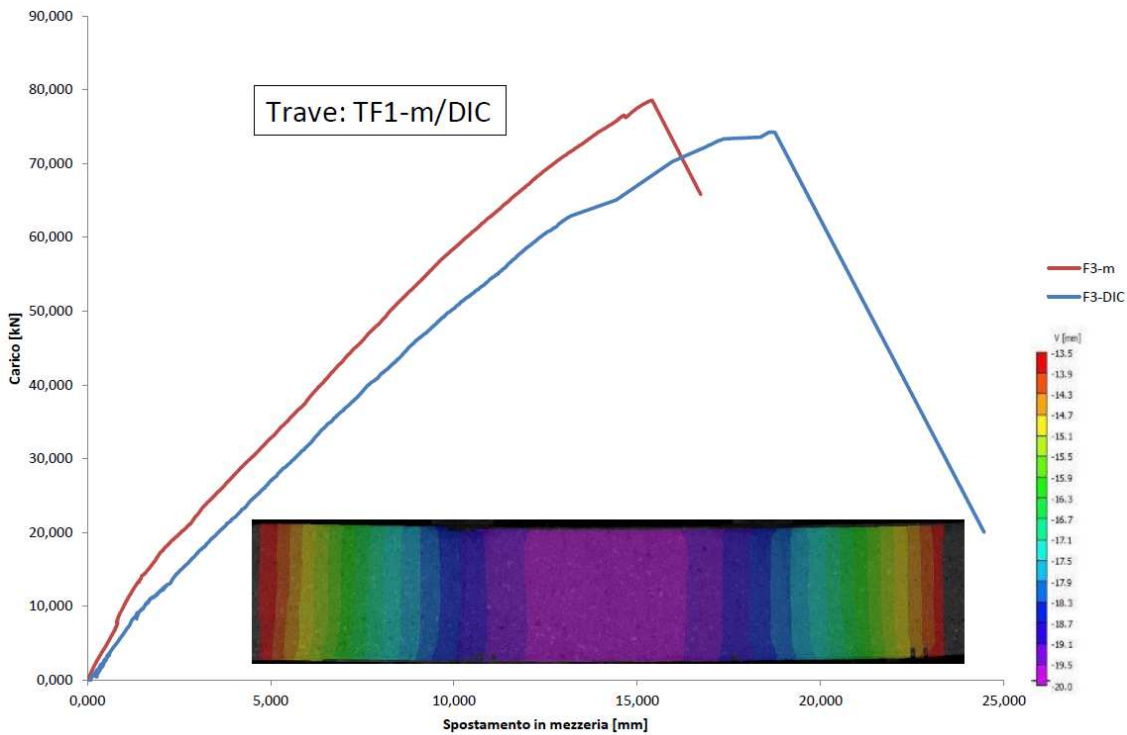


Stato tensionale/deformativo

Grafico TF1/TF1-b (valori medi)

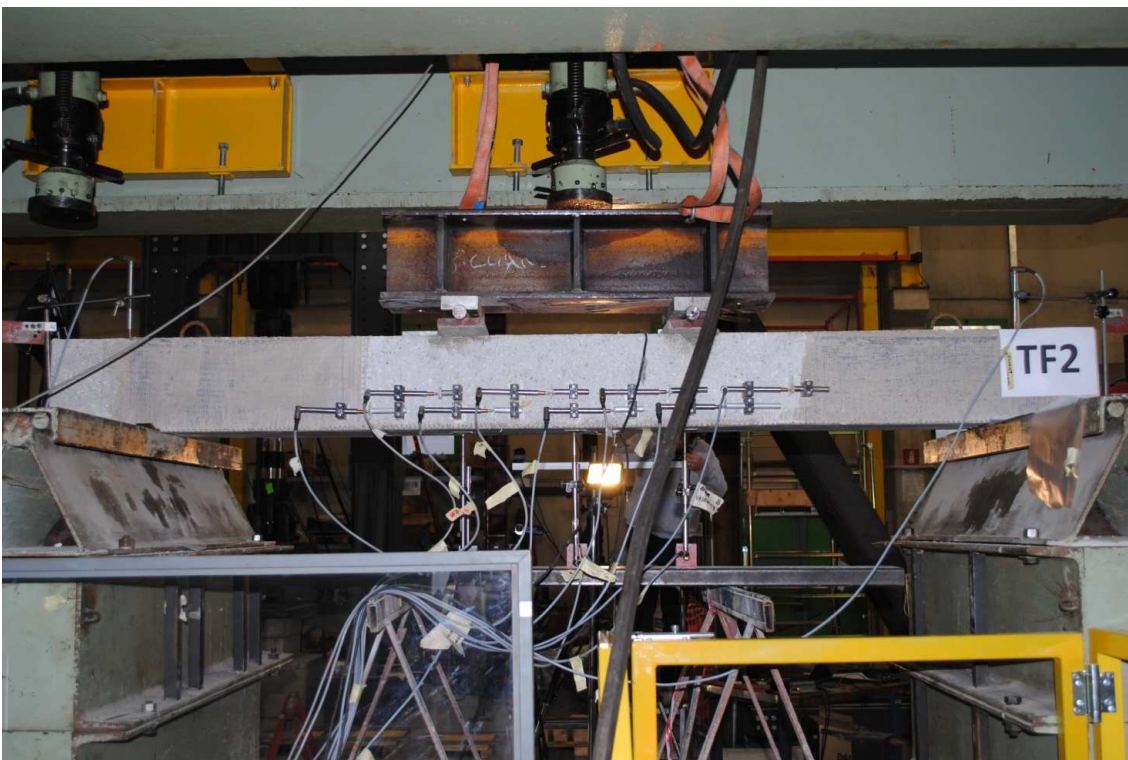


Confronto dei risultati medi TF1/TF1-b con la media dei risultati ottenuti con la DIC



TRAVE TF2

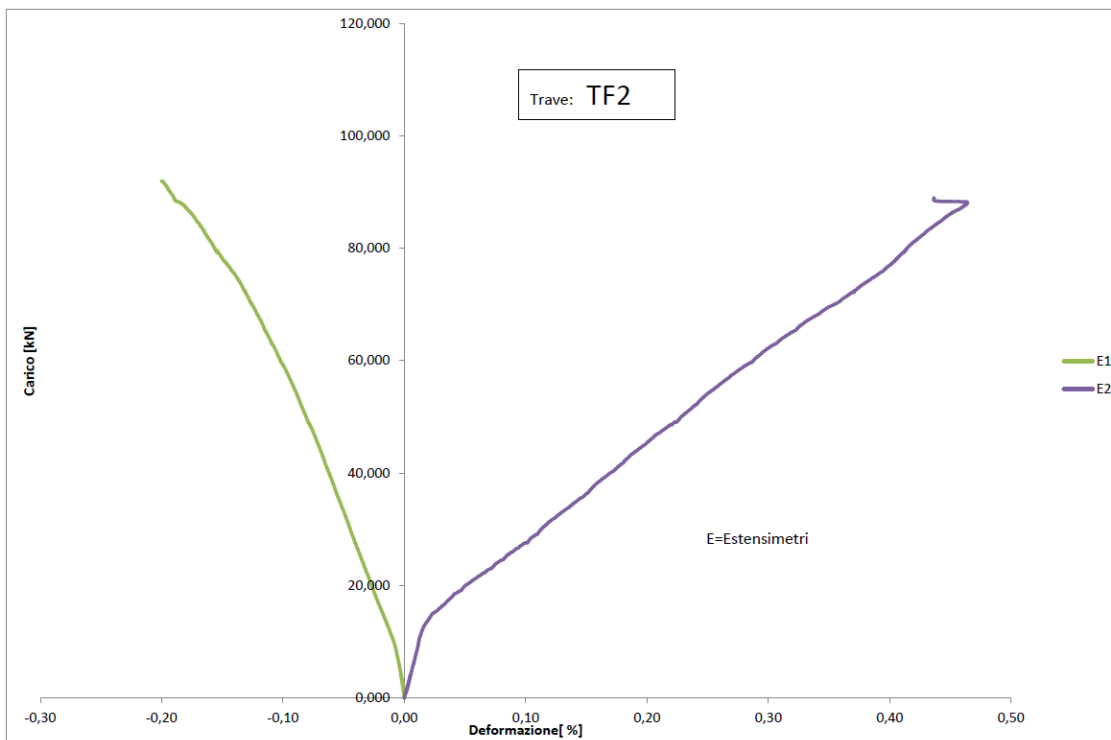
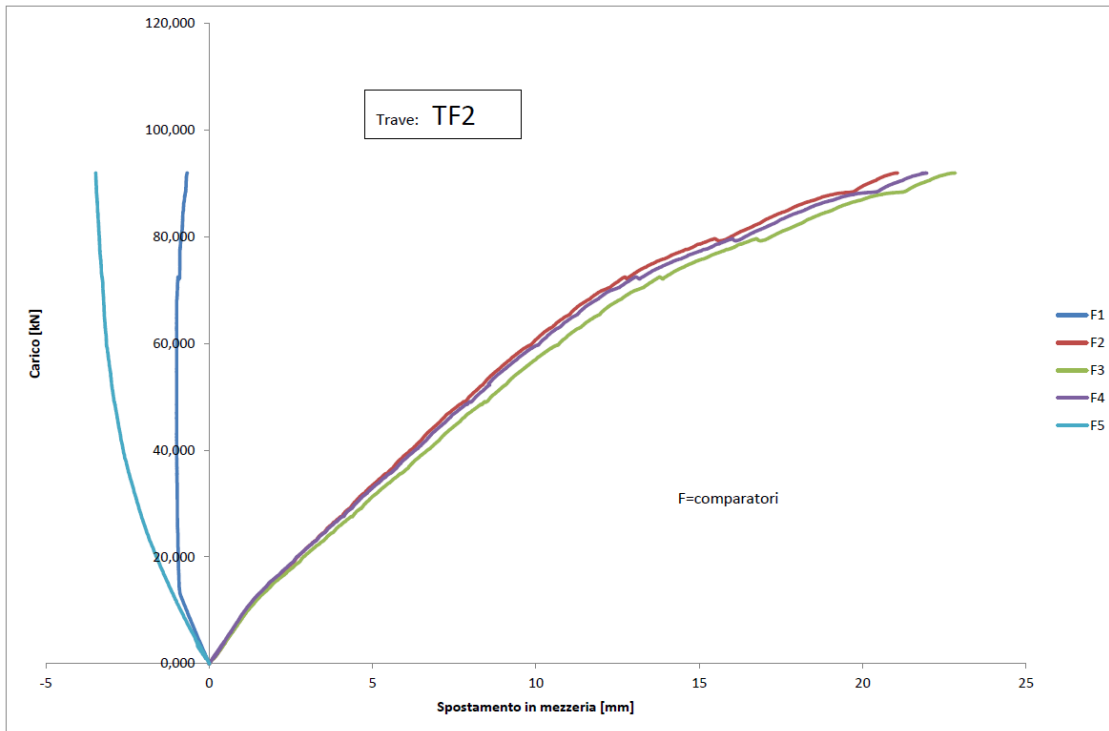
Rinforzata a flessione con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua più fasce laterali "antidebonding".

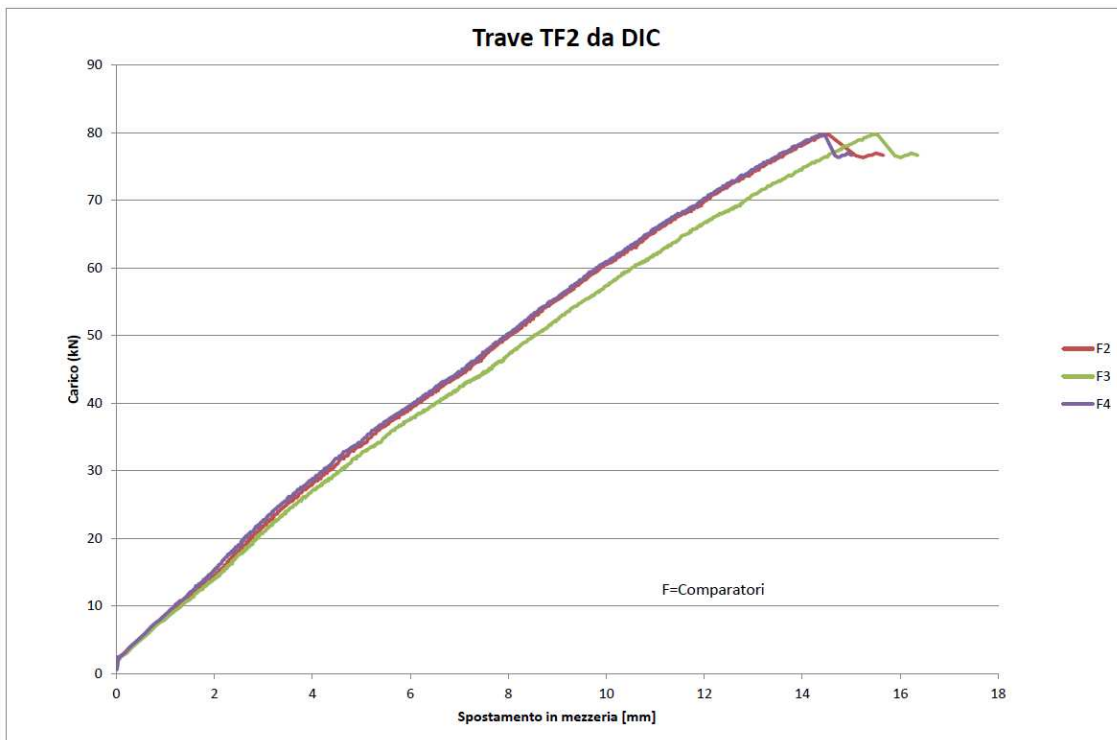
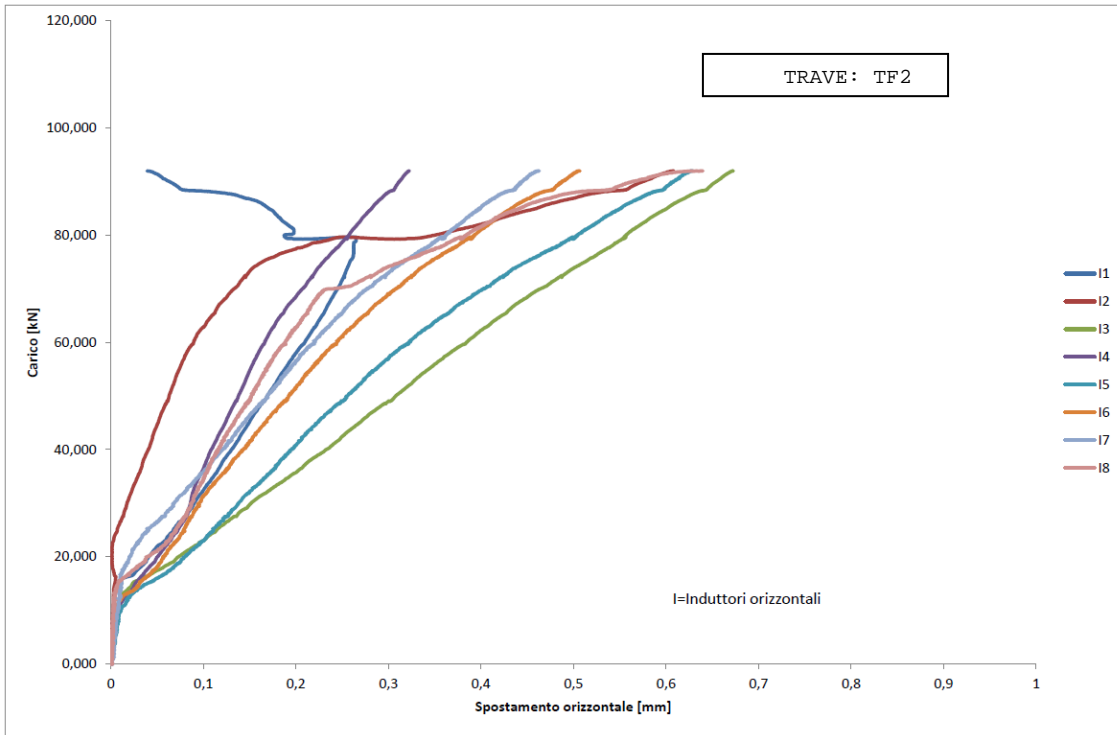




Grafici con i risultati della prova

(Carico di rottura= 92 KN)





TRAVE F2-b

Rinforzata a flessione con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua più fasce laterali "antidebonding".

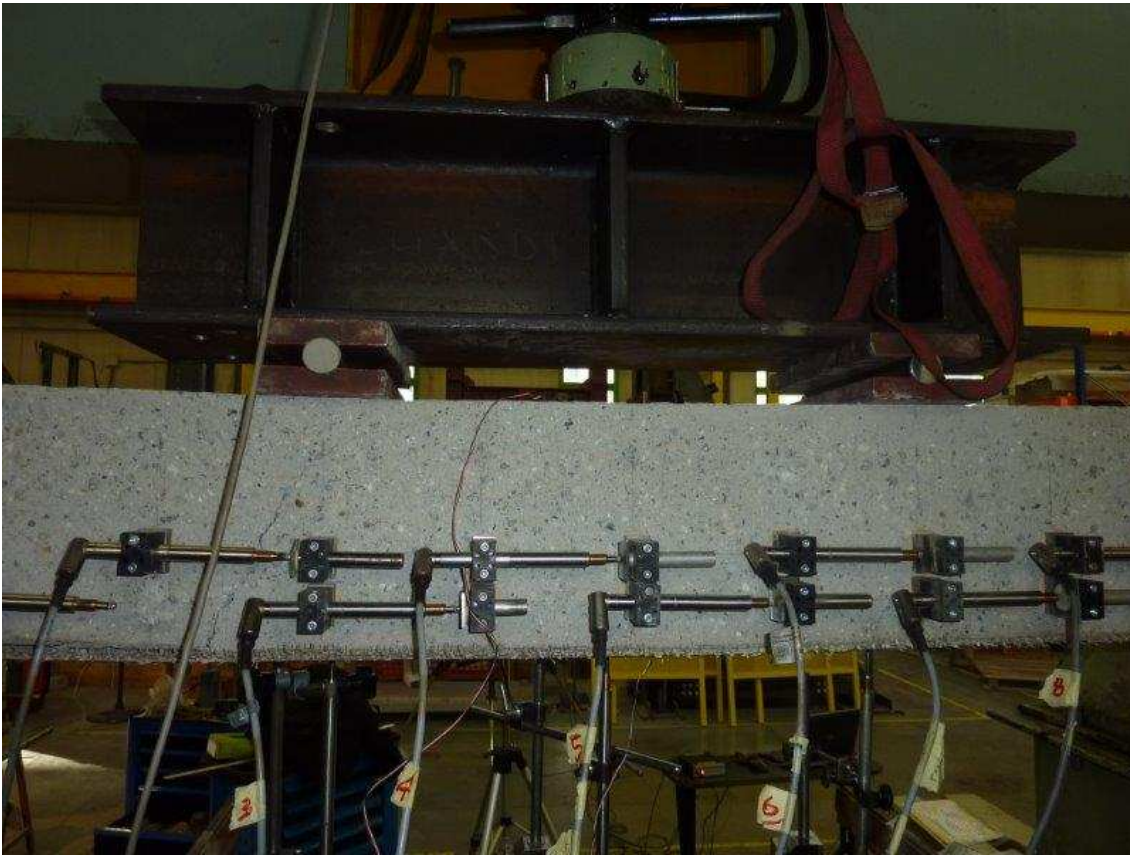




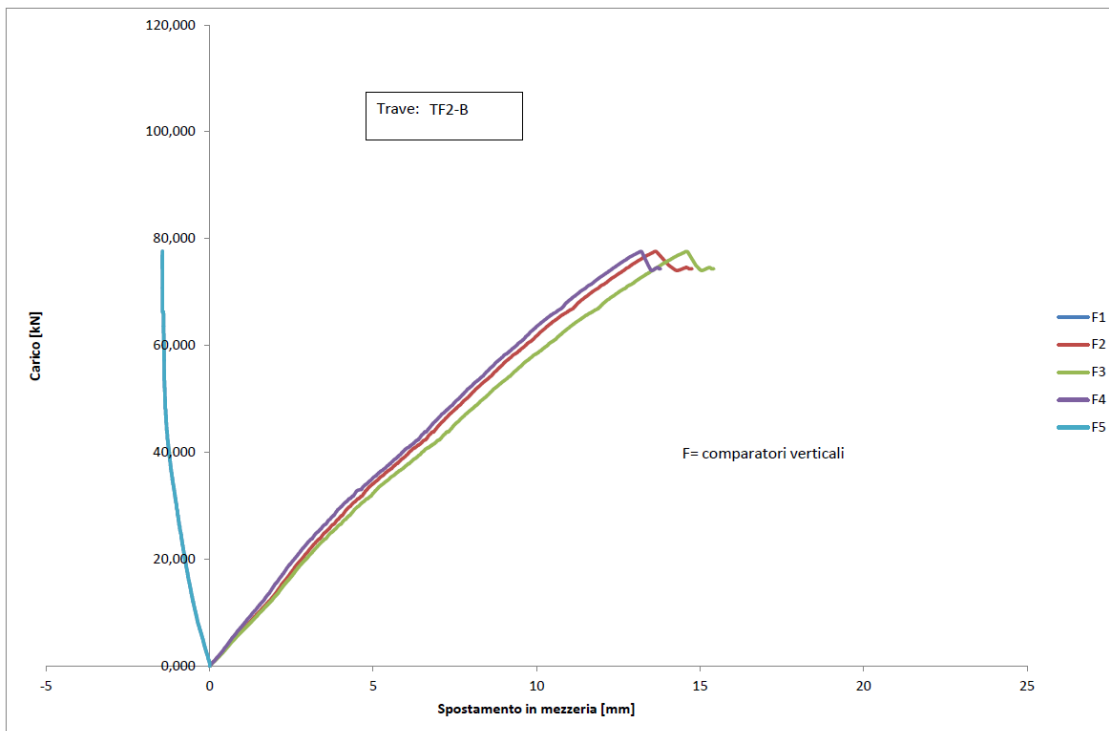
Rottura:

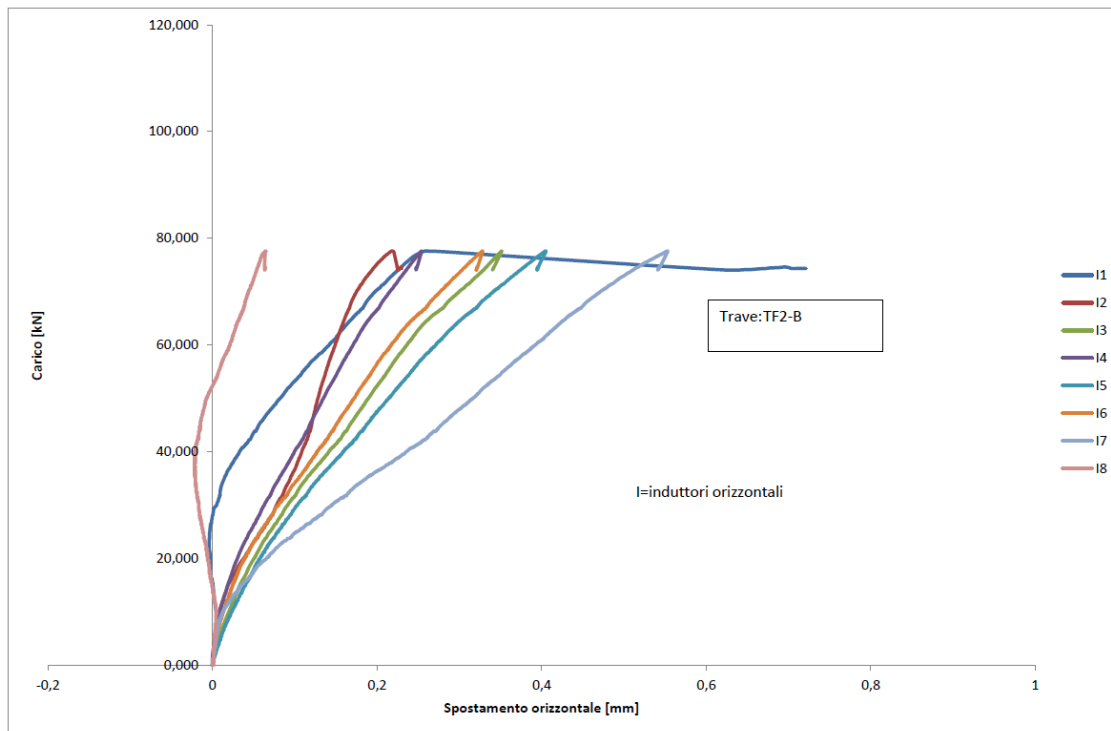
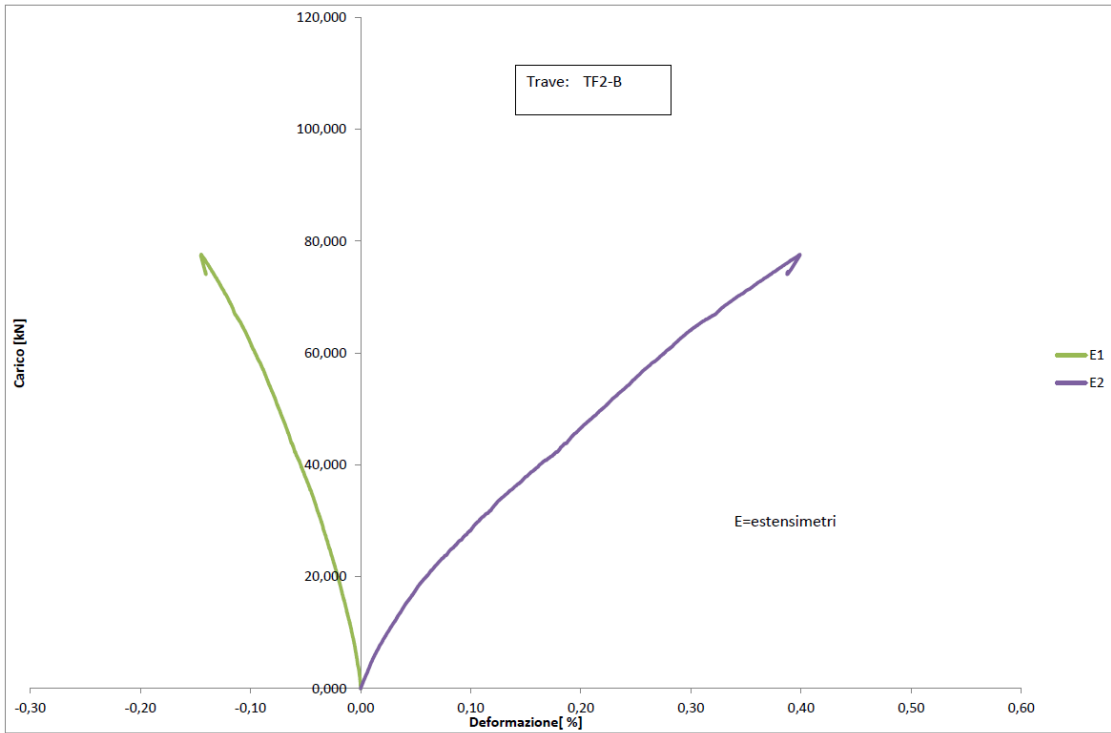






Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 80 kN)





Trave TF2-b da DIC

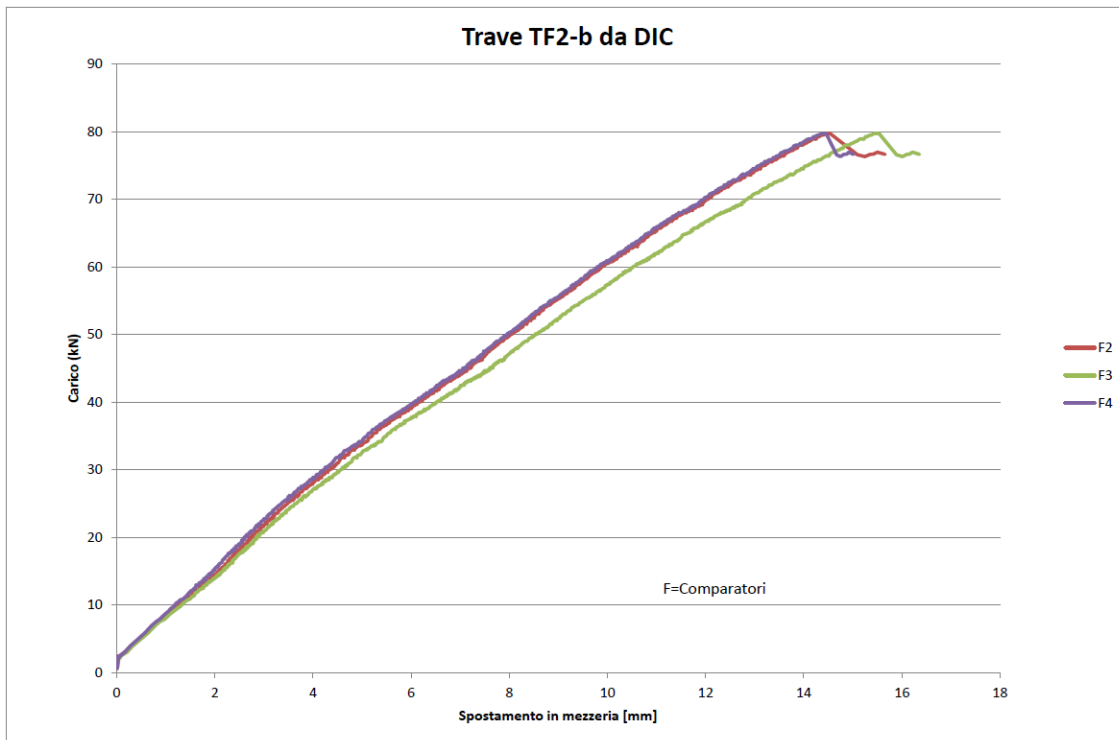


Grafico TF2-m

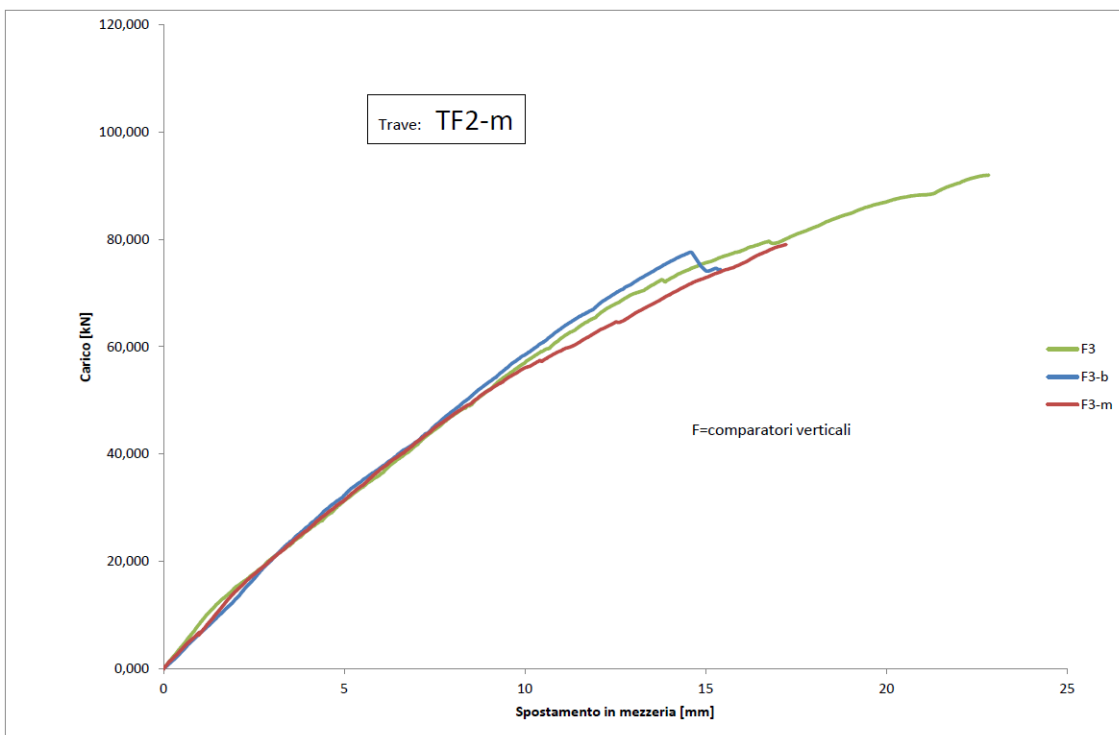
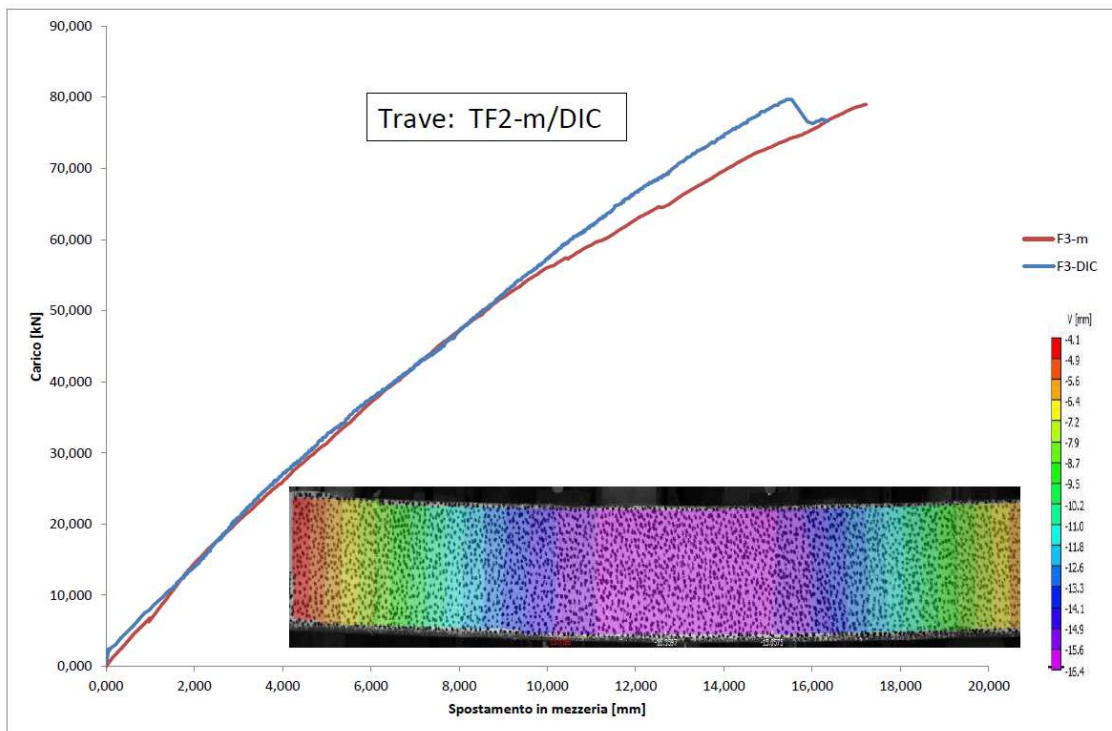


Grafico TF2-m/DIC



TRAVE TF3

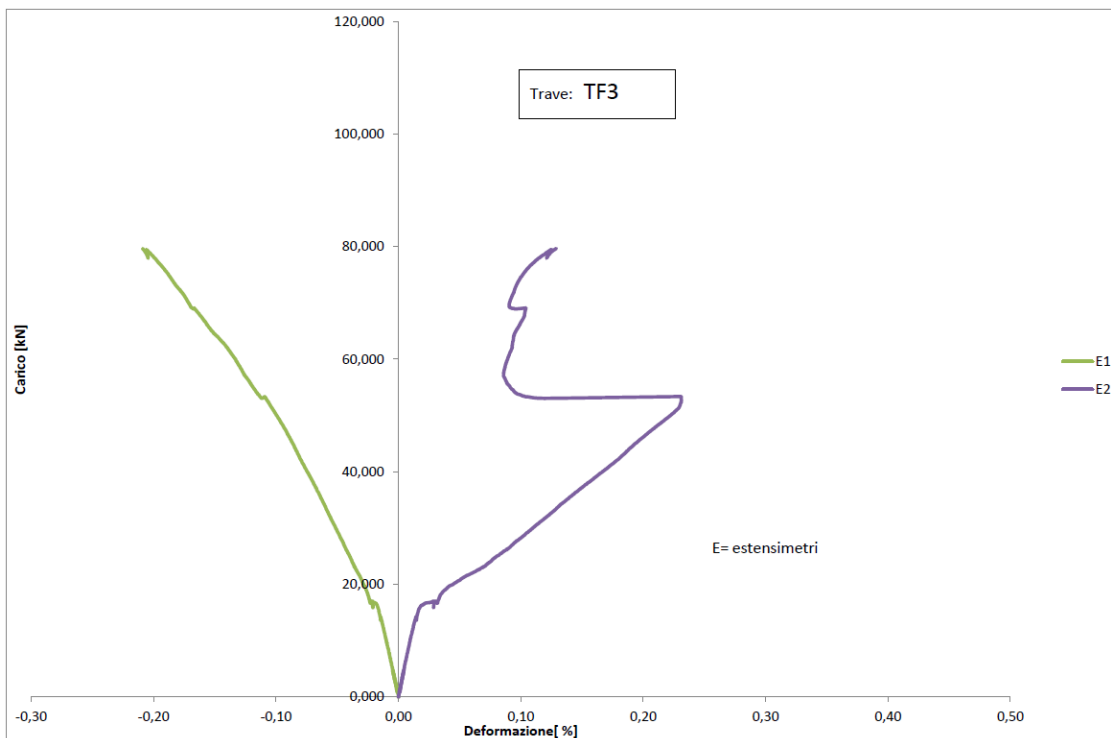
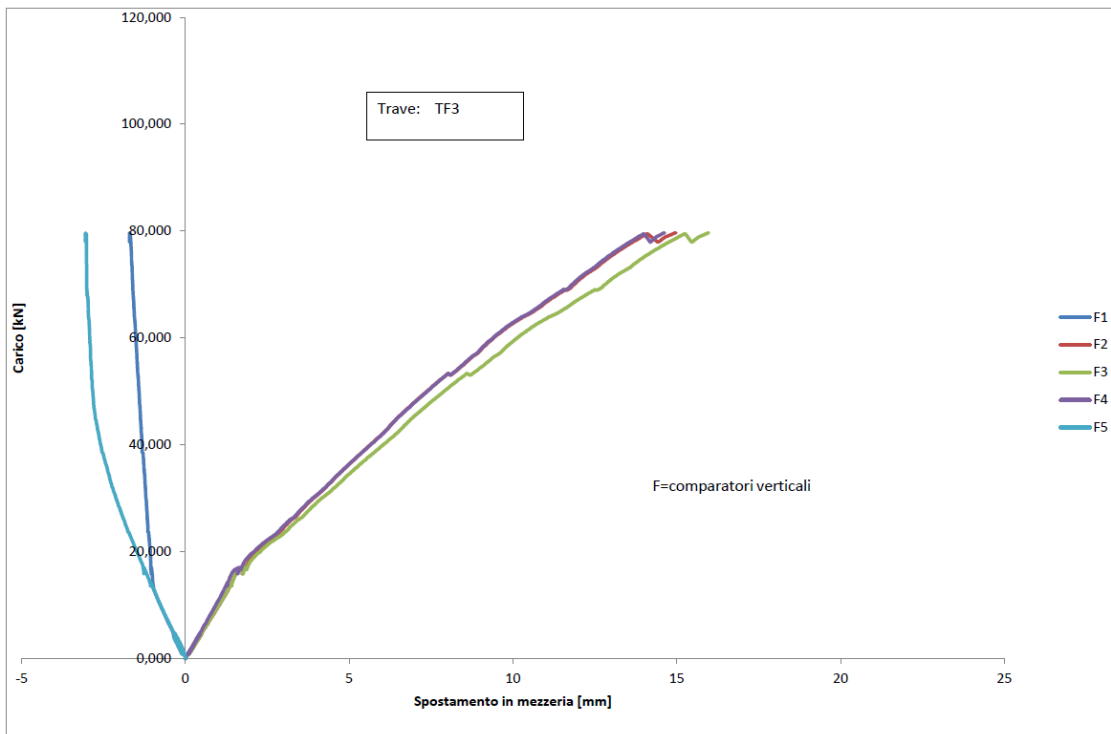
La trave TF3 è rinforzata a flessione con fibre di carbonio e con resine IPN a base acqua più connettori ardfix.

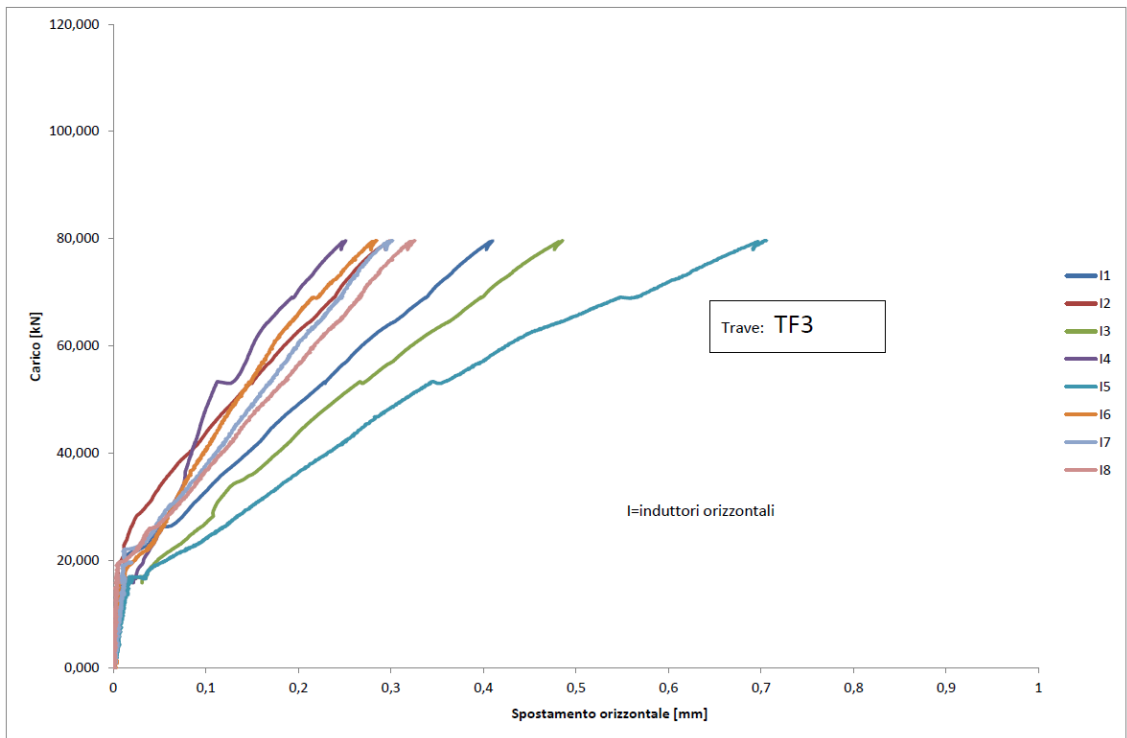




Grafici con i risultati della prova

(Carico di rottura= 82 KN)





TRAVE TF3-b

La trave TF3 è rinforzata a flessione con fibre di carbonio e con resine IPN a base acqua più connettori ardfix.

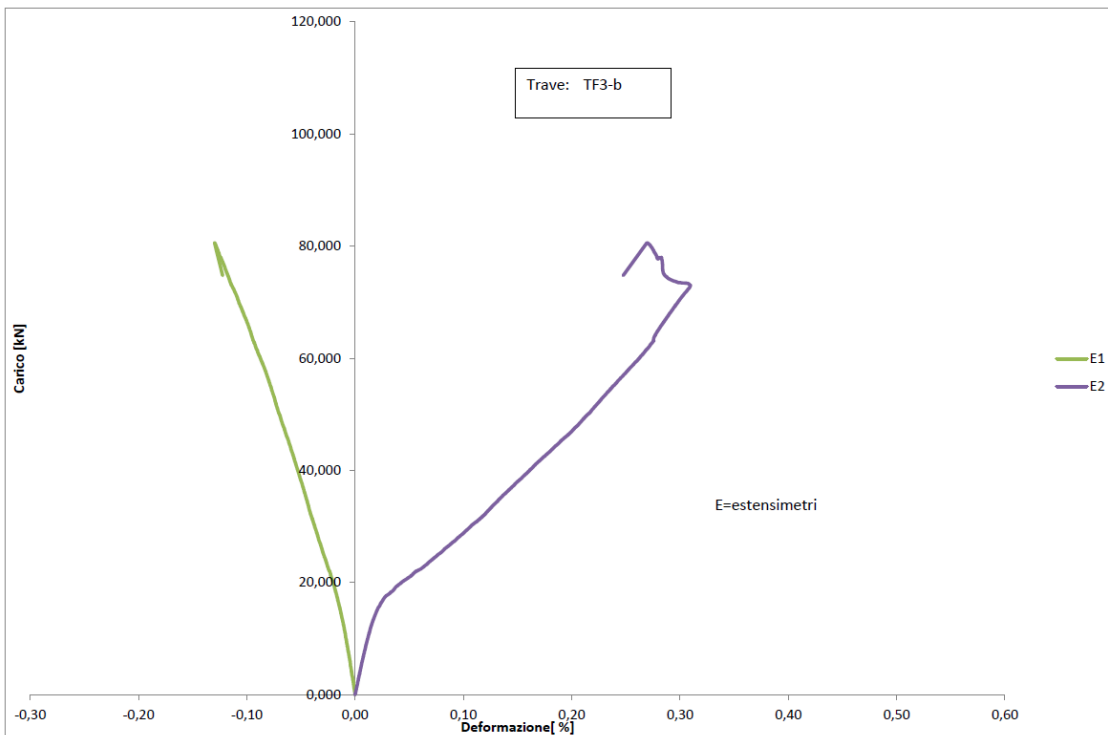
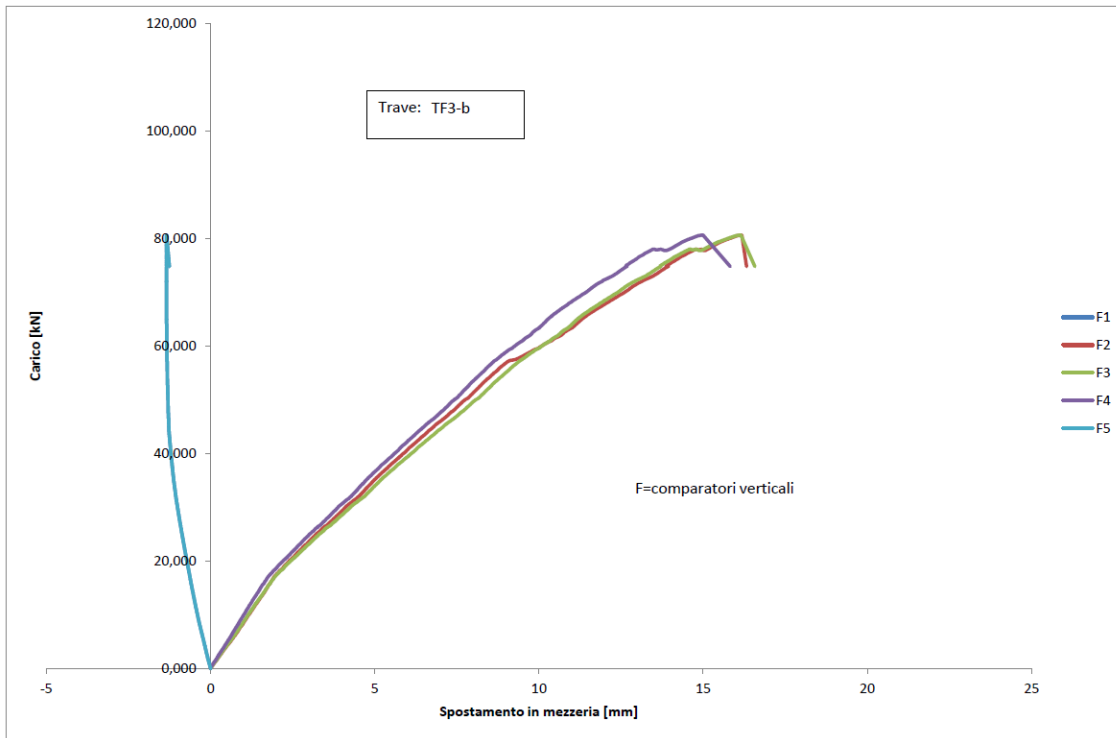






Grafici con i risultati della prova

(Carico di rottura= 80,5 KN)



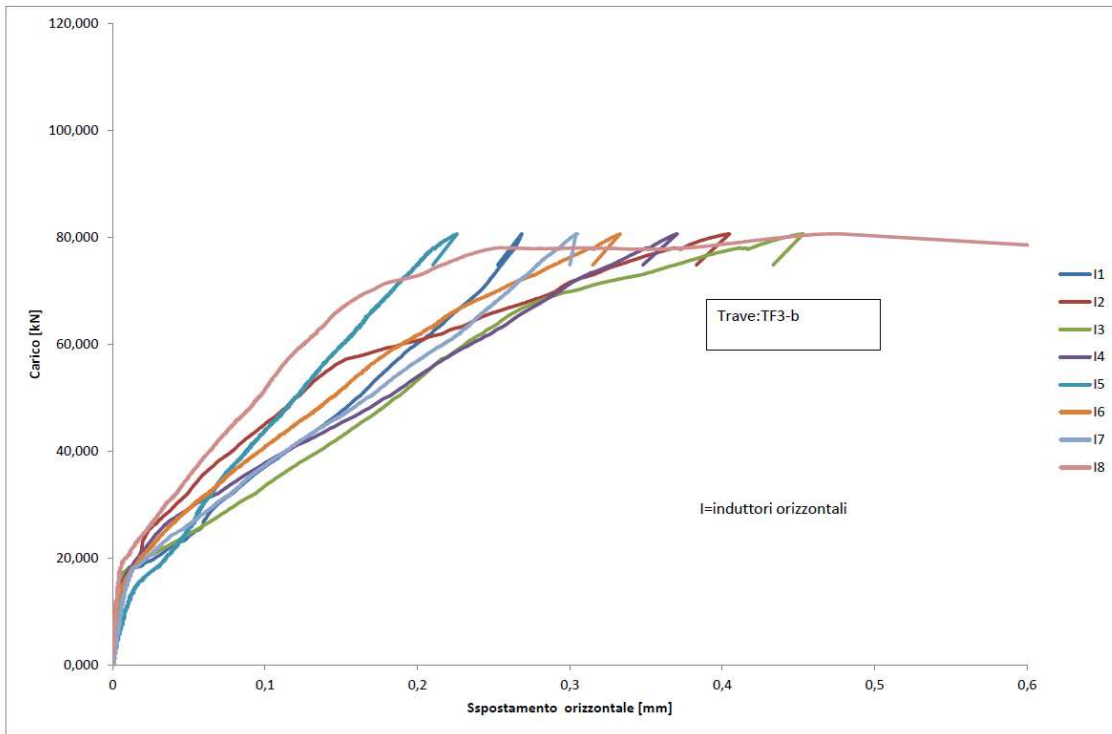


Grafico abbassamenti medi TF3/TF3-b

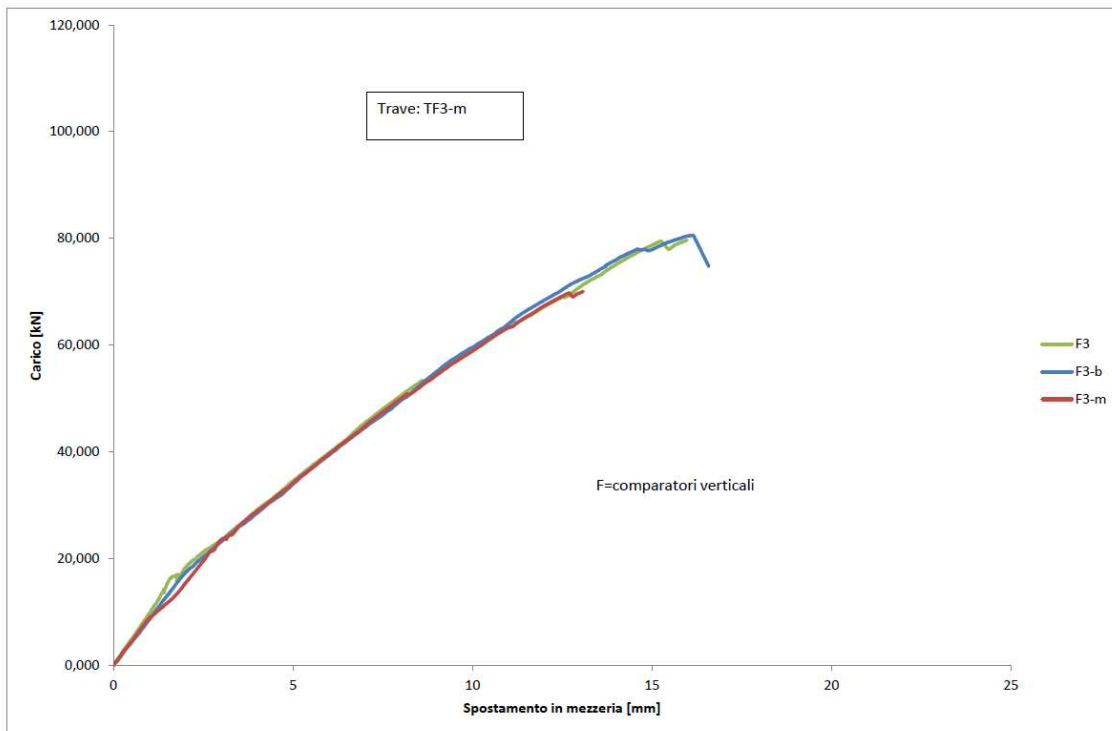
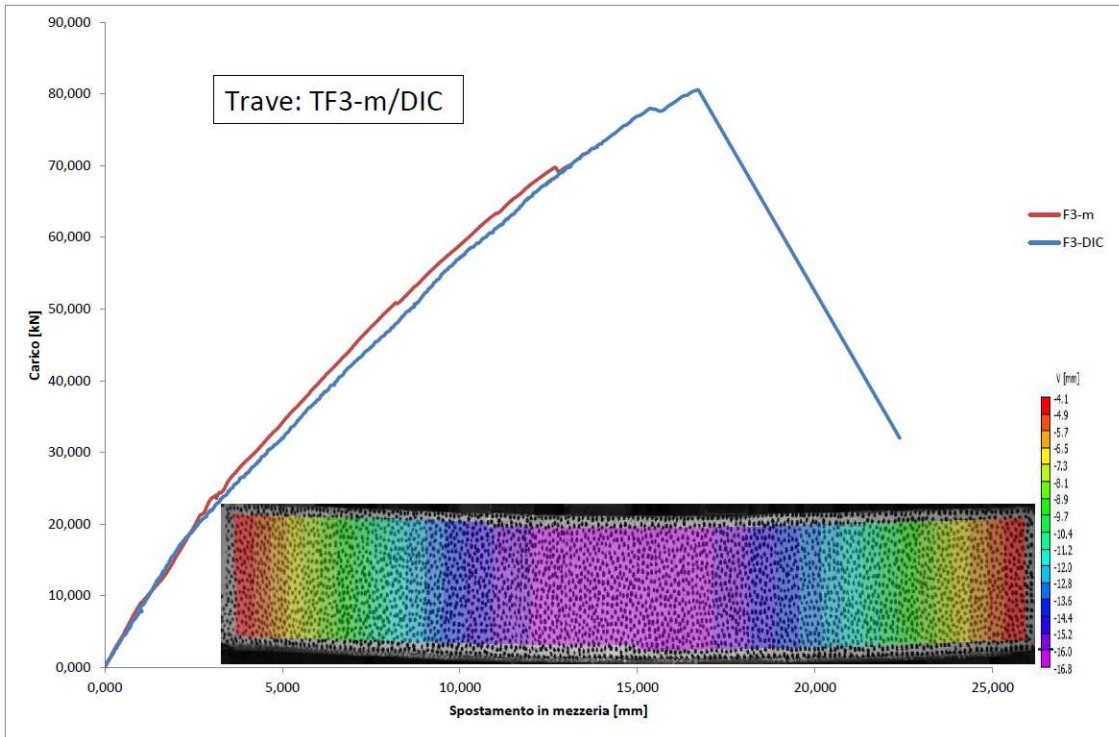
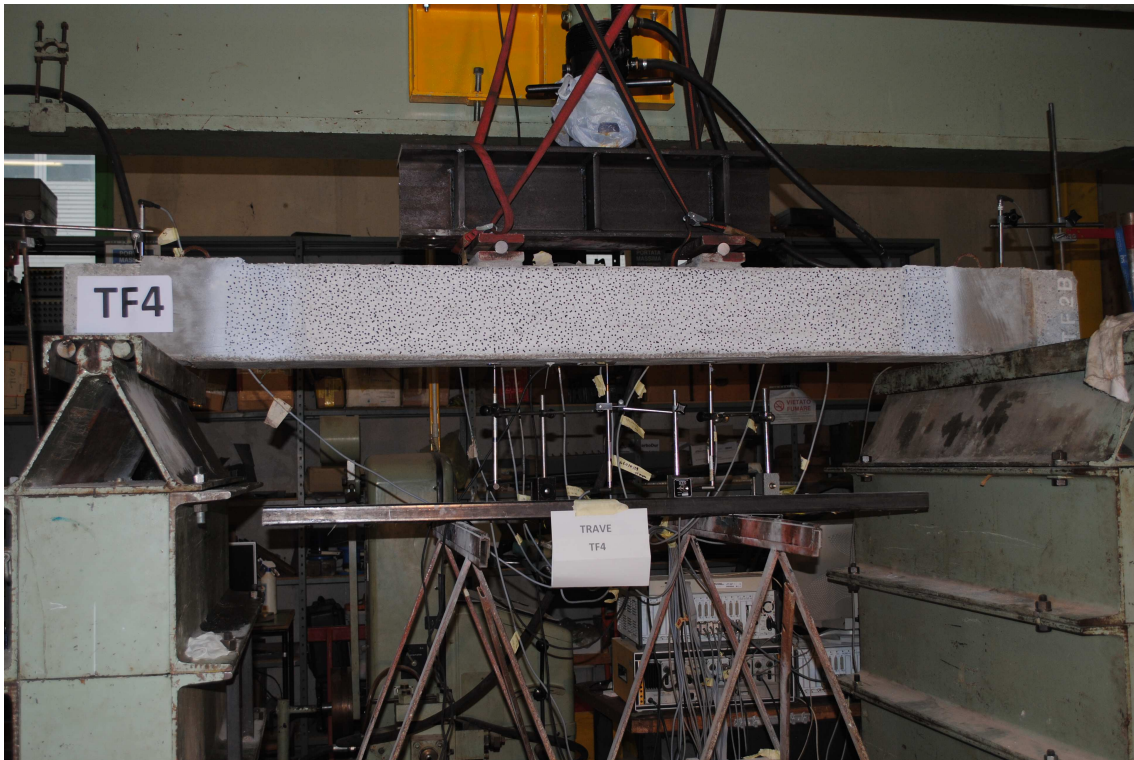


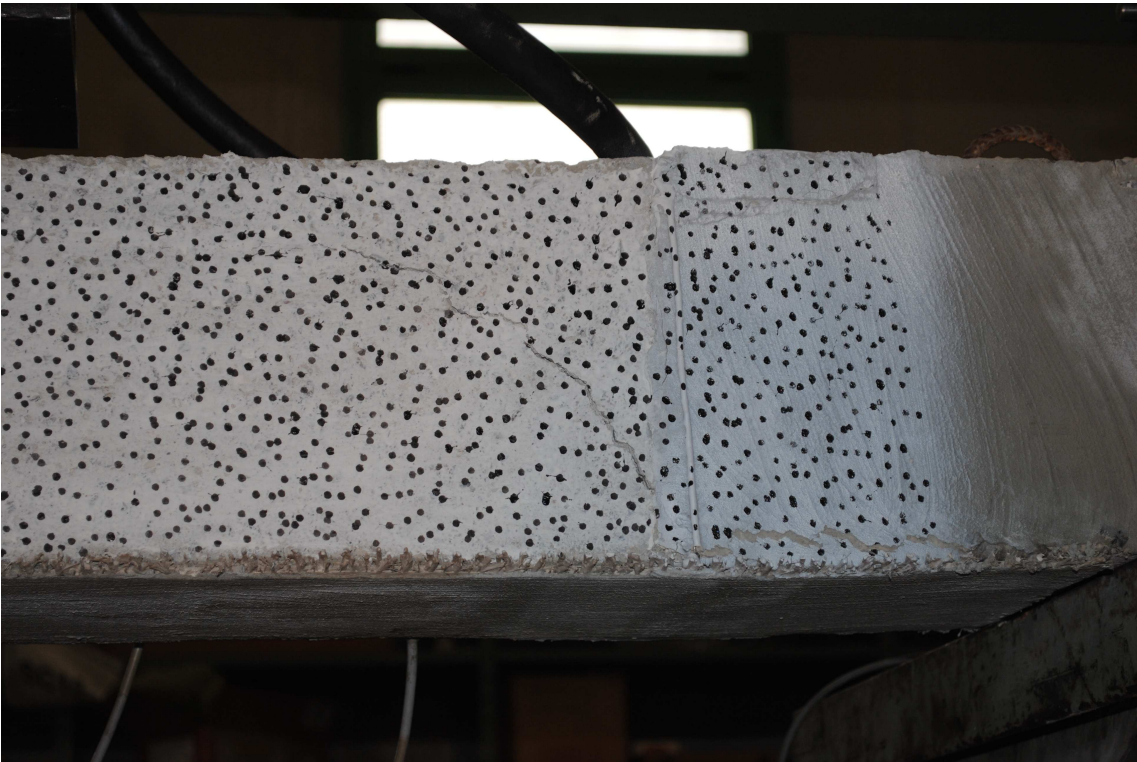
Grafico TF3-m/TF3DIC



TRAVE TF4

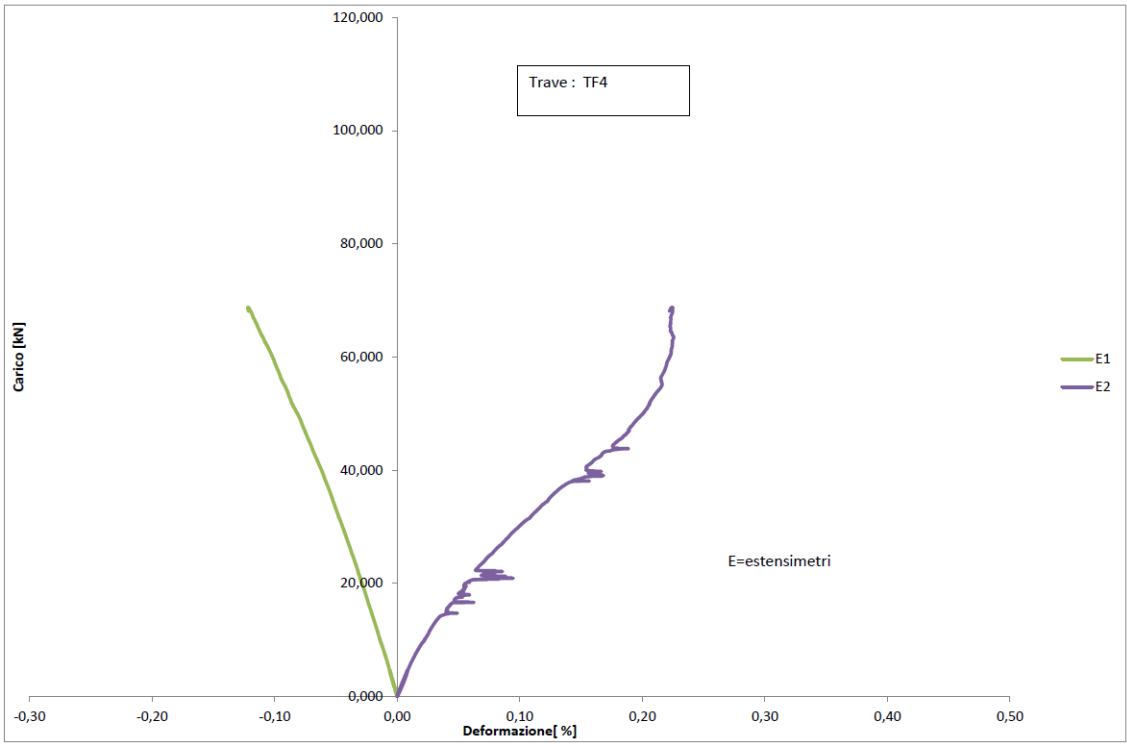
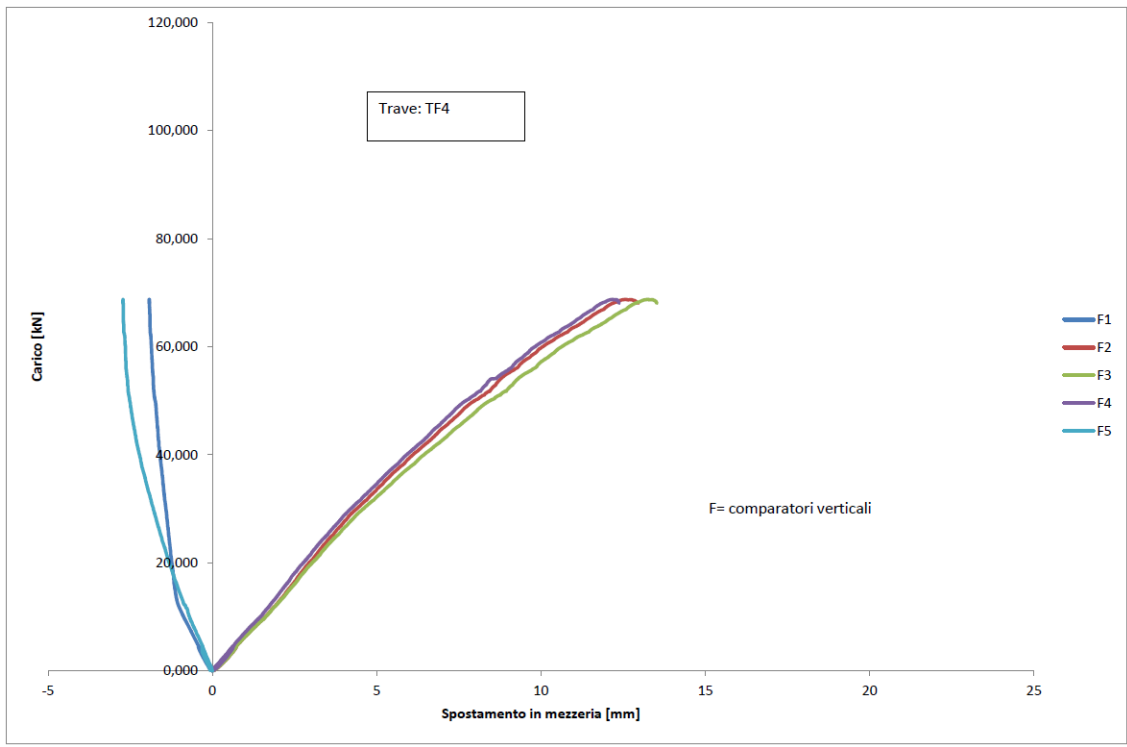
Rinforzata a flessione con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua e con malta cementizia più fasce antidebonding

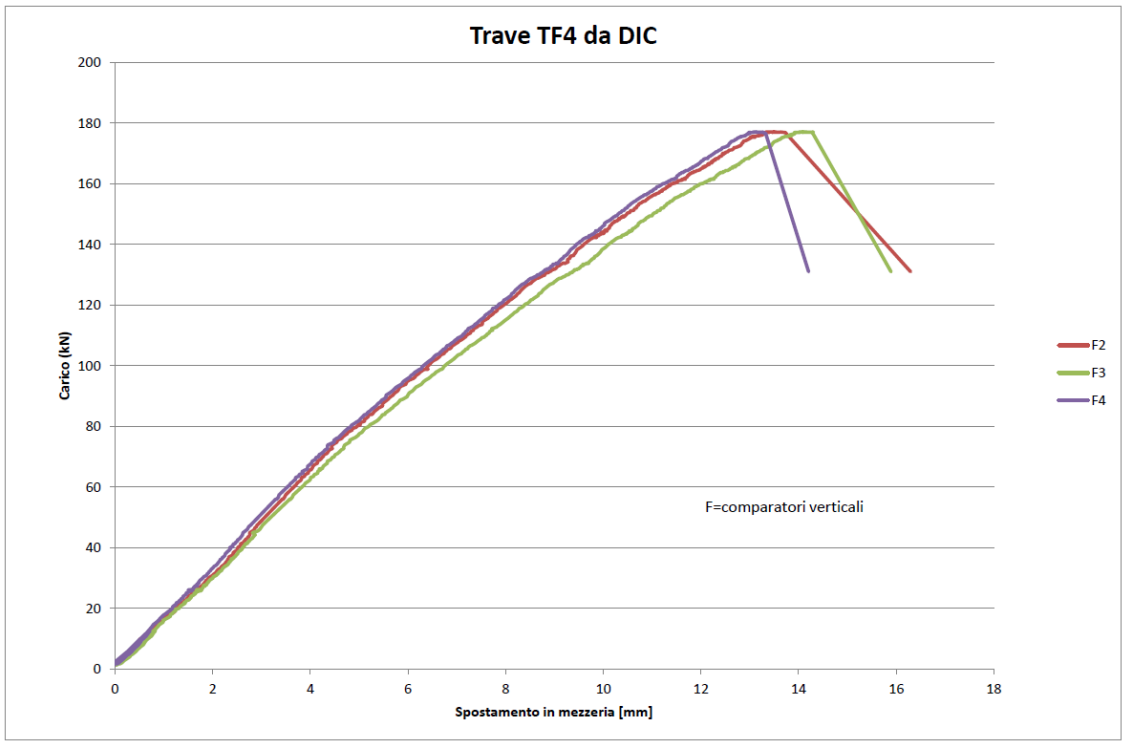
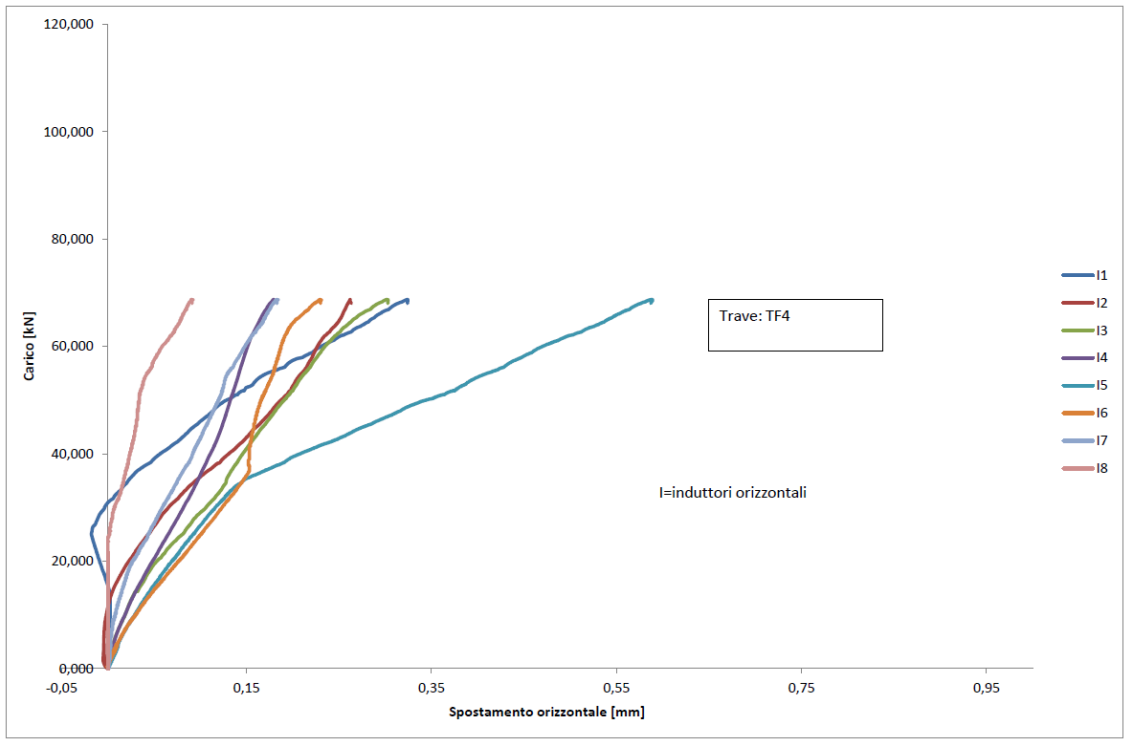






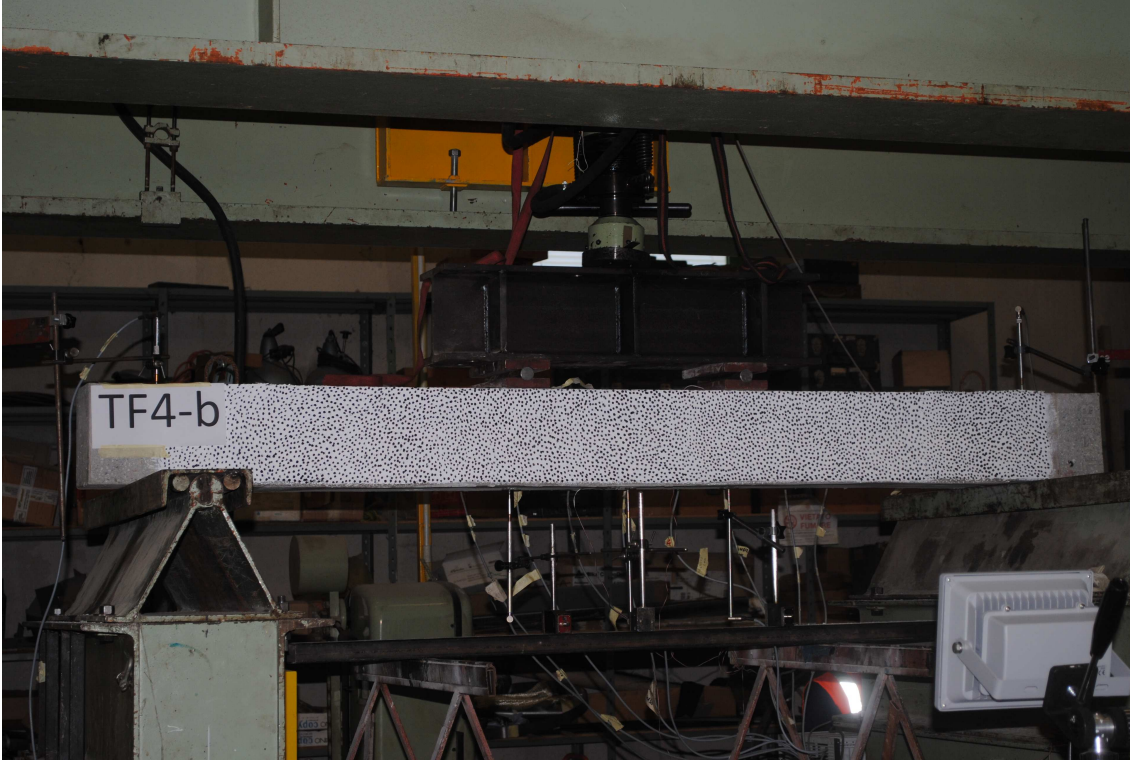
Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 67 KN)

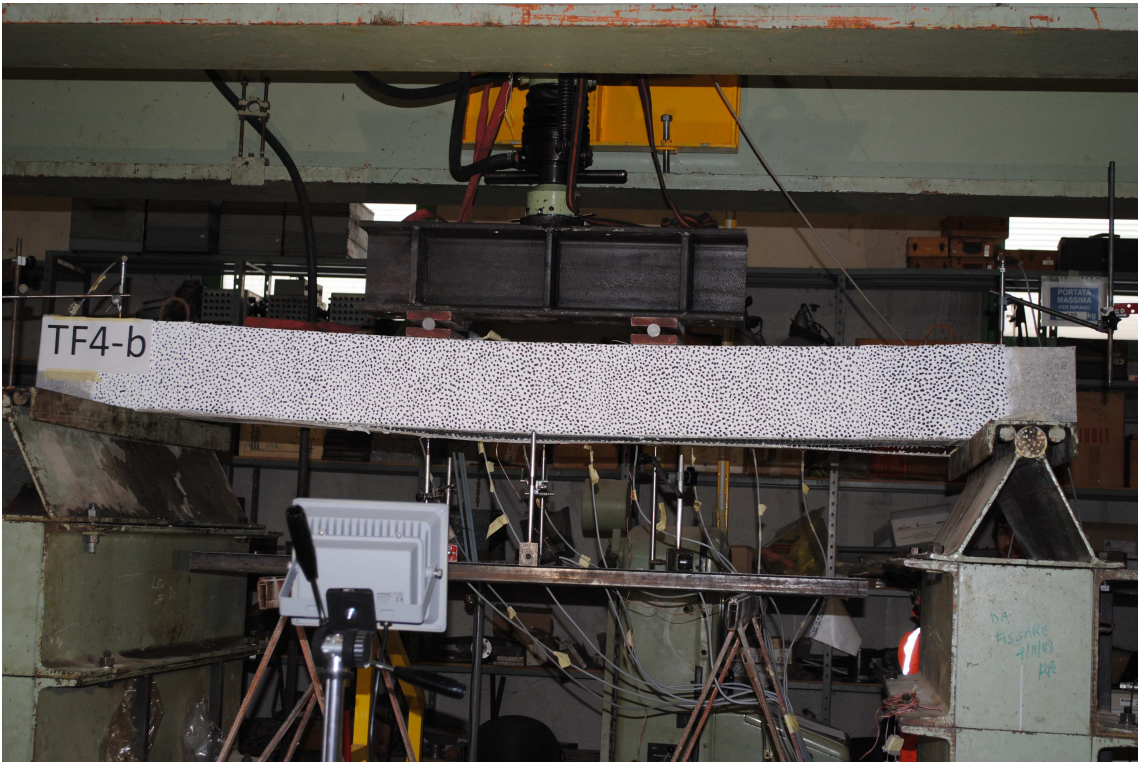




TRAVE TF4-b

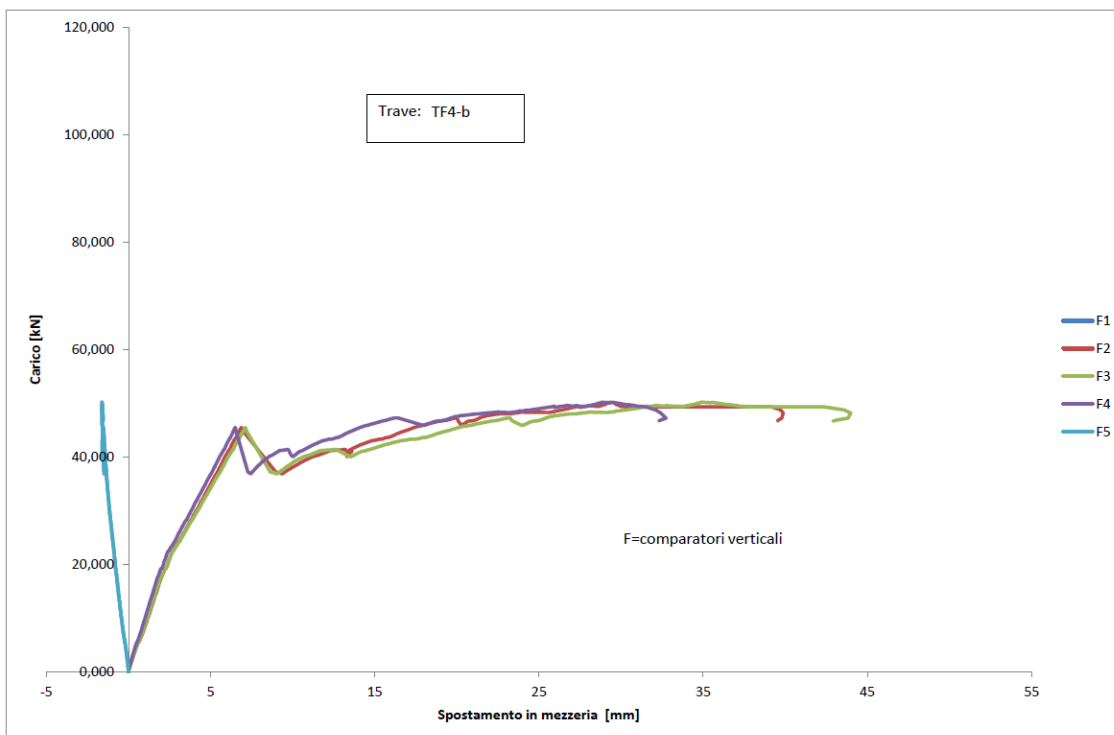
Rinforzata a flessione con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua e con malta cementizia più fasce antidebonding

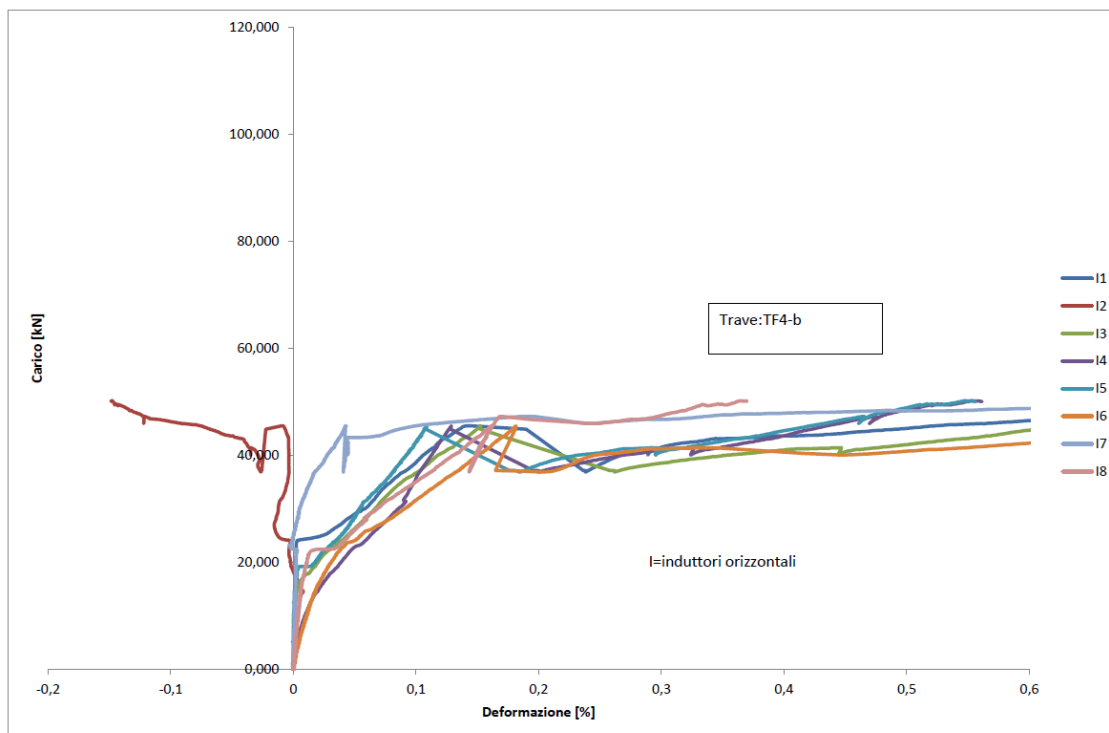
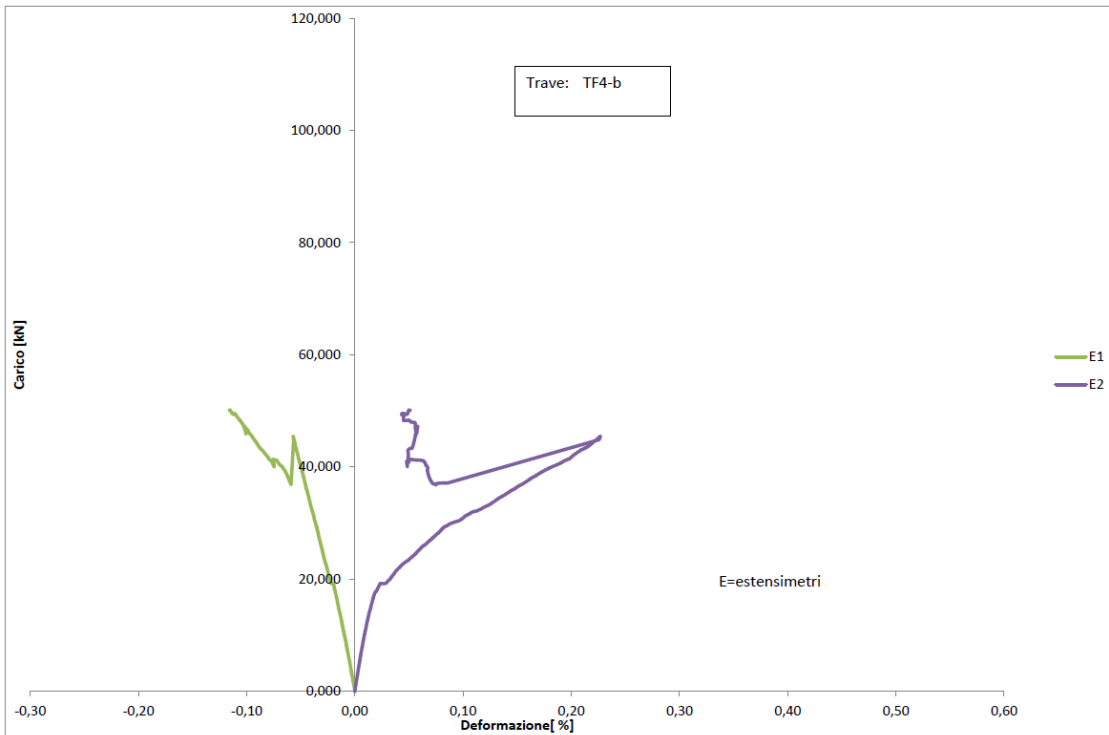






Grafici con i risultati delle prove
(Carico di rottura= 50,16 KN)





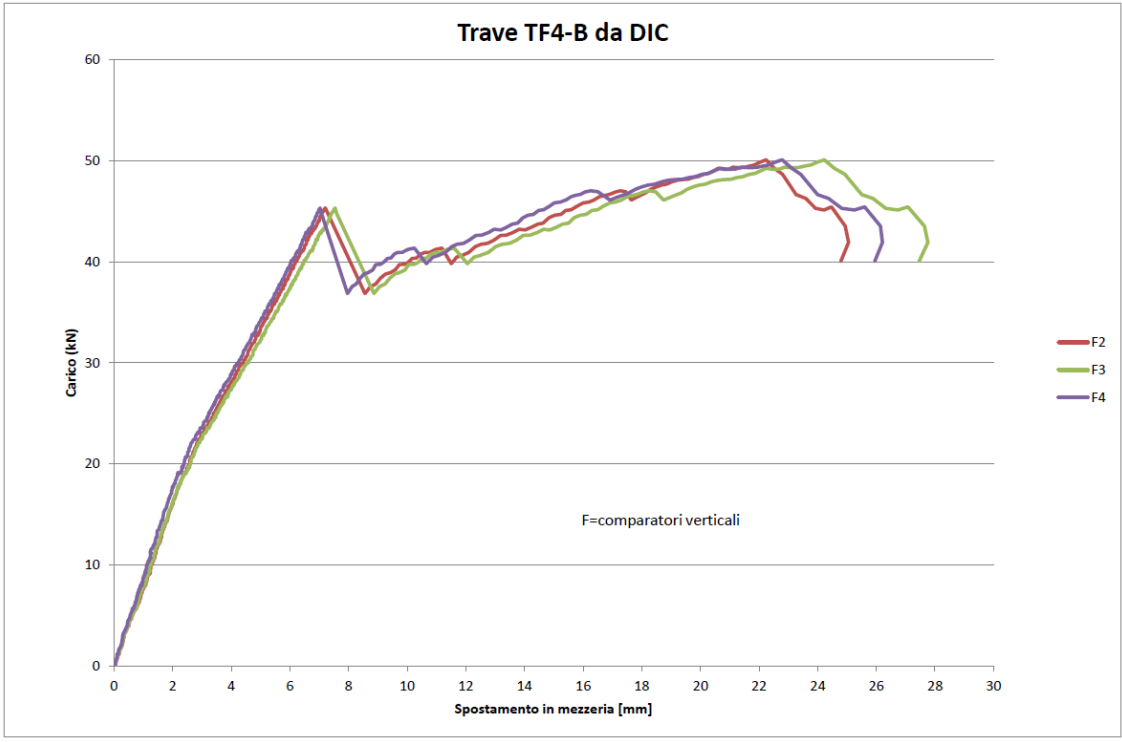


Grafico TF4-m

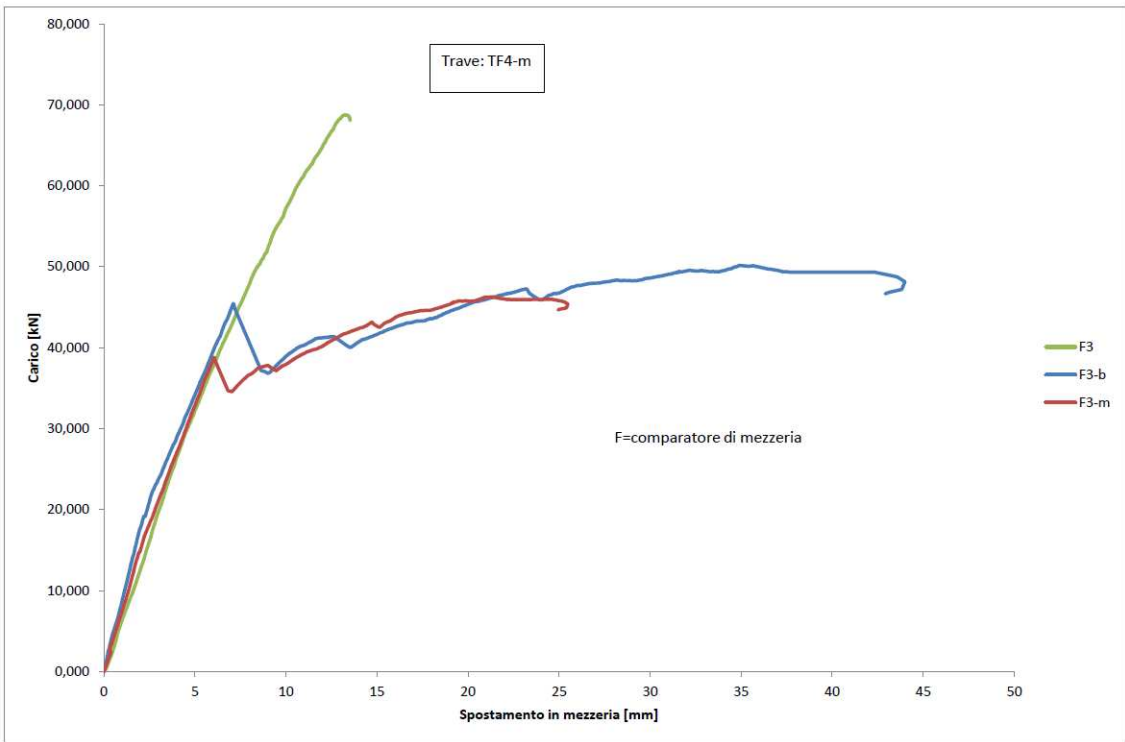
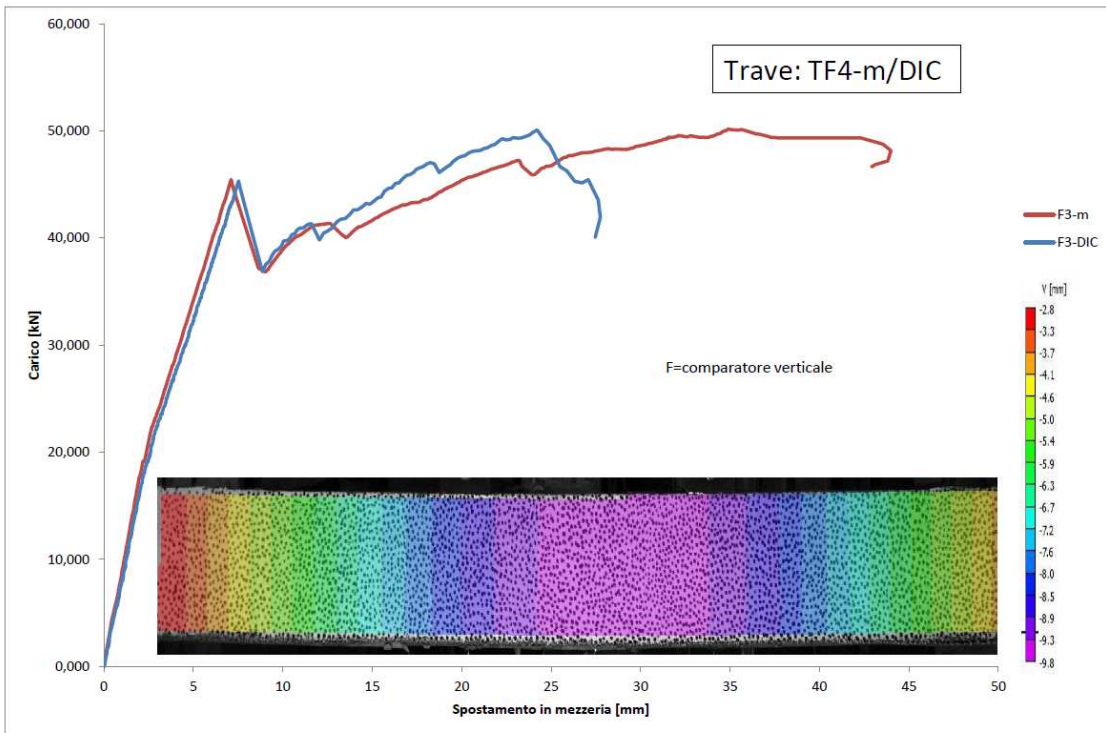


Grafico TF4-m/DIC

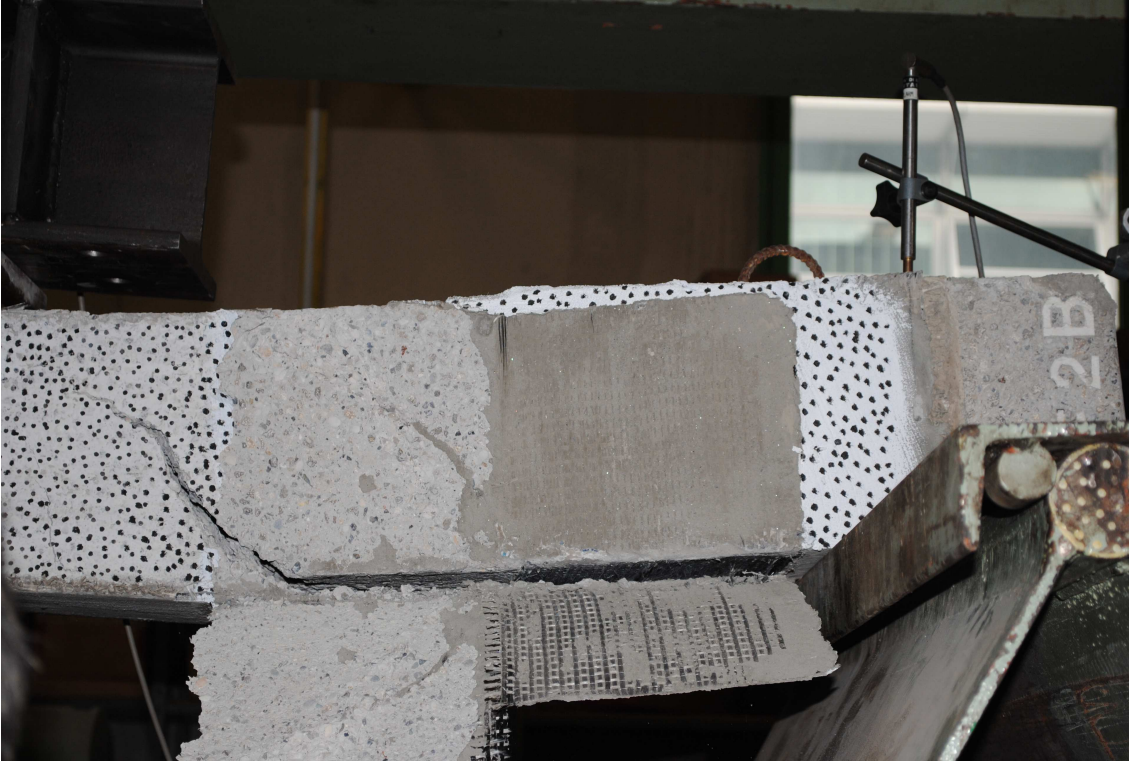


TRAVE TF4-ter

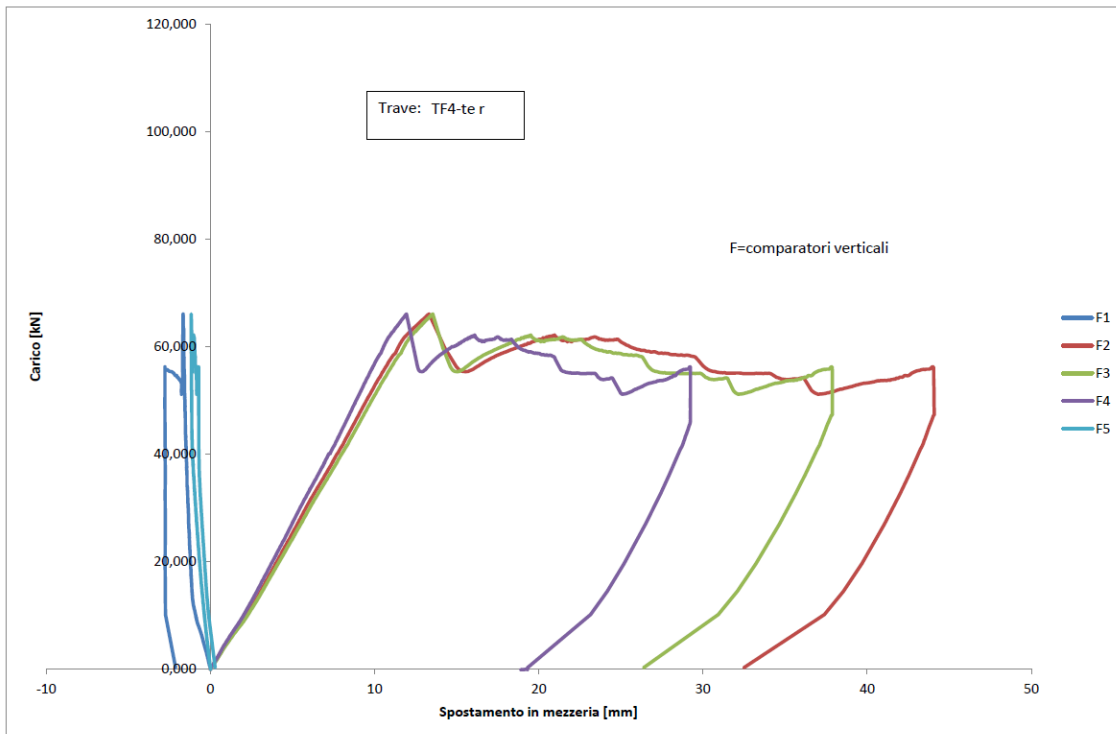
Nuovo rinforzo della trave TF4-b con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua più malta cementizia.

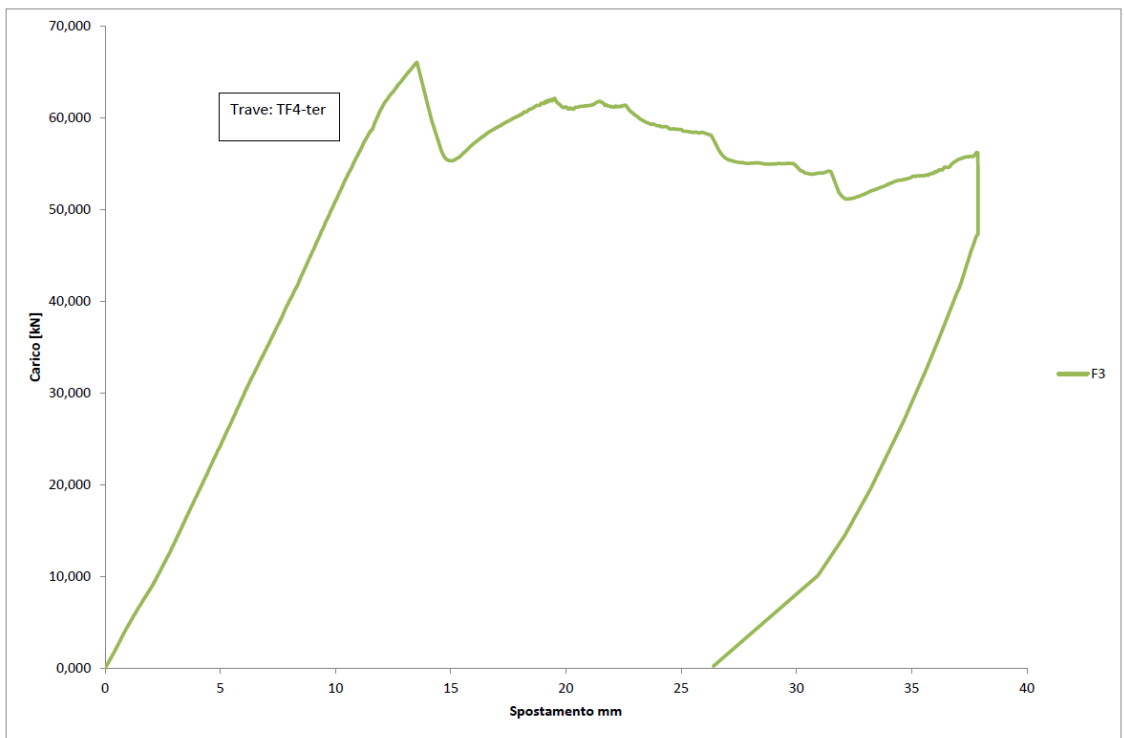
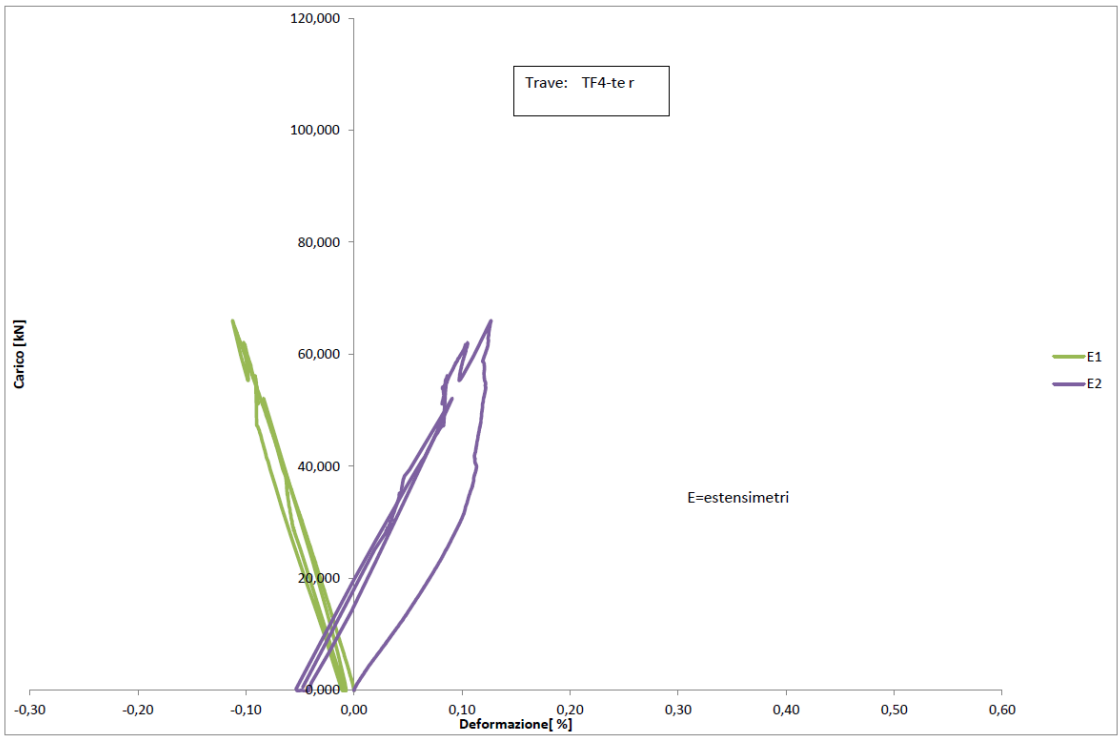


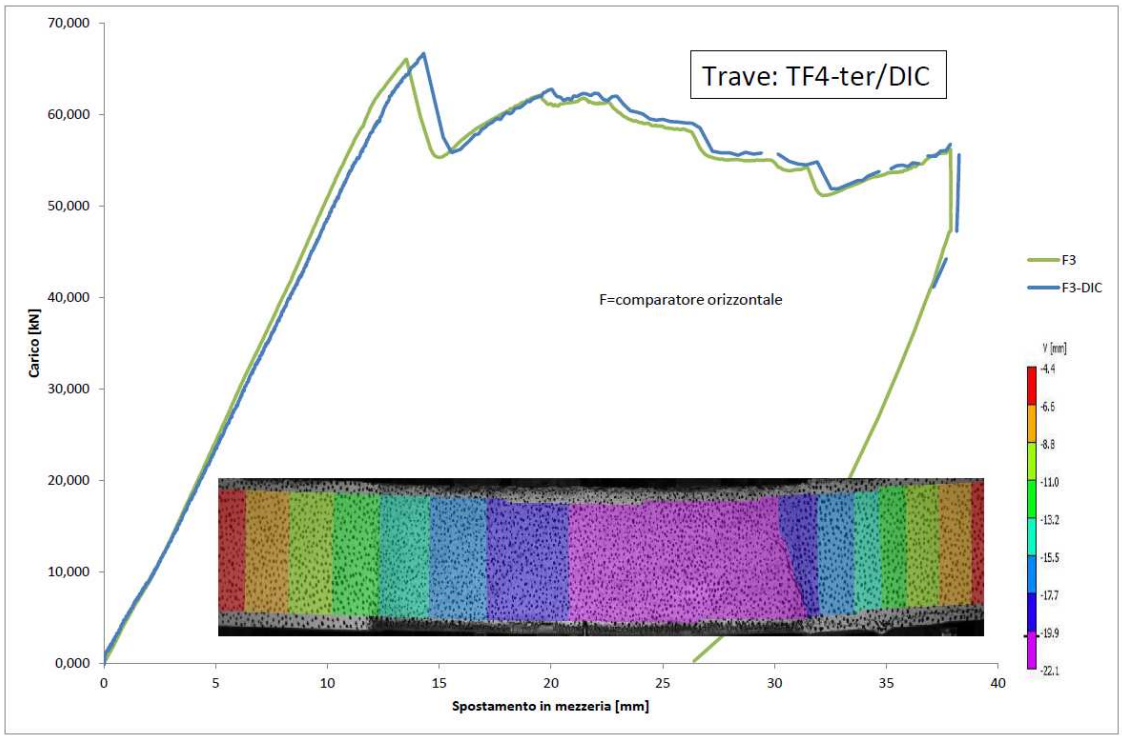




Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 67 KN)







TRAVE TF5

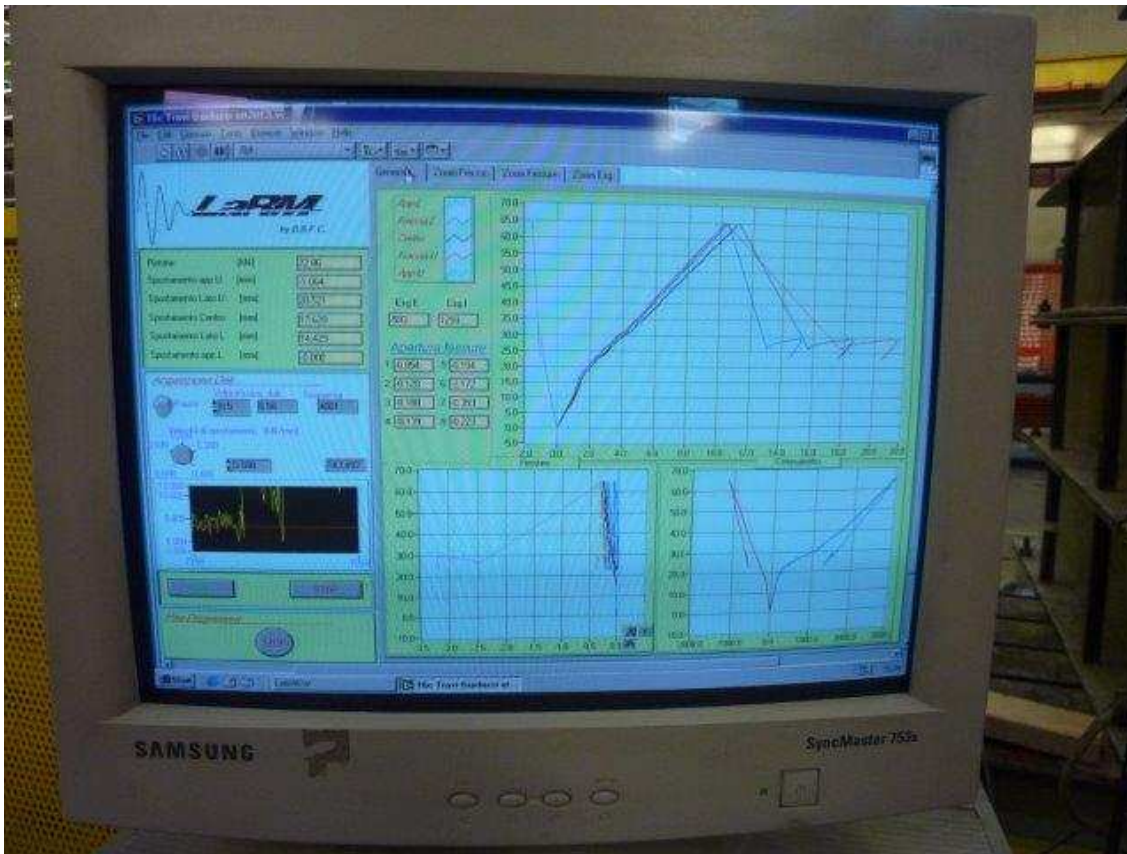
Rinforzata a flessione con rinforzo all'intradosso di fibre al carbonio più IPN (resine a base acqua) e con malta cementizia.



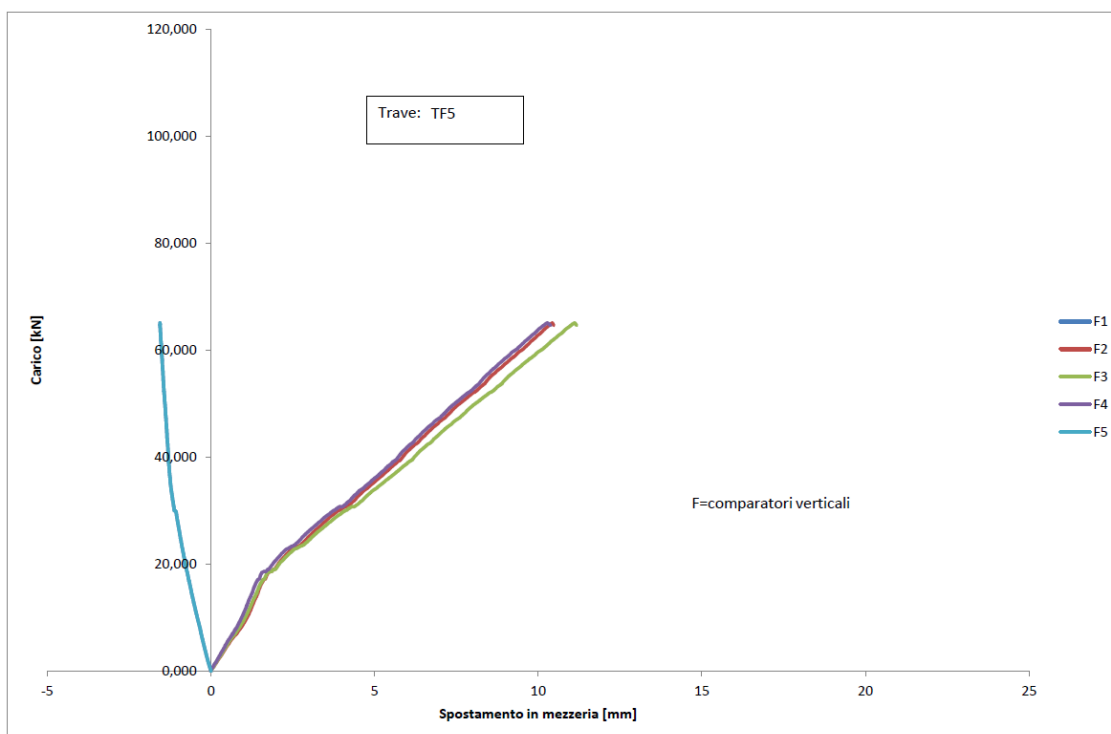


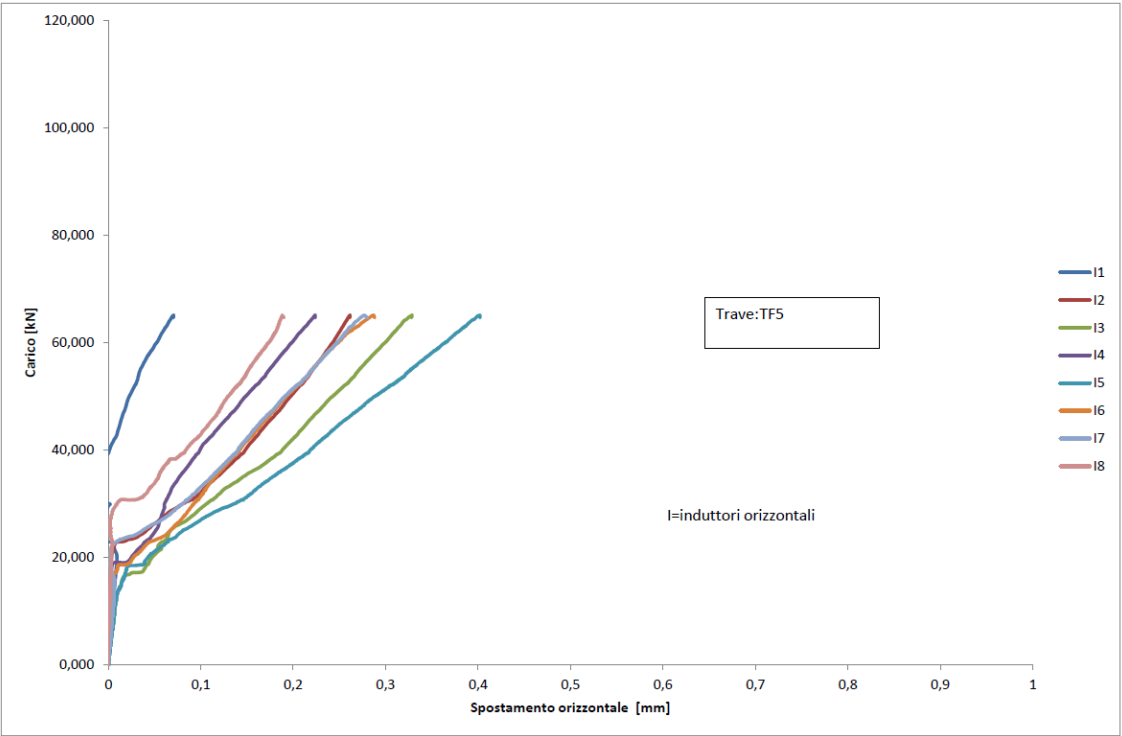
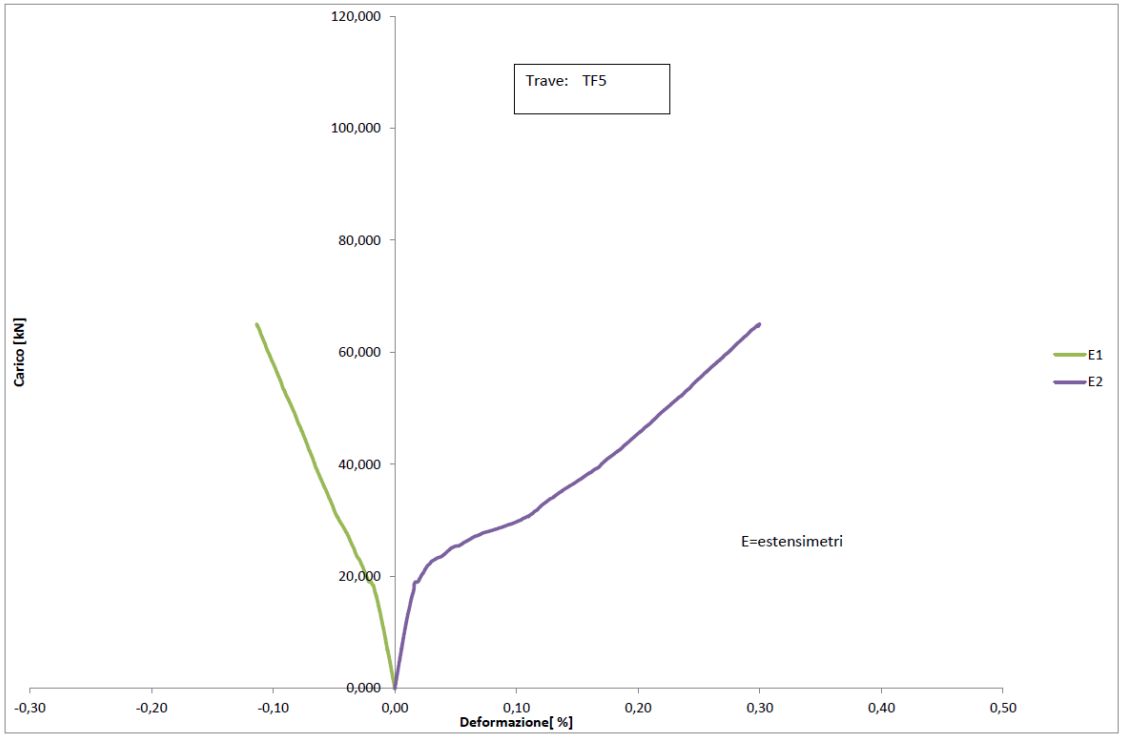


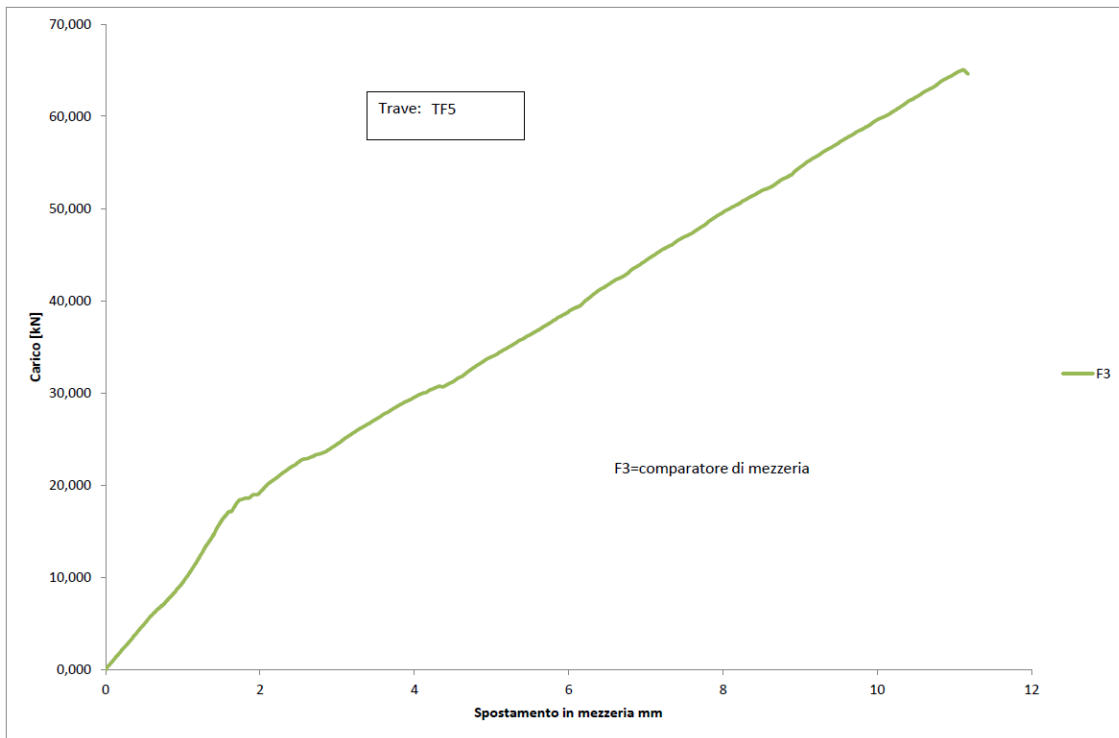




Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 65 kN)

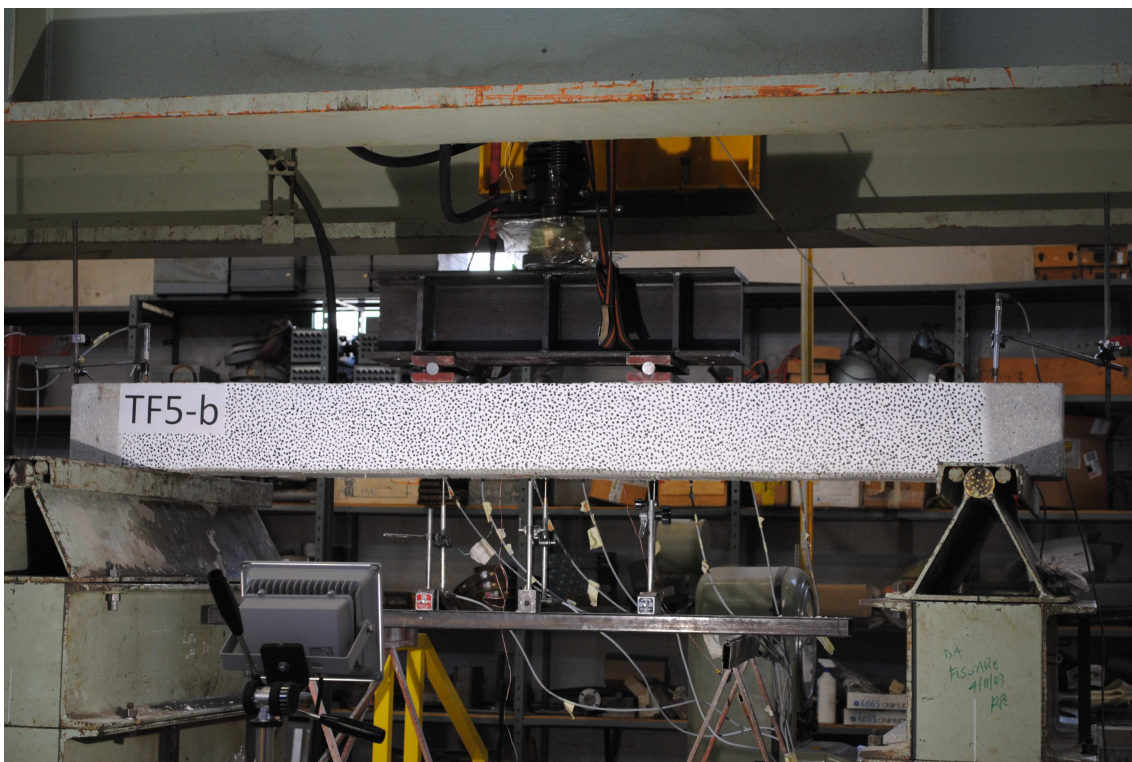




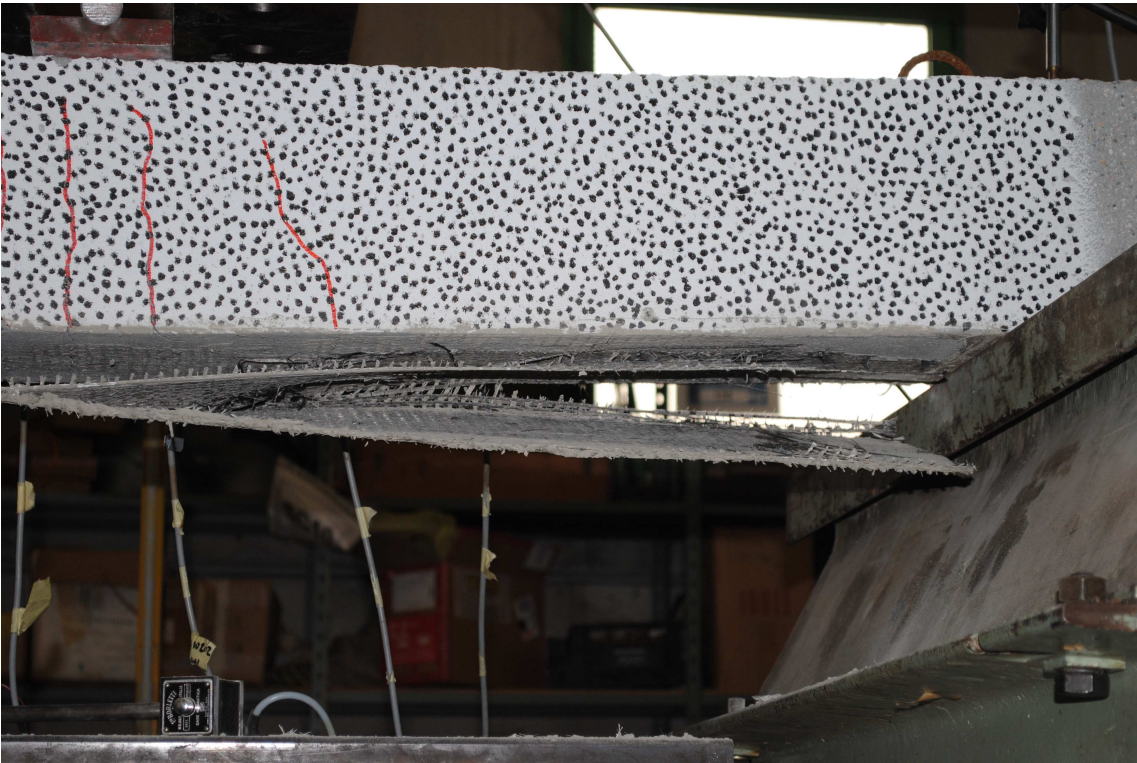


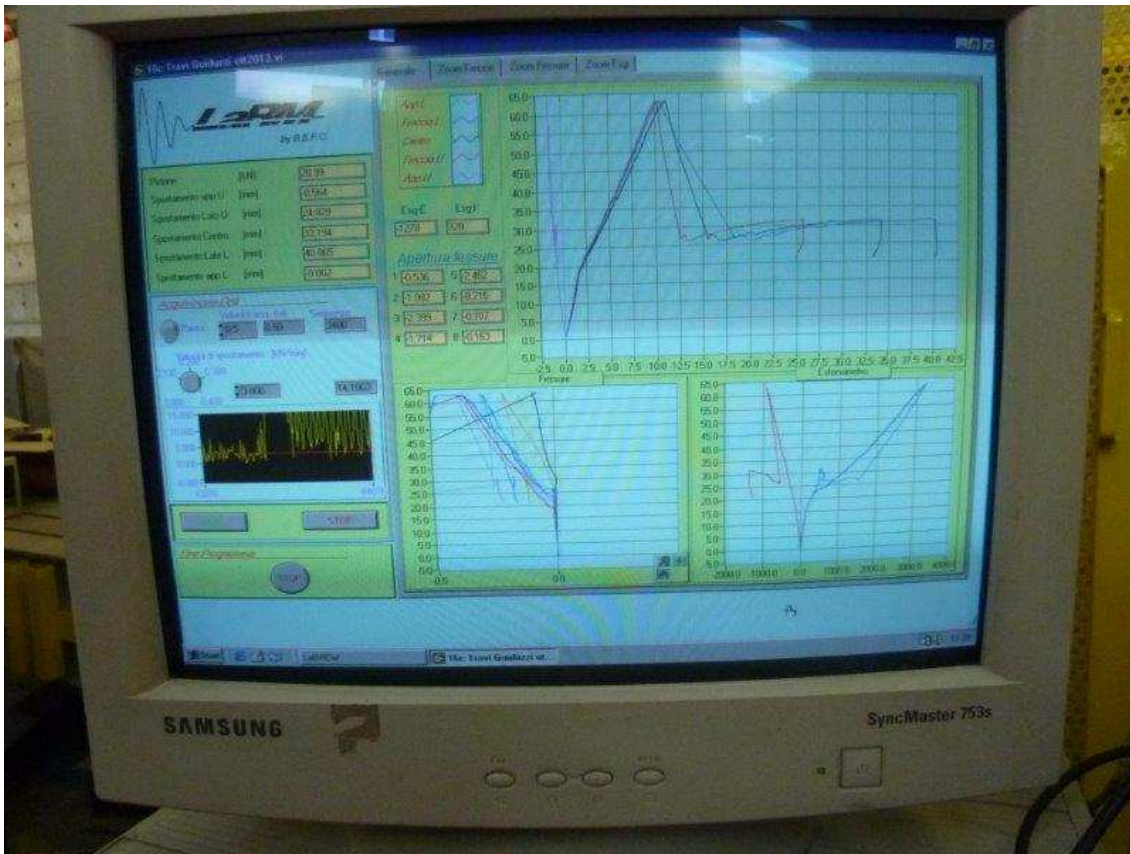
TRAVE TF5-b

Rinforzata a flessione con fibre di carbonio e sola malta cementizia.

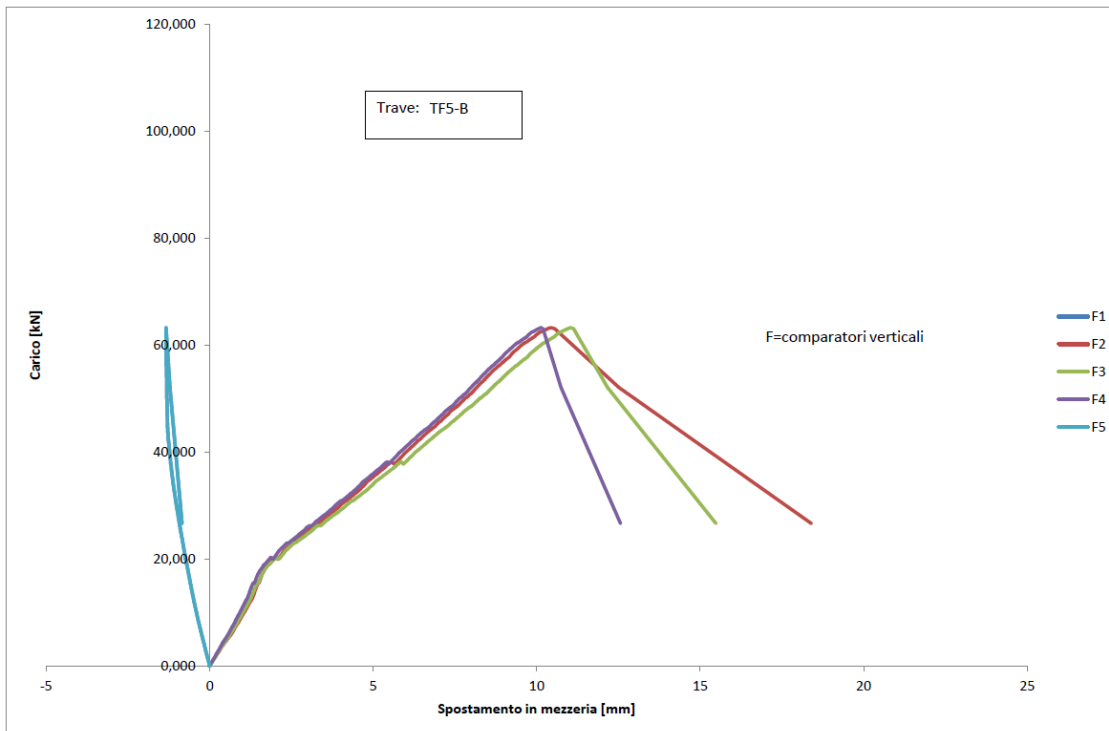








Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 64 KN)



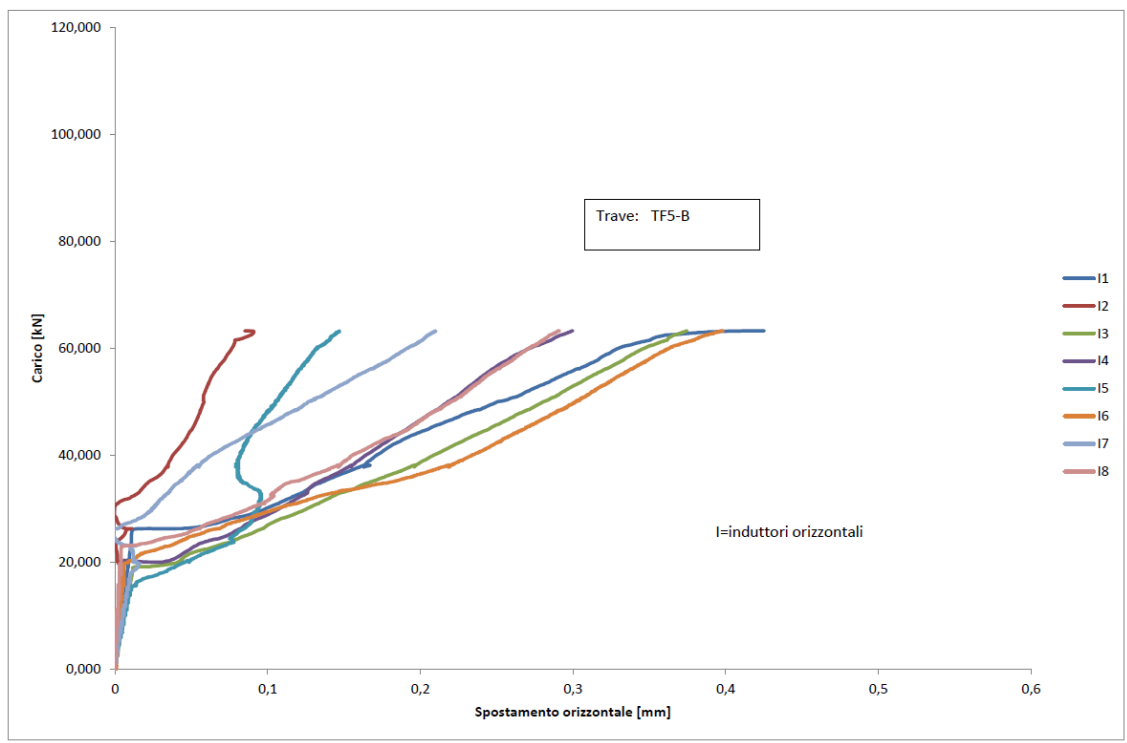
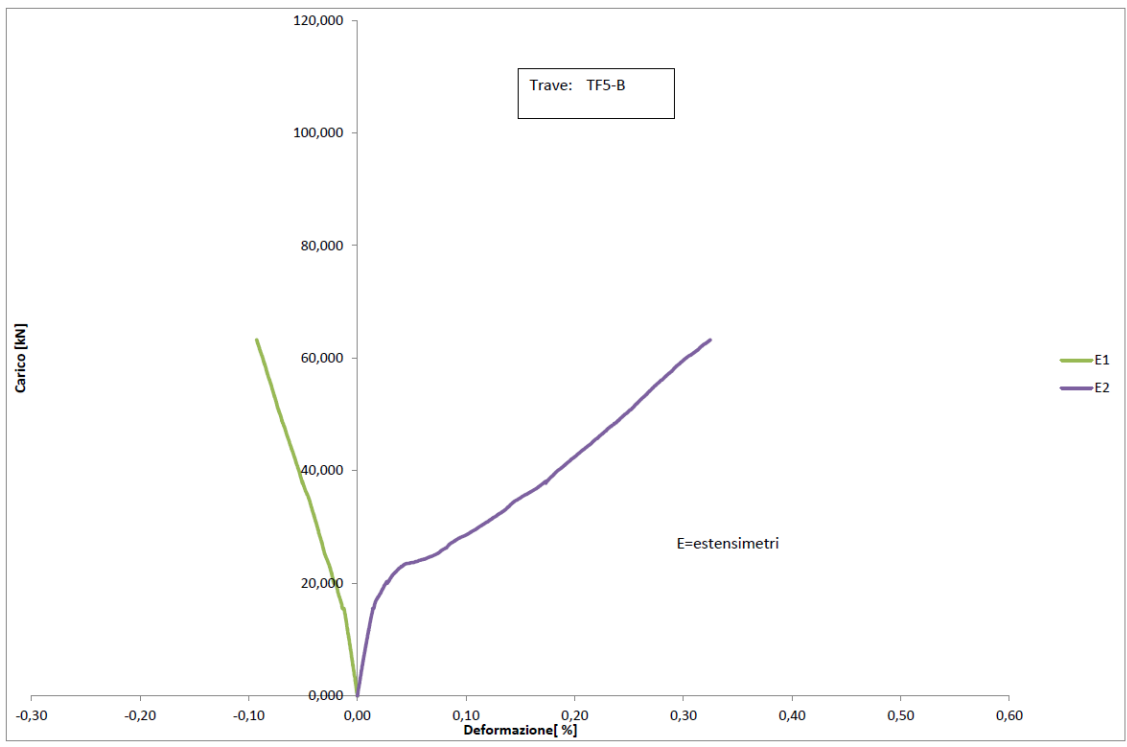
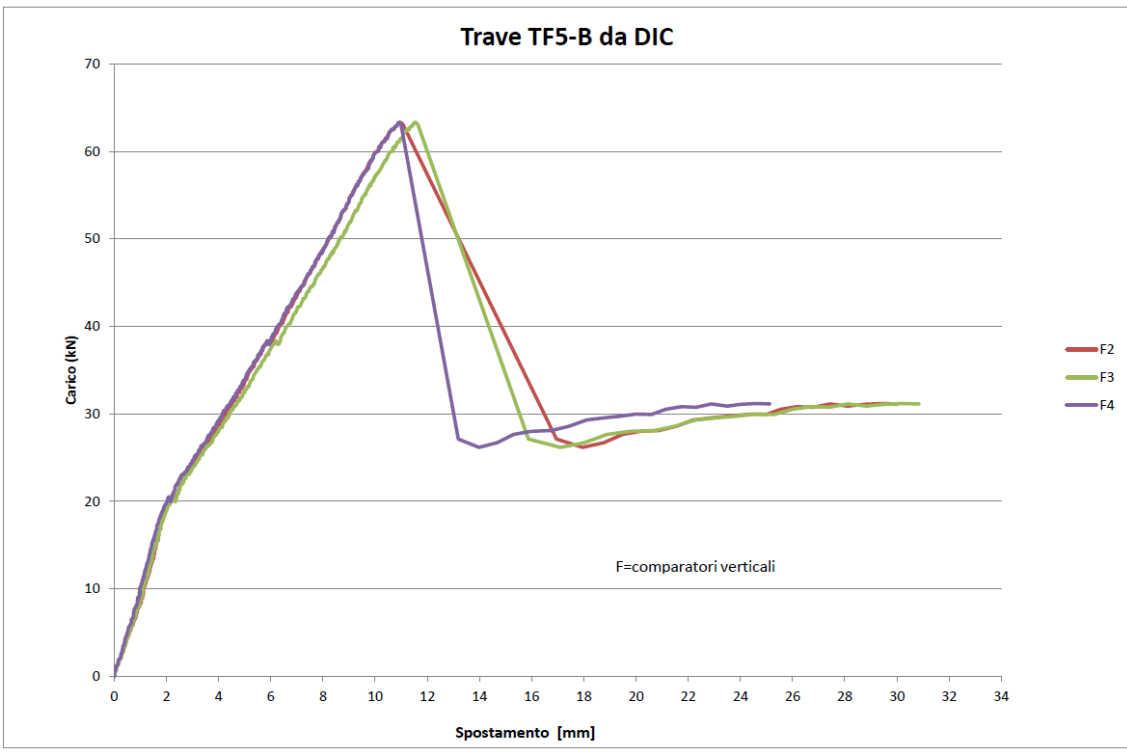
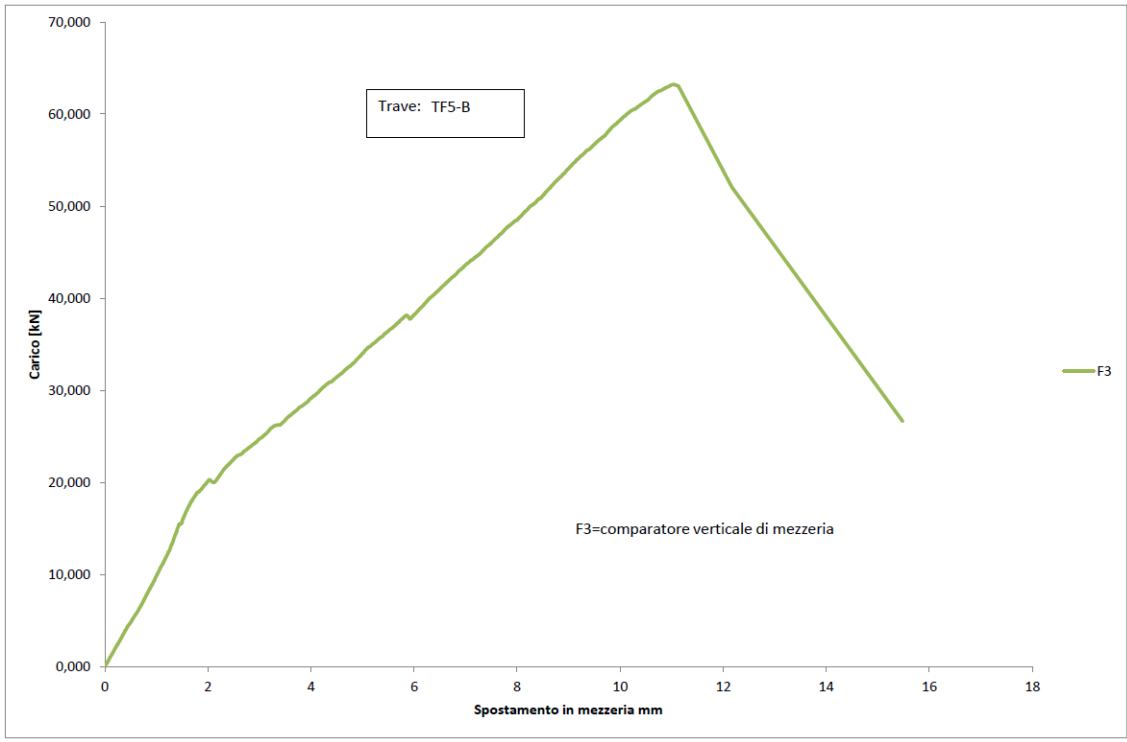
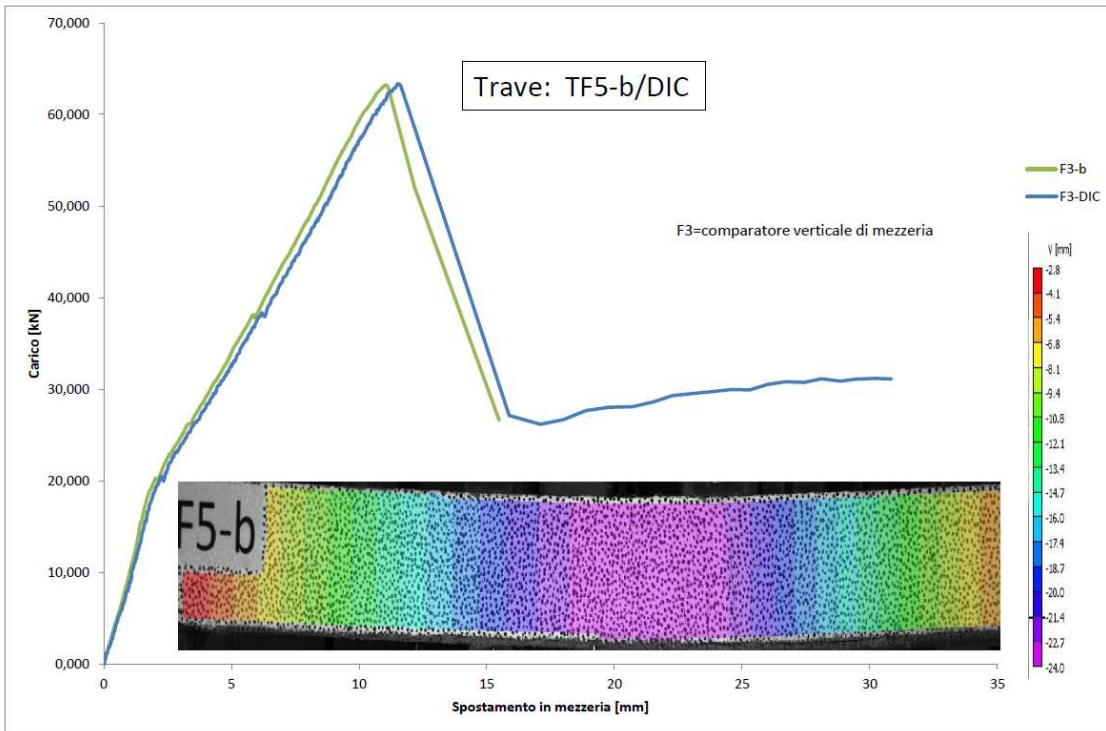


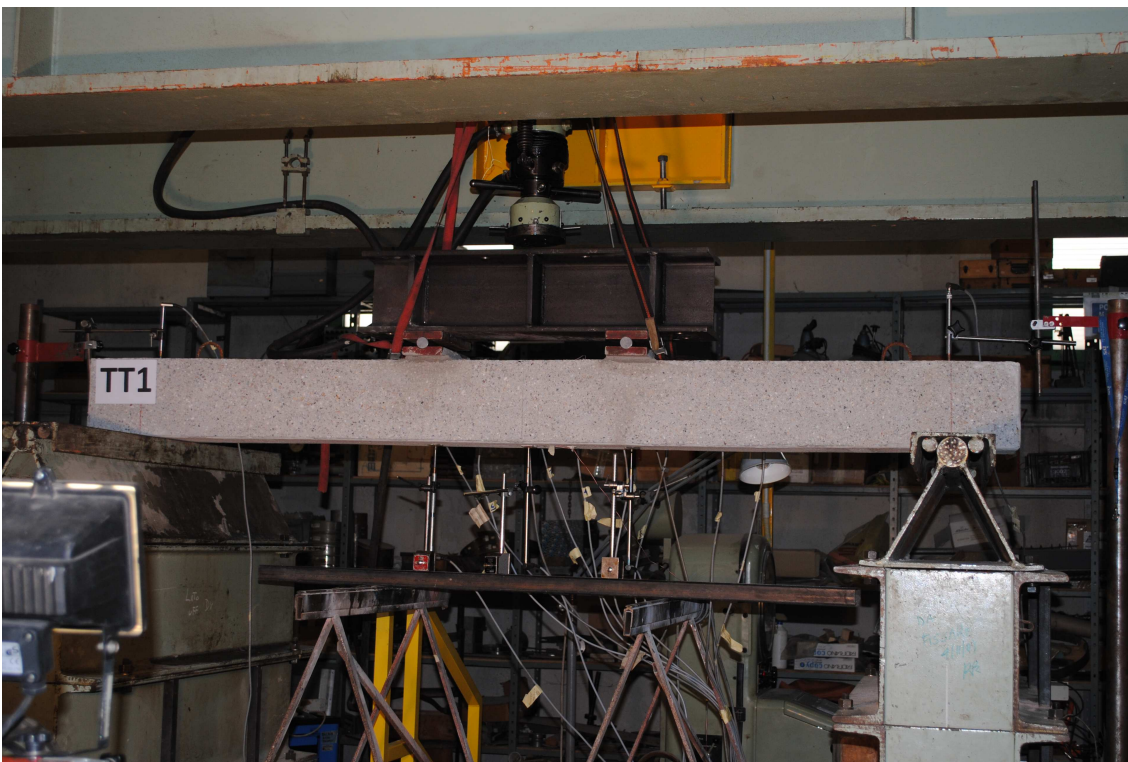
Grafico TF5-b-m





TRAVE TT1

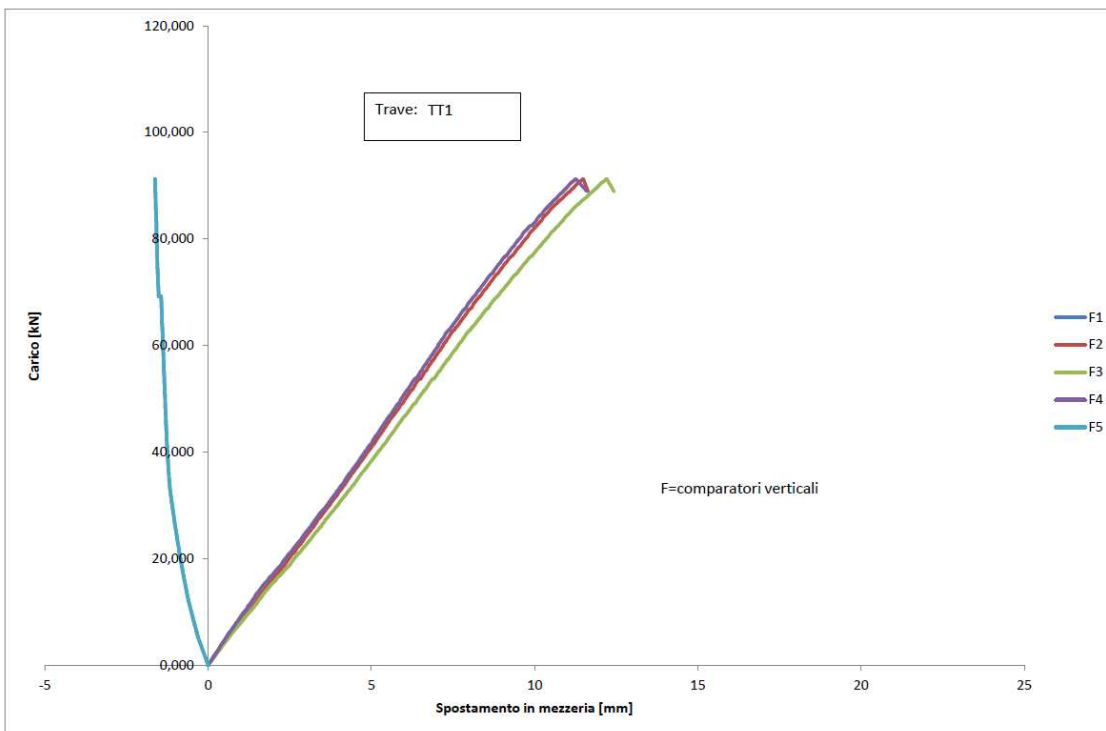
Armata a taglio senza rinforzo.

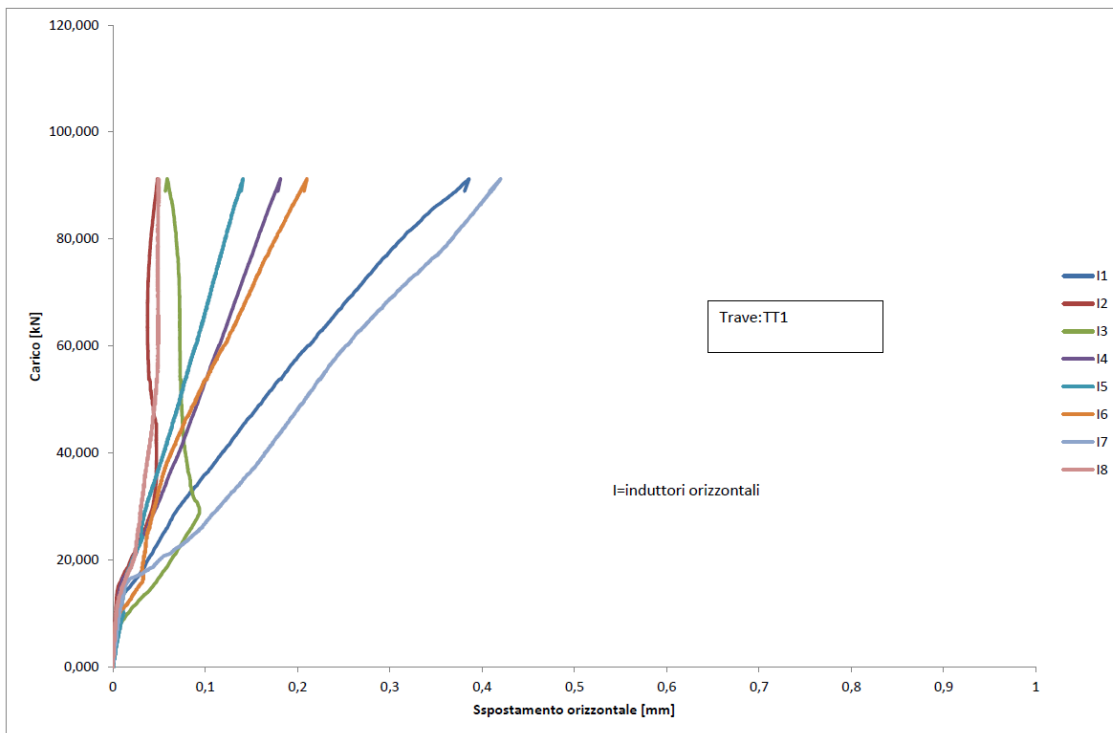
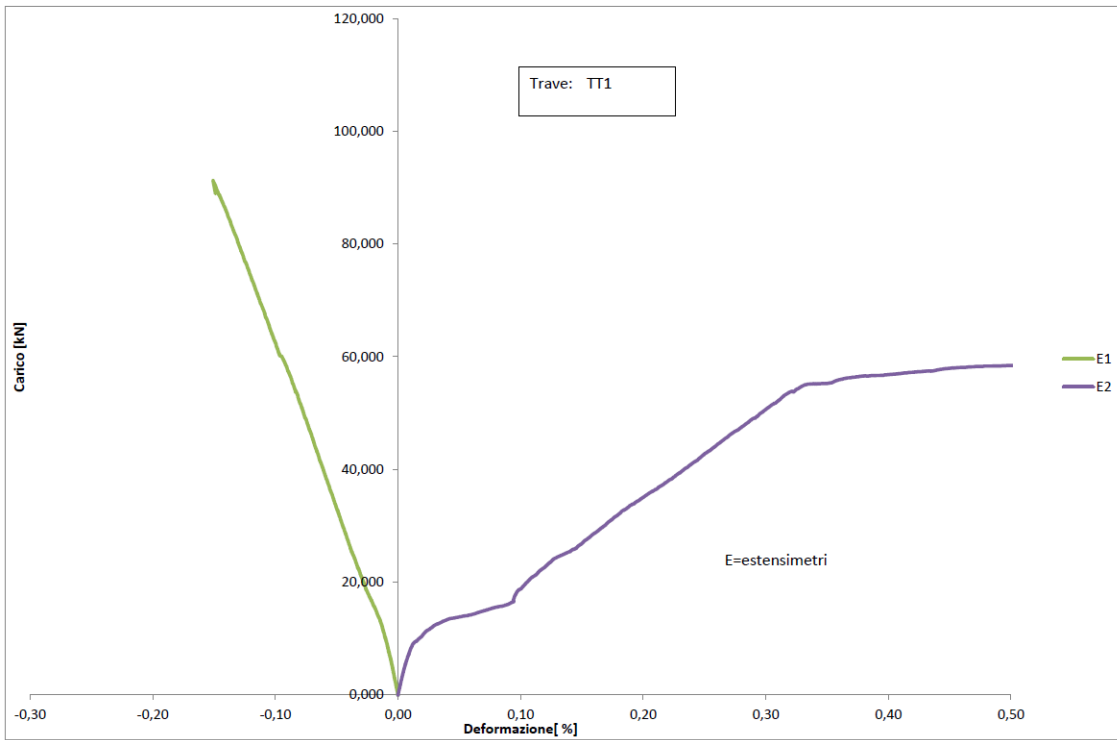


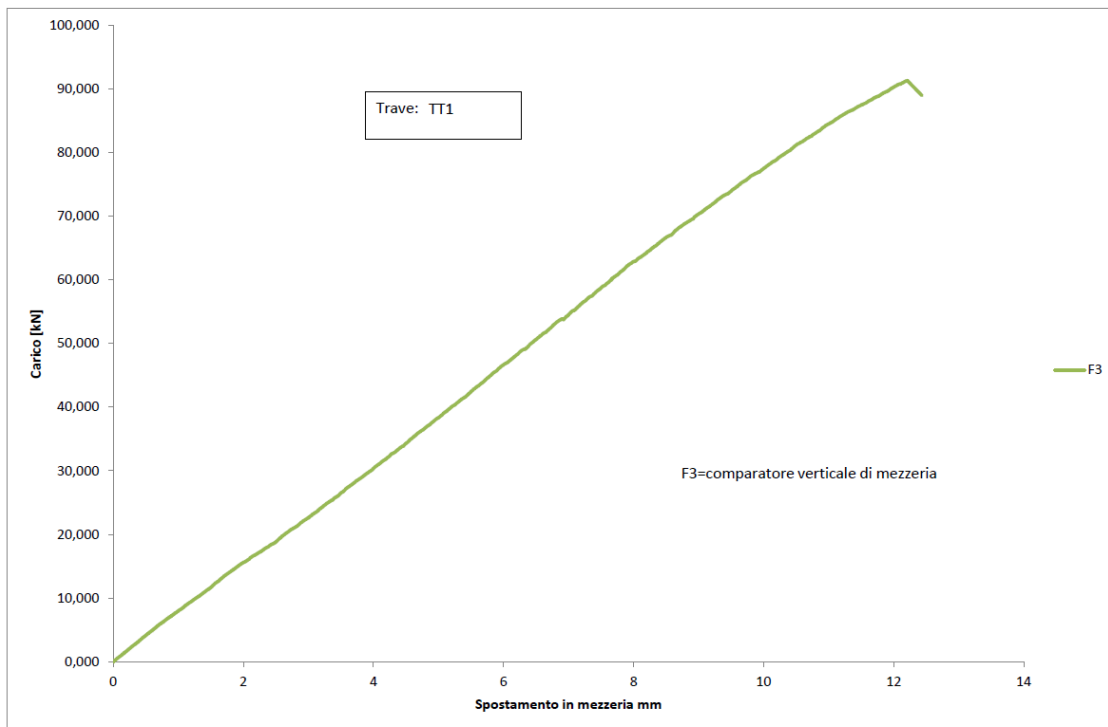




Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 90 KN)



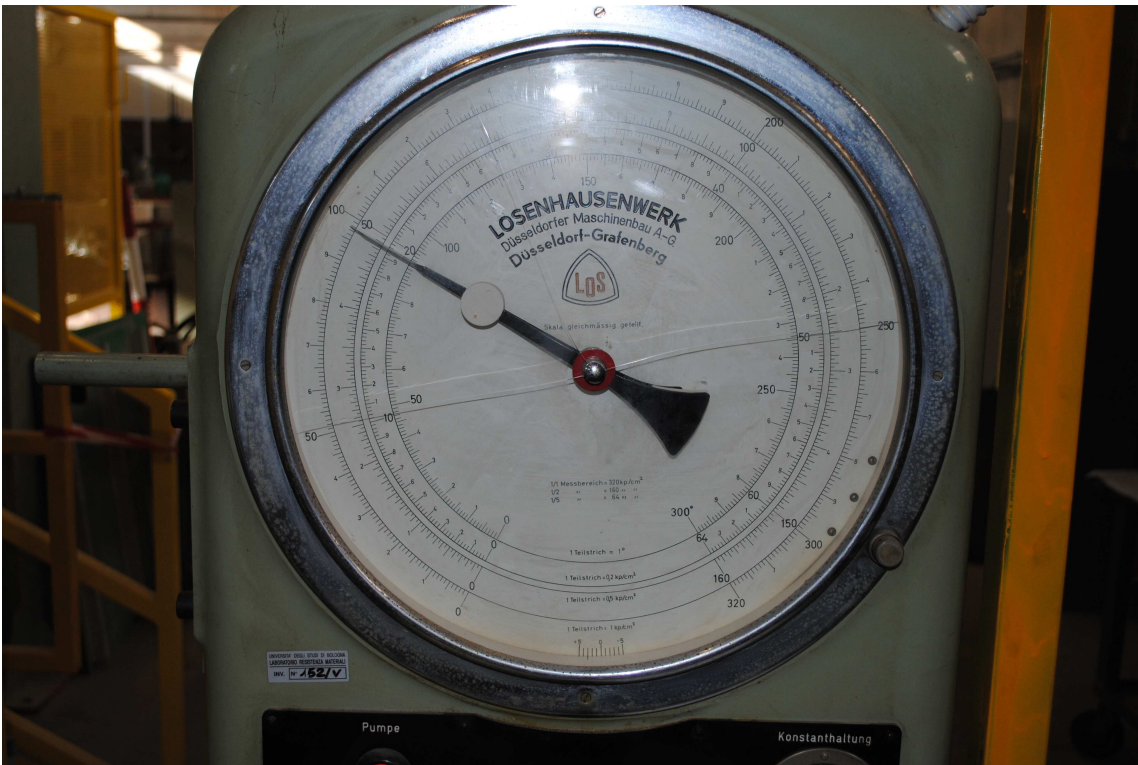


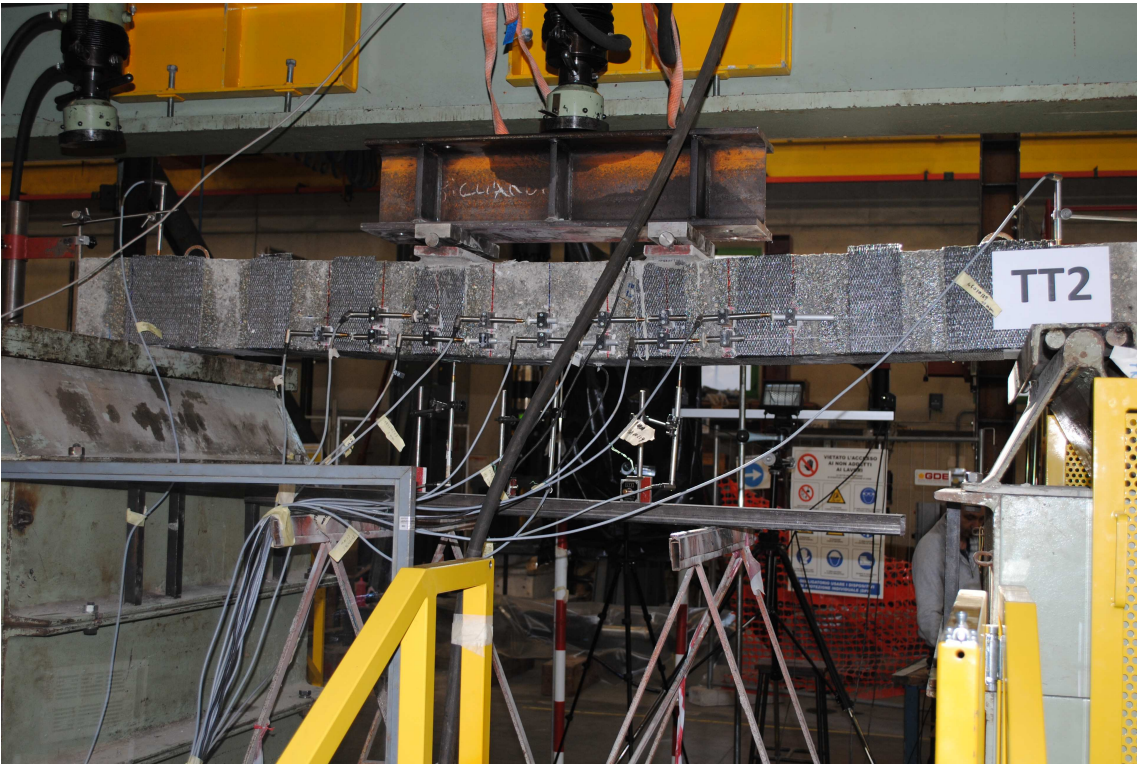


TRAVE TT2

Rinforzata a taglio con fibra di carbonio e resine epossidiche.

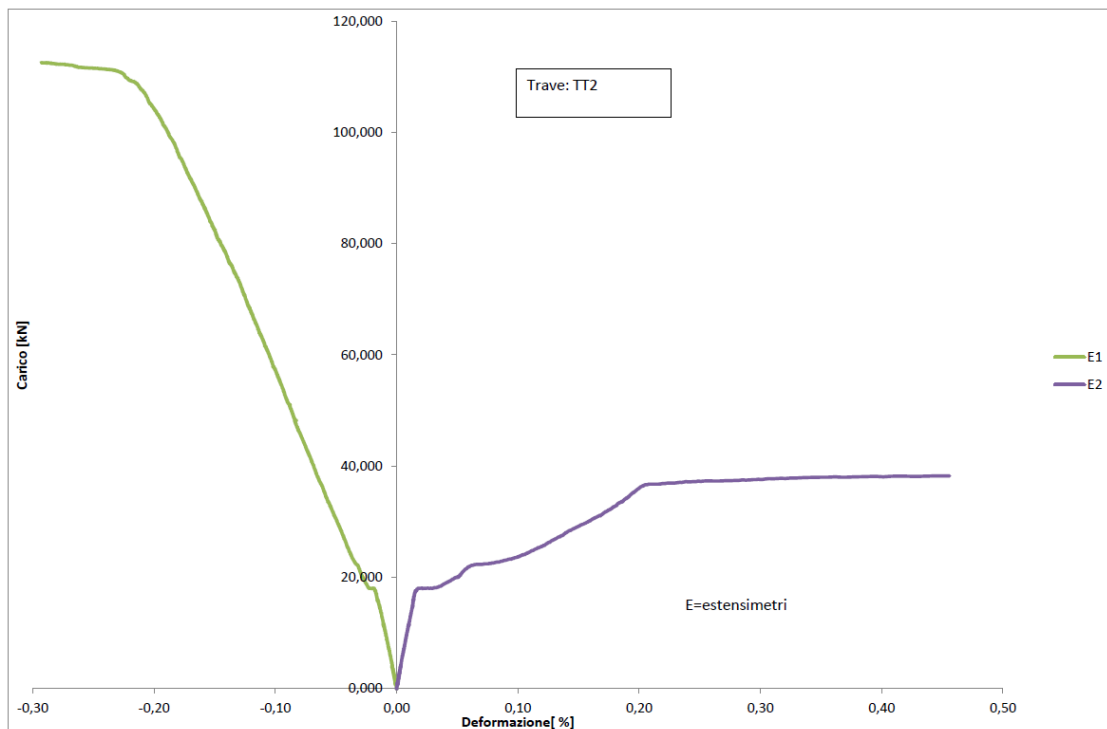
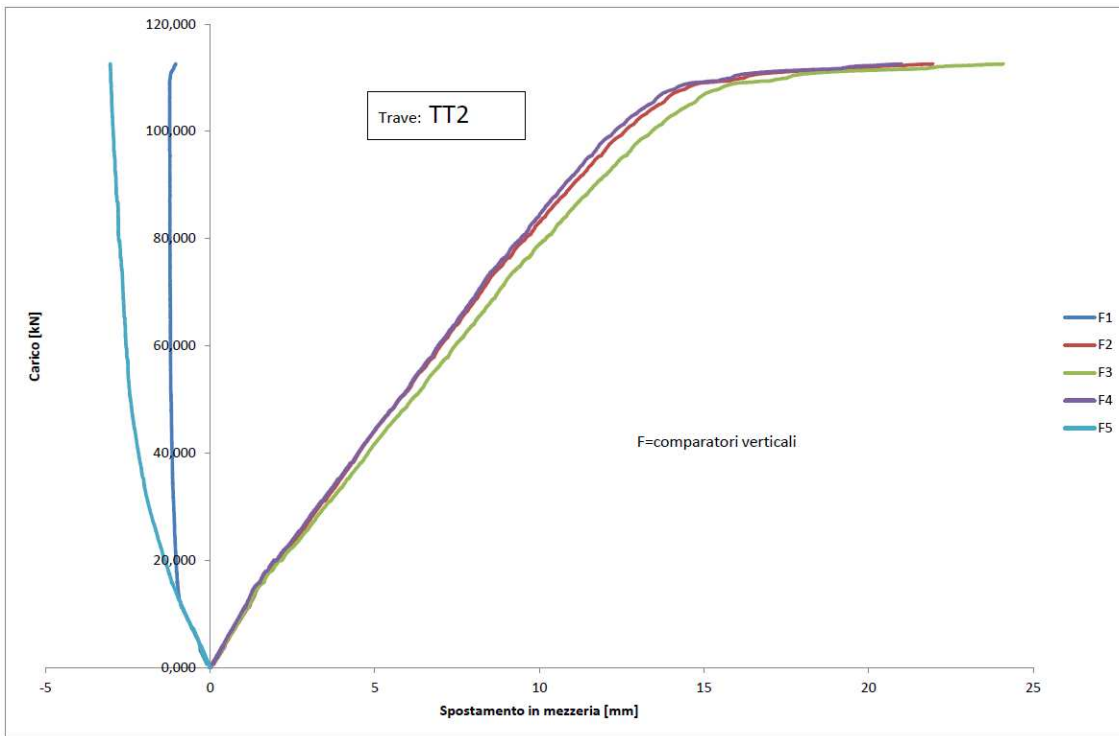


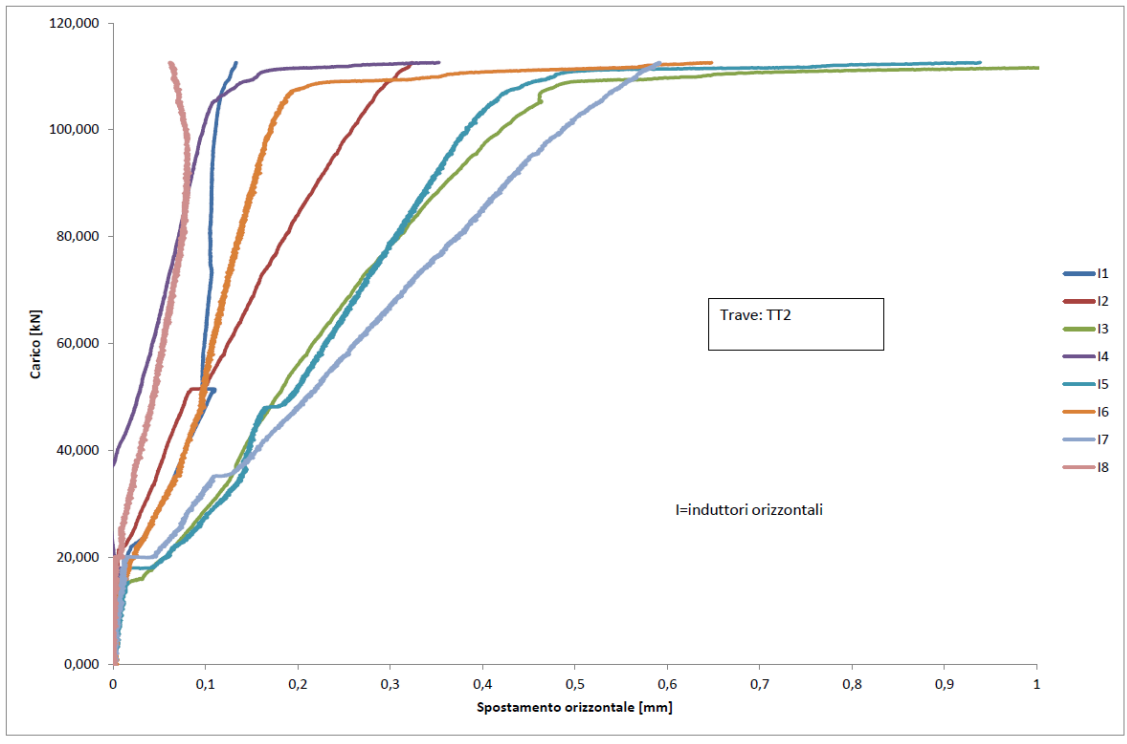






Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 112 KN)

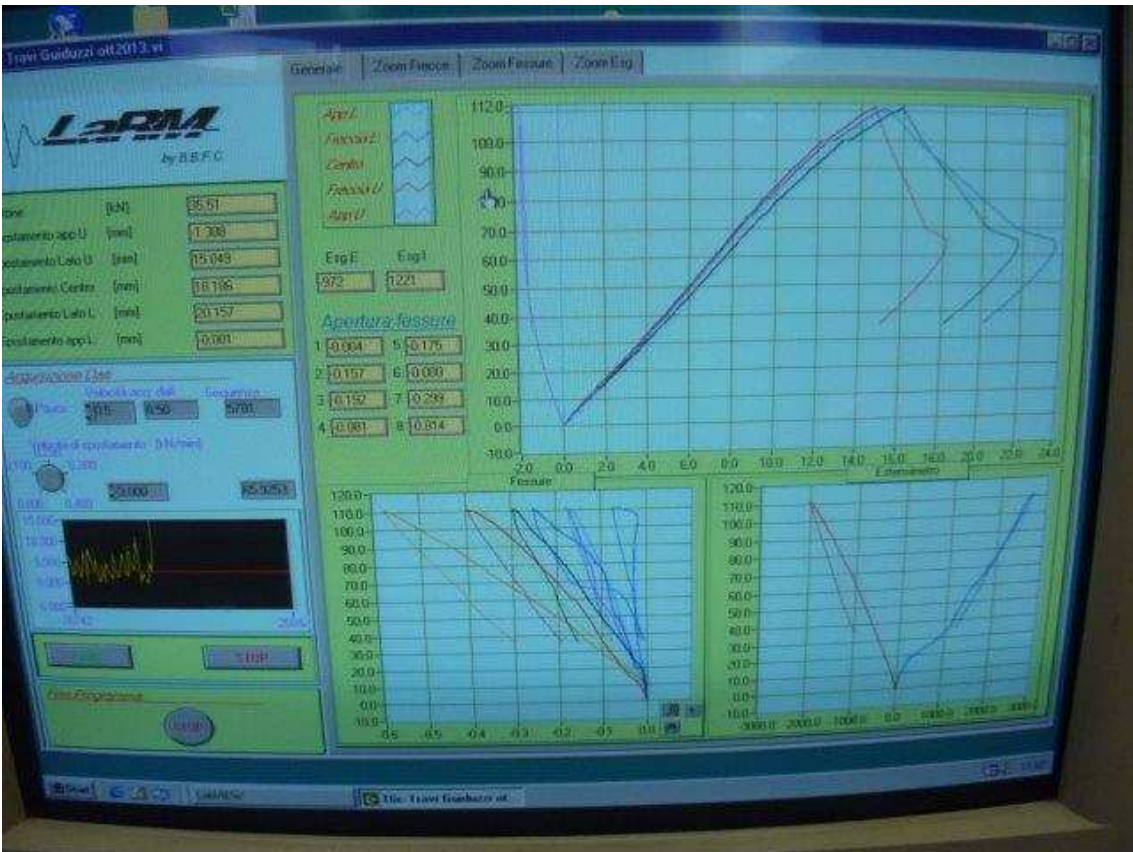




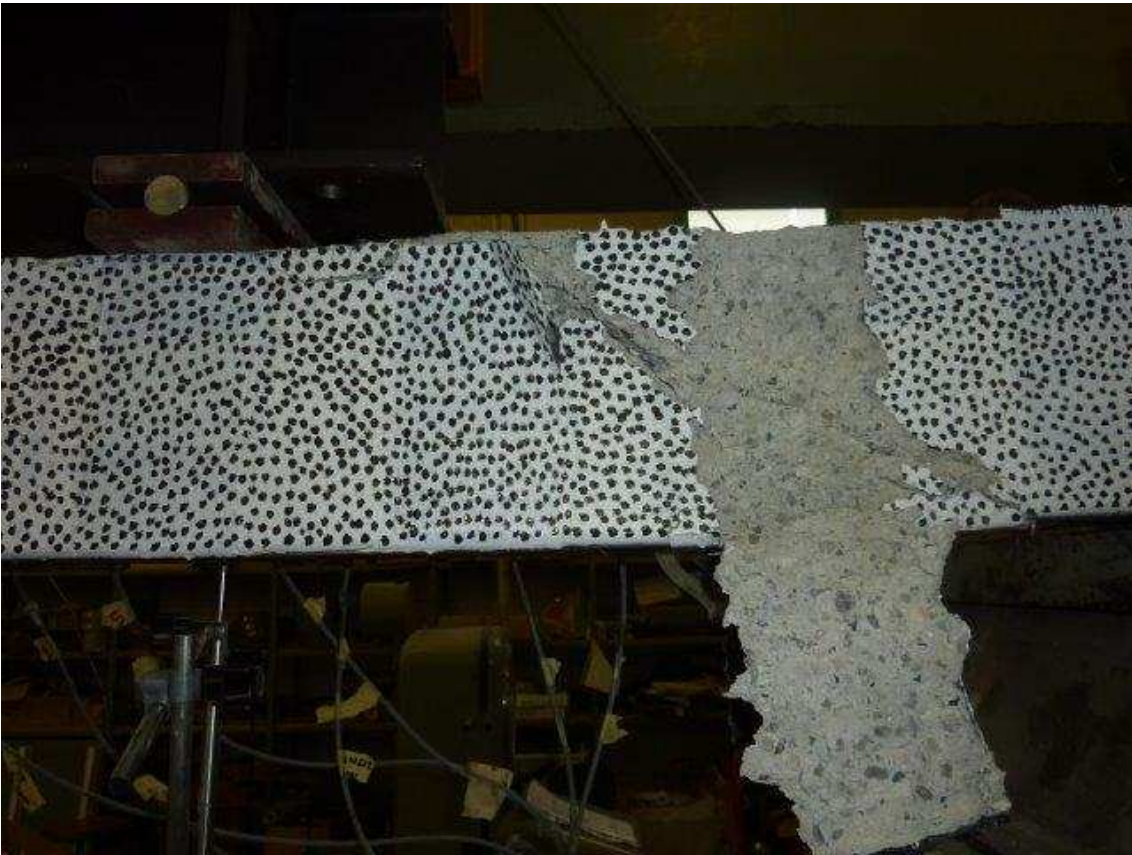
TRAVE TT2-b

Rinforzata a taglio con fibra di carbonio e resine epossidiche.



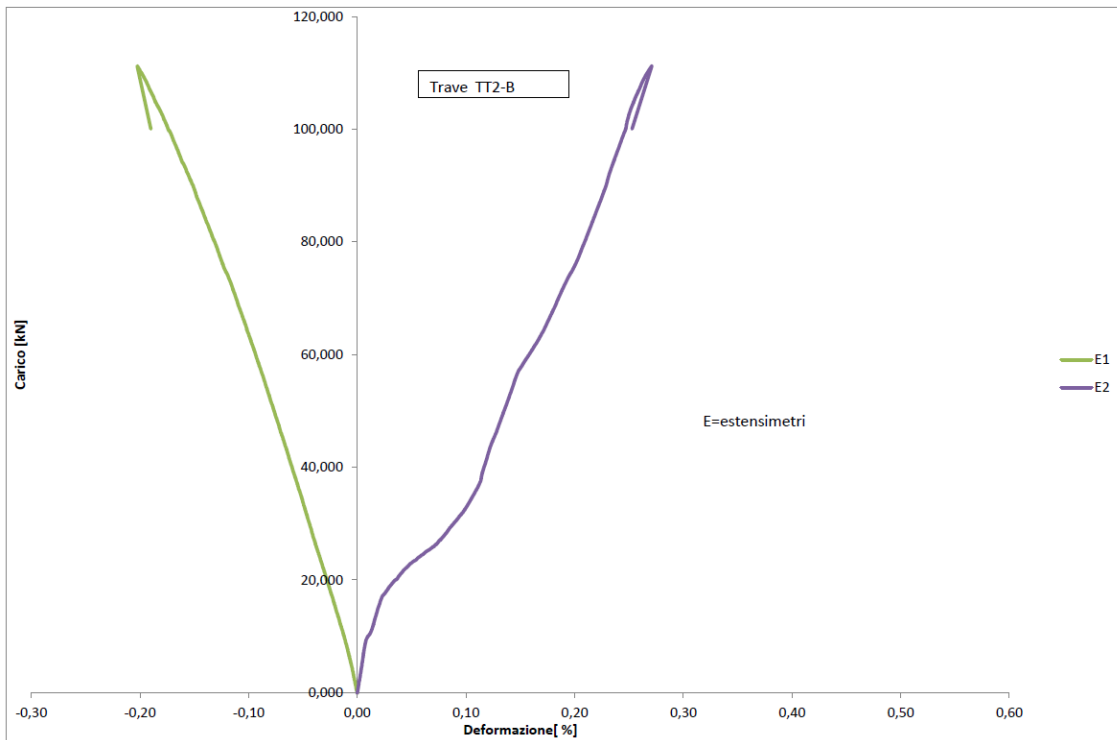
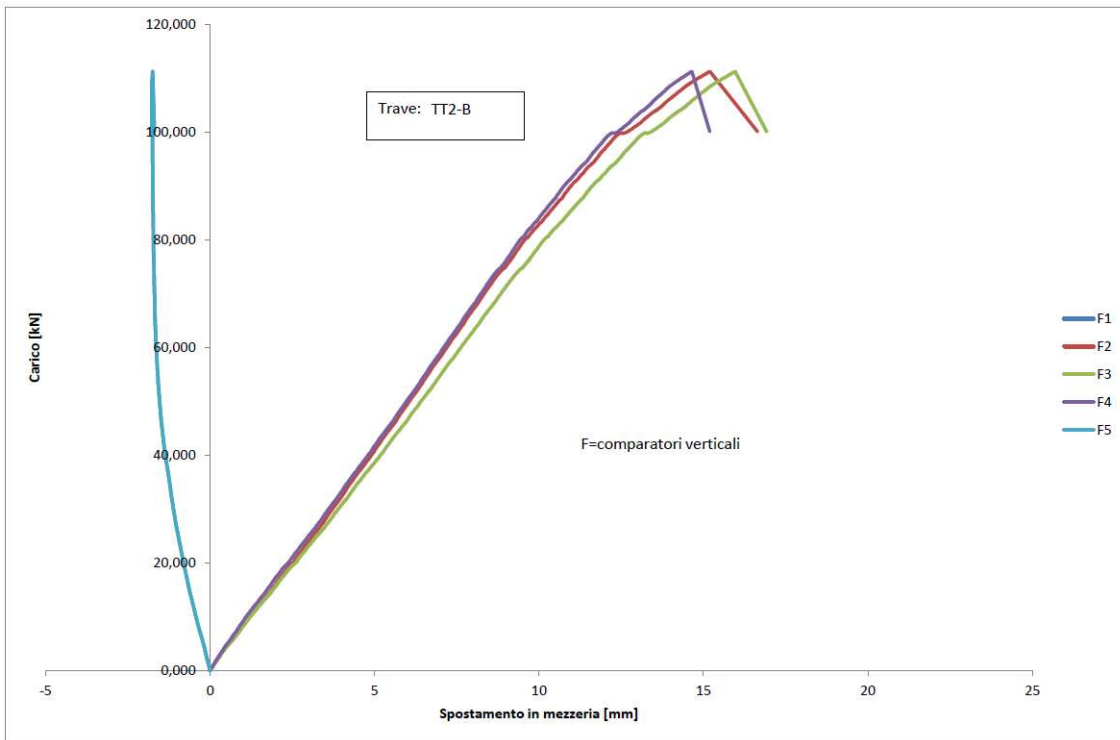


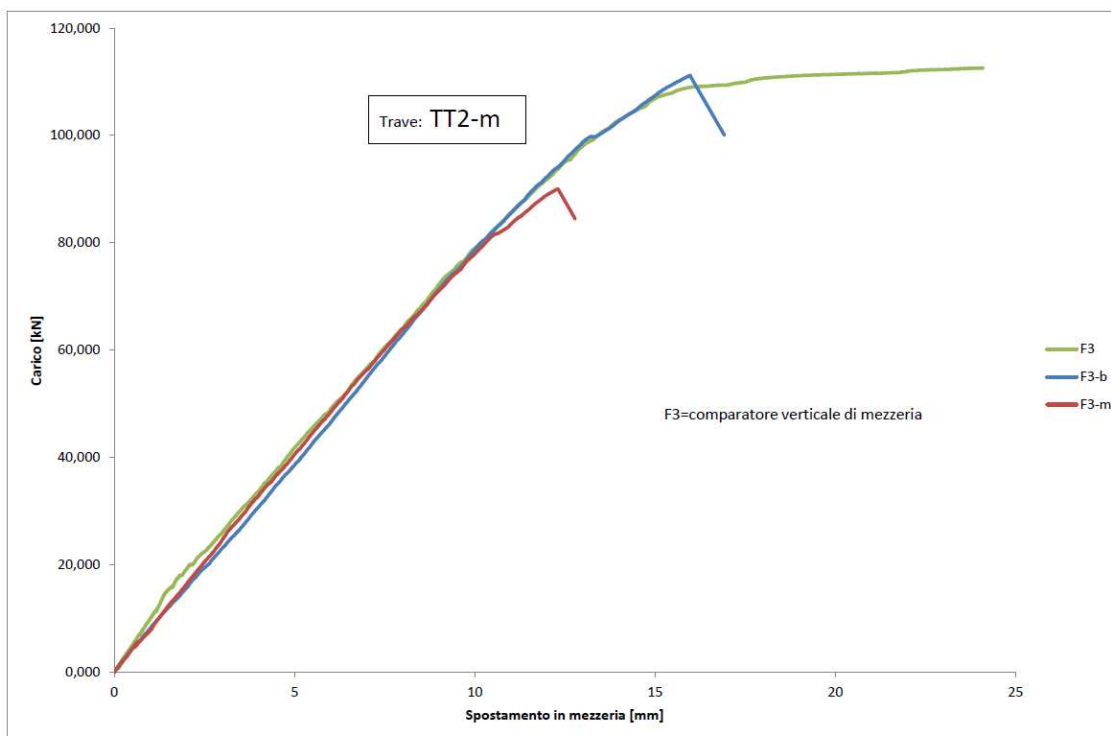
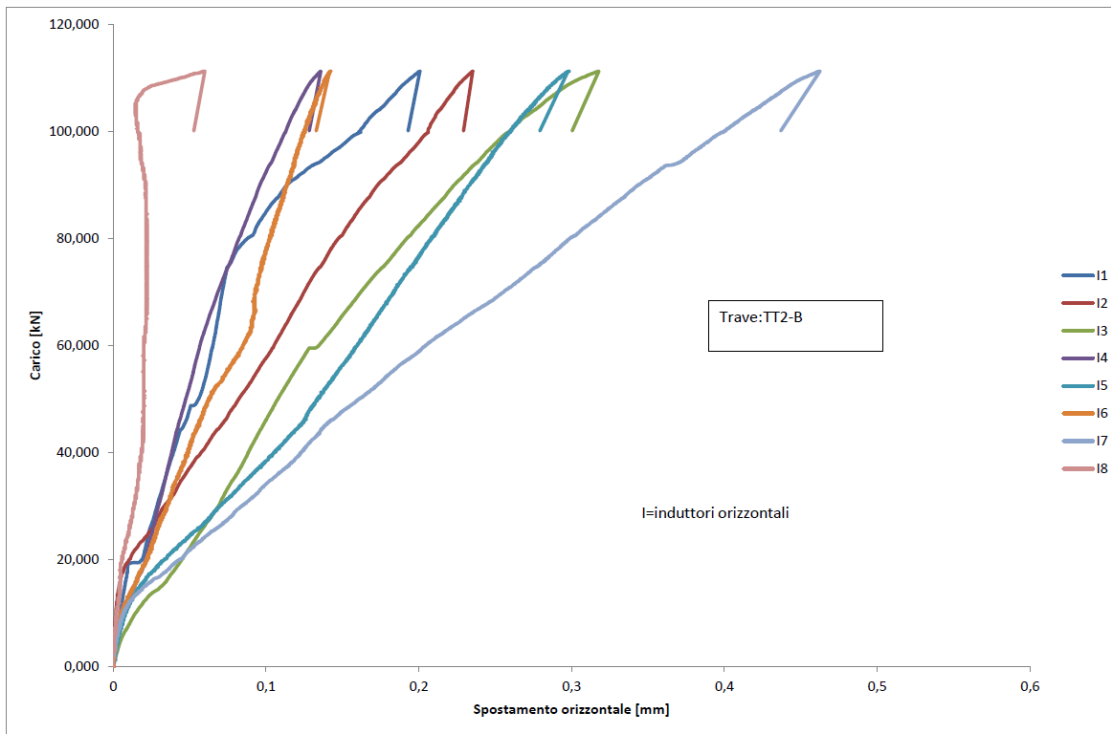


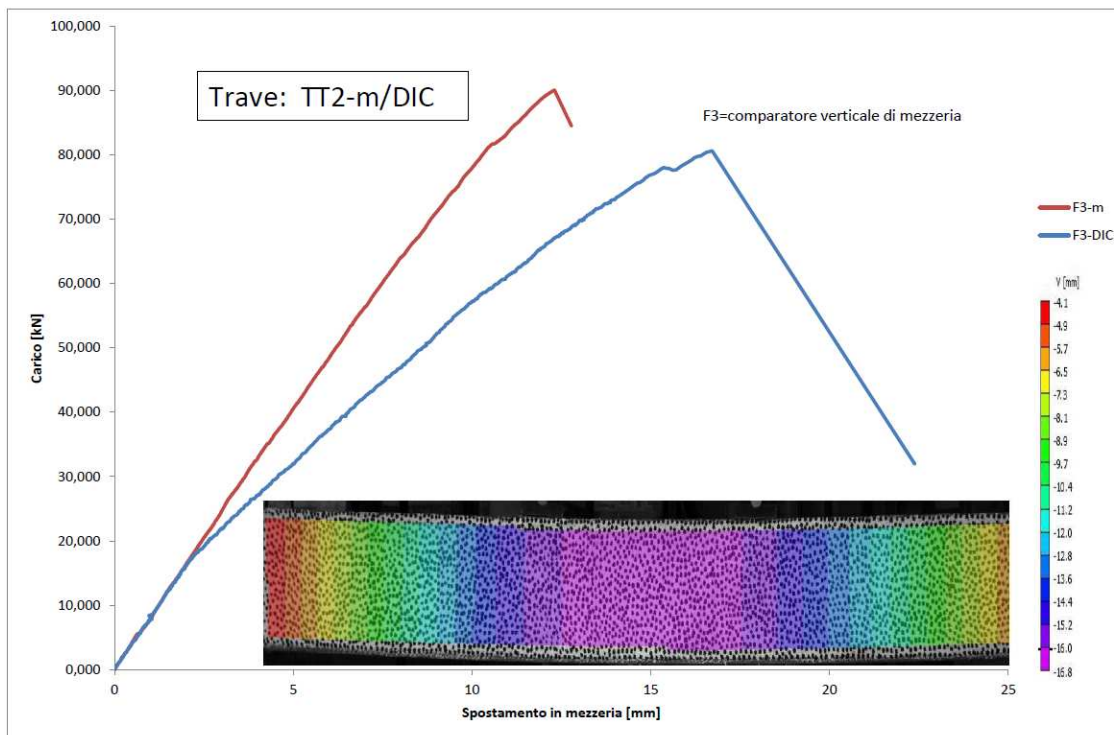
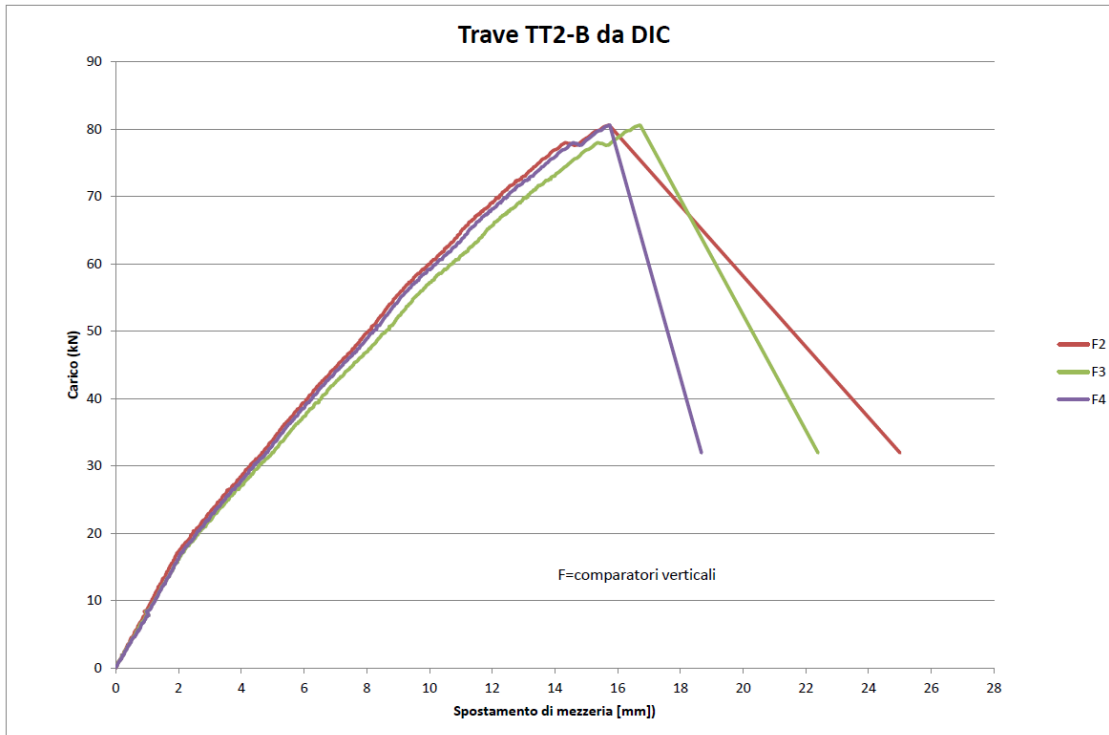


Grafici con i risultati della prova

(Carico di rottura= 111,20 KN)







TRAVE TT3

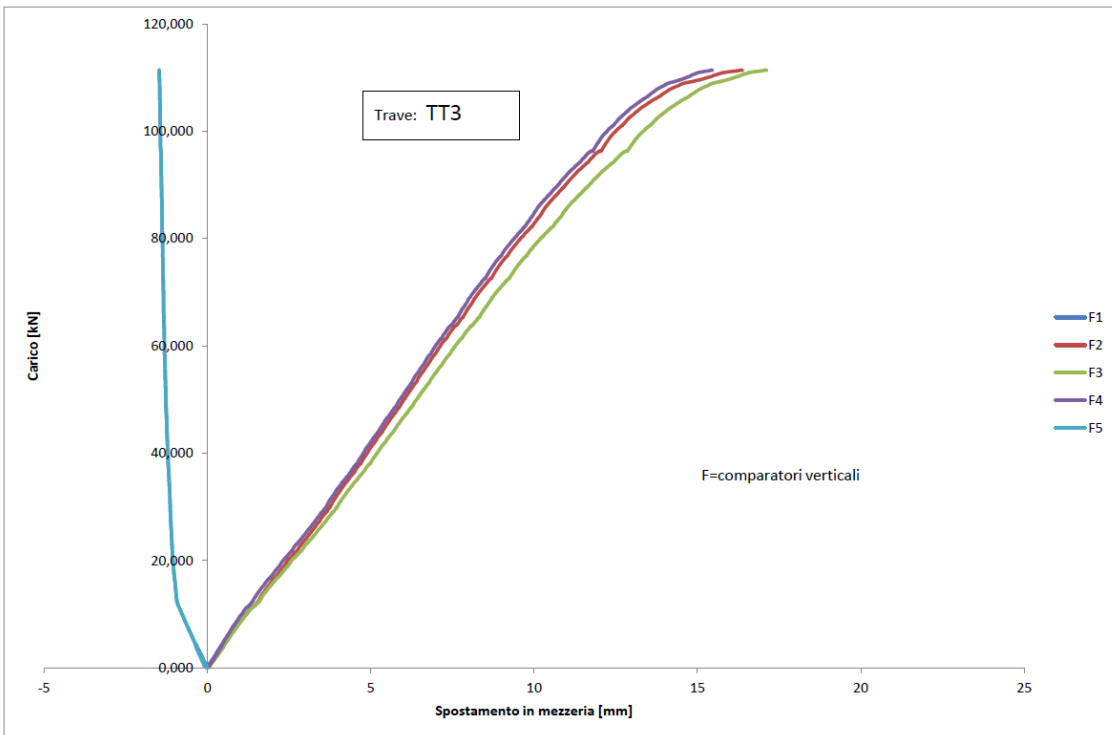
Rinforzata a taglio con fibra di carbonio con resine IPN a base acqua.

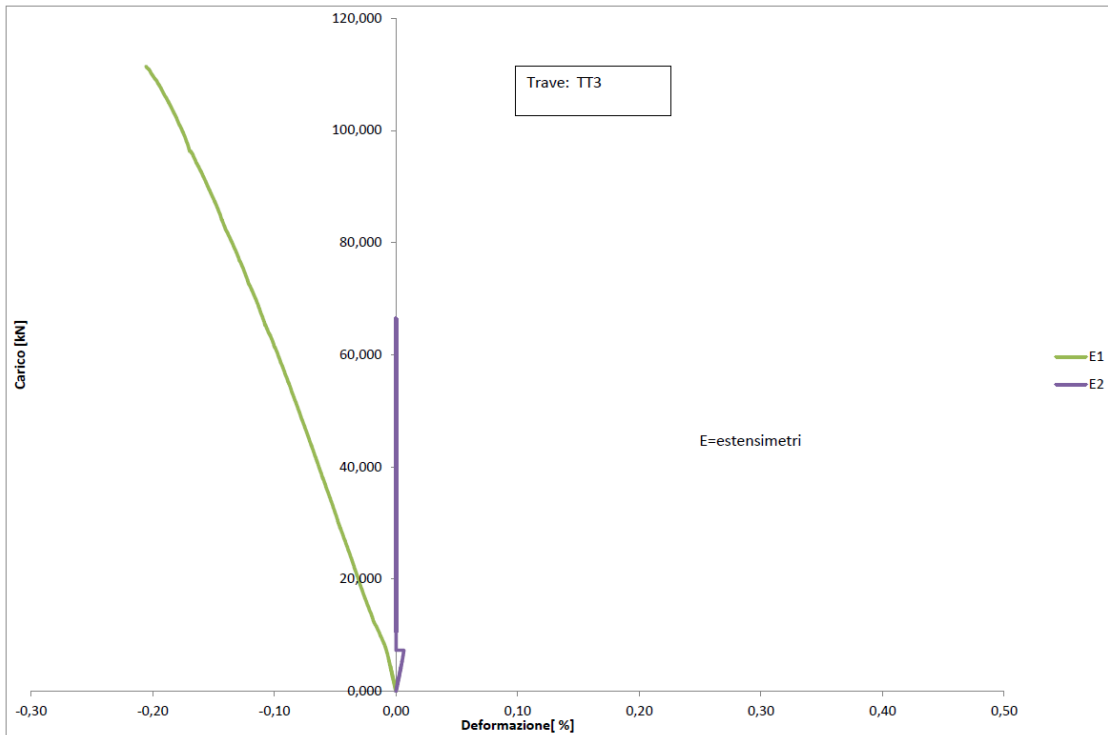






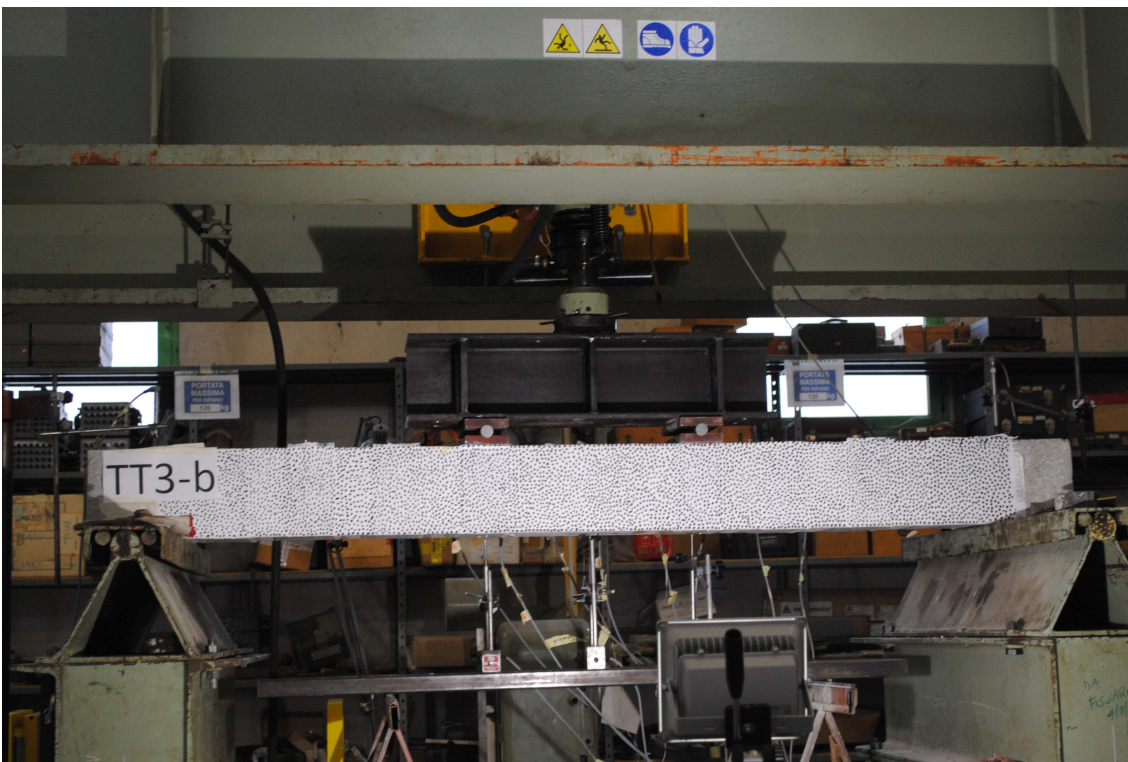
Grafici con i risultati della prova
(Carcio di rottura= 112 KN)

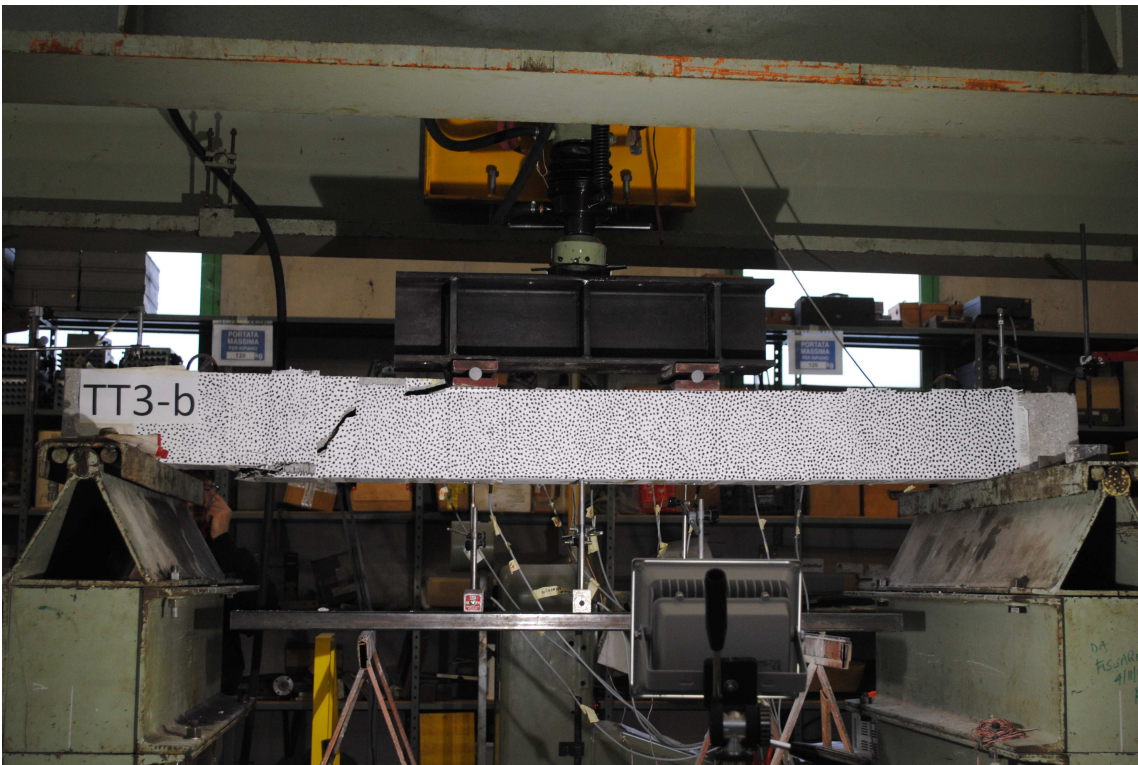


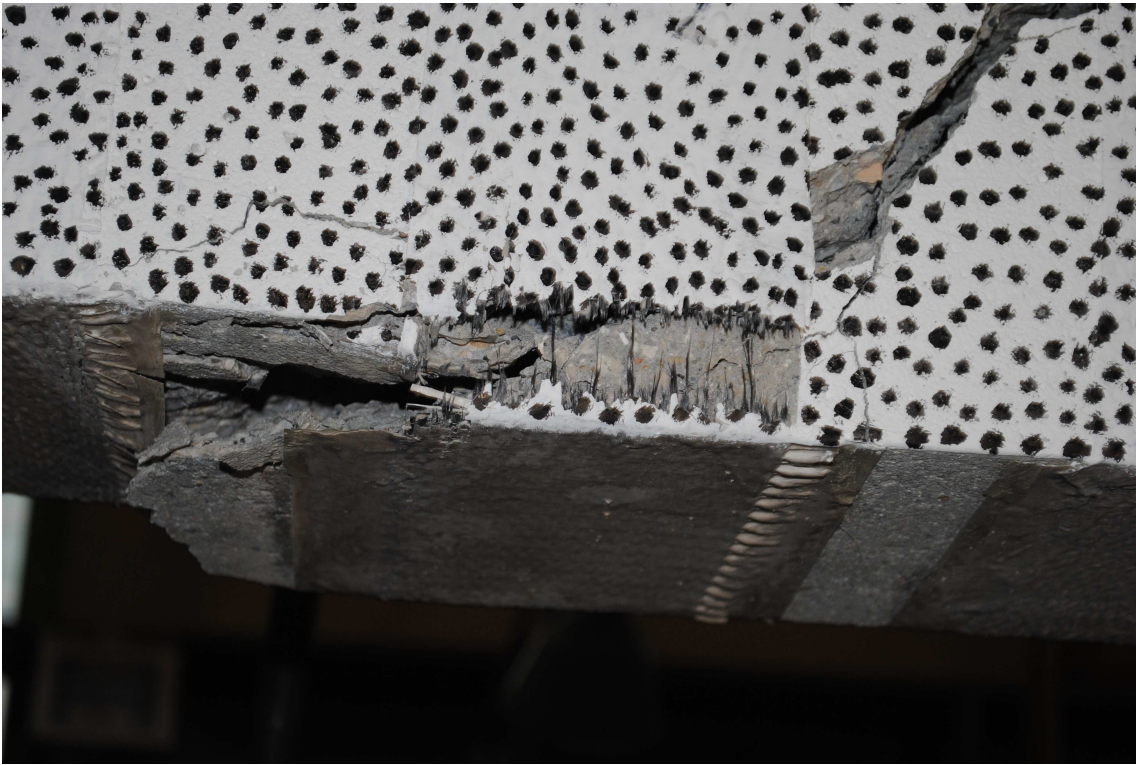


TRAVE TT3-b

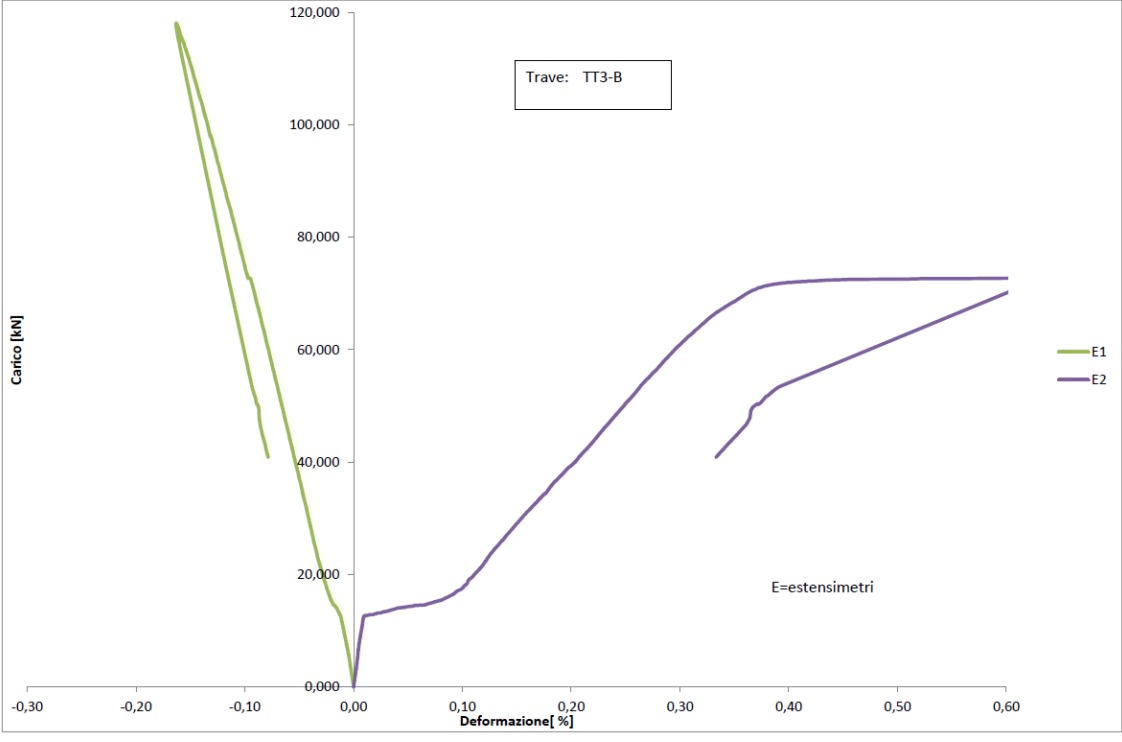
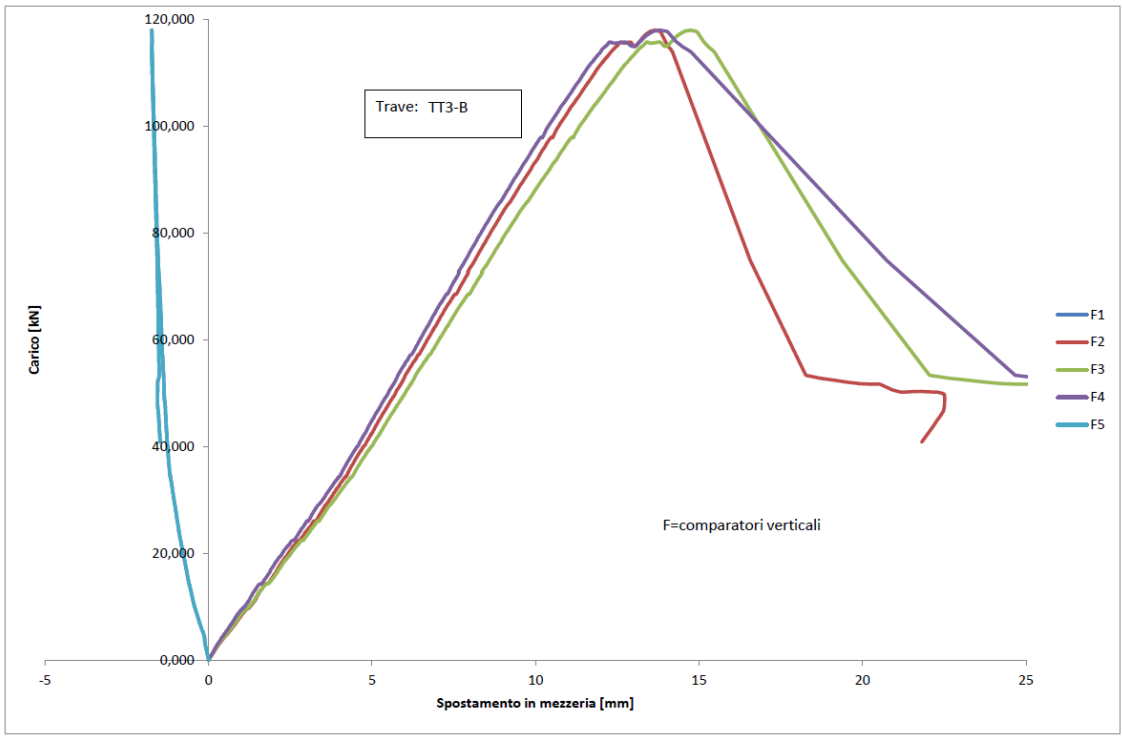
Rinforzata a taglio con fibra di carbonio con resine IPN a base acqua.

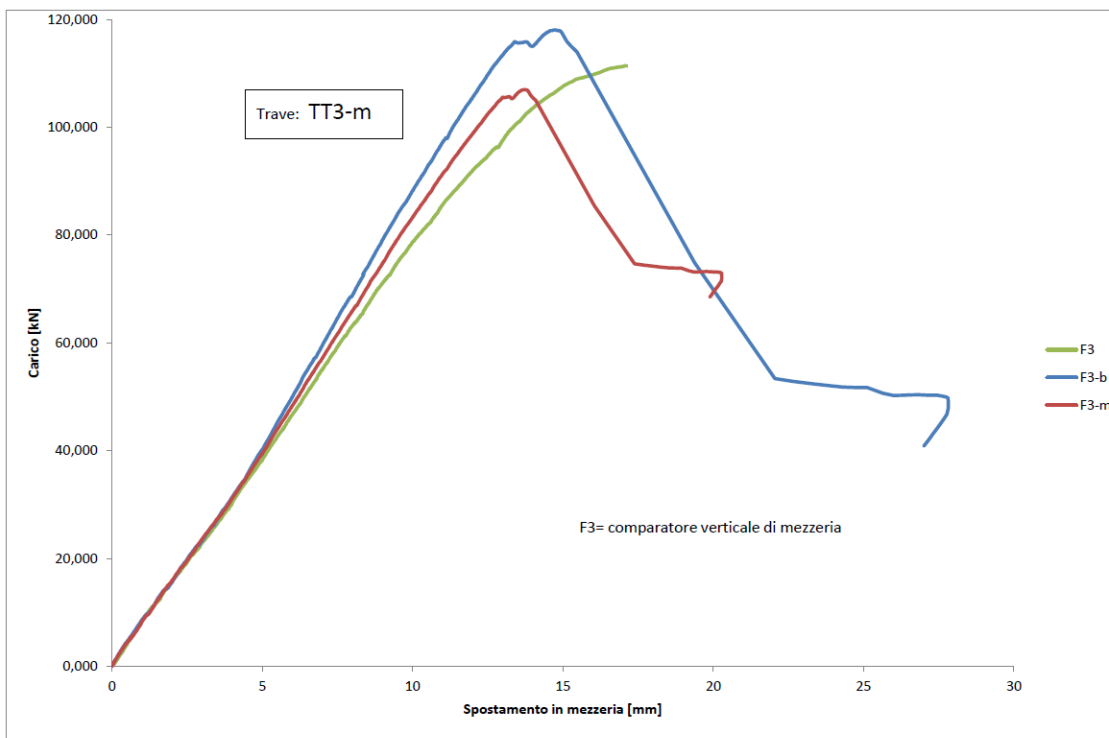
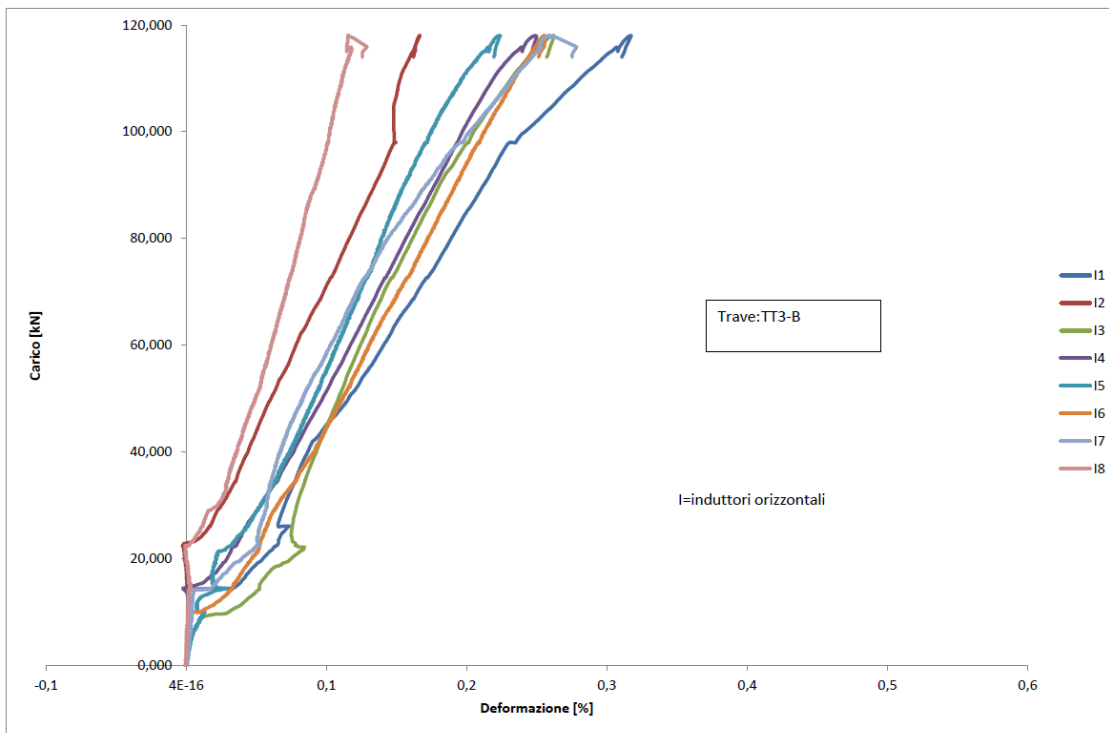


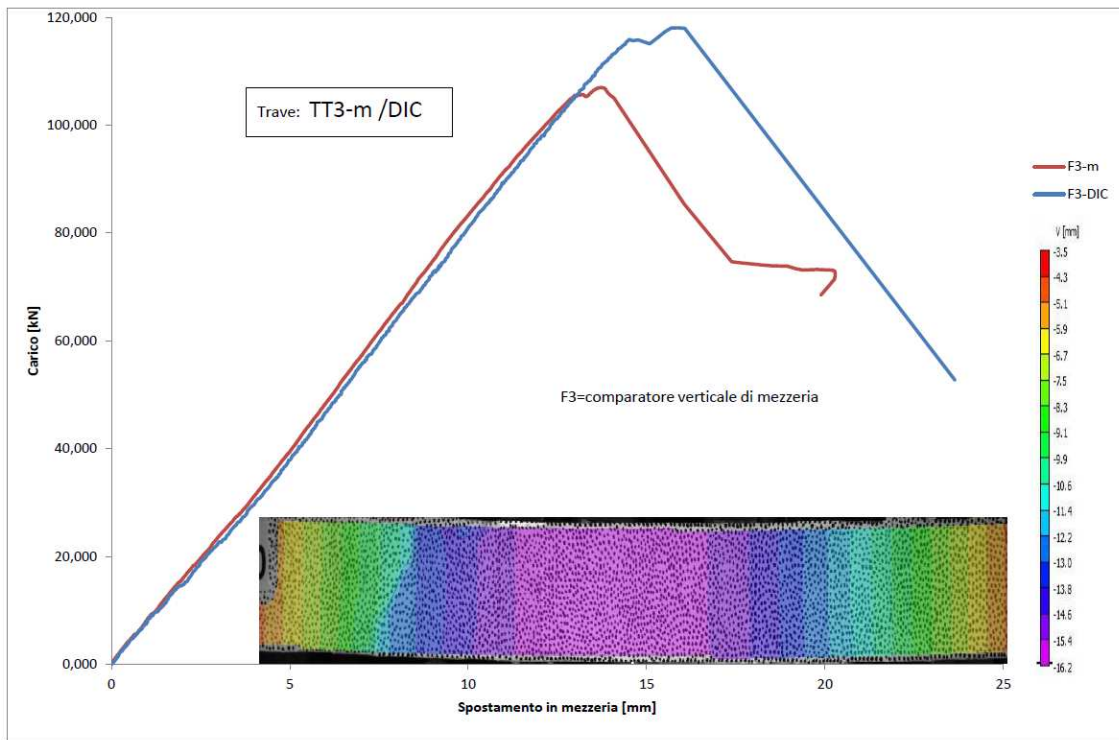




Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 123,60 KN)



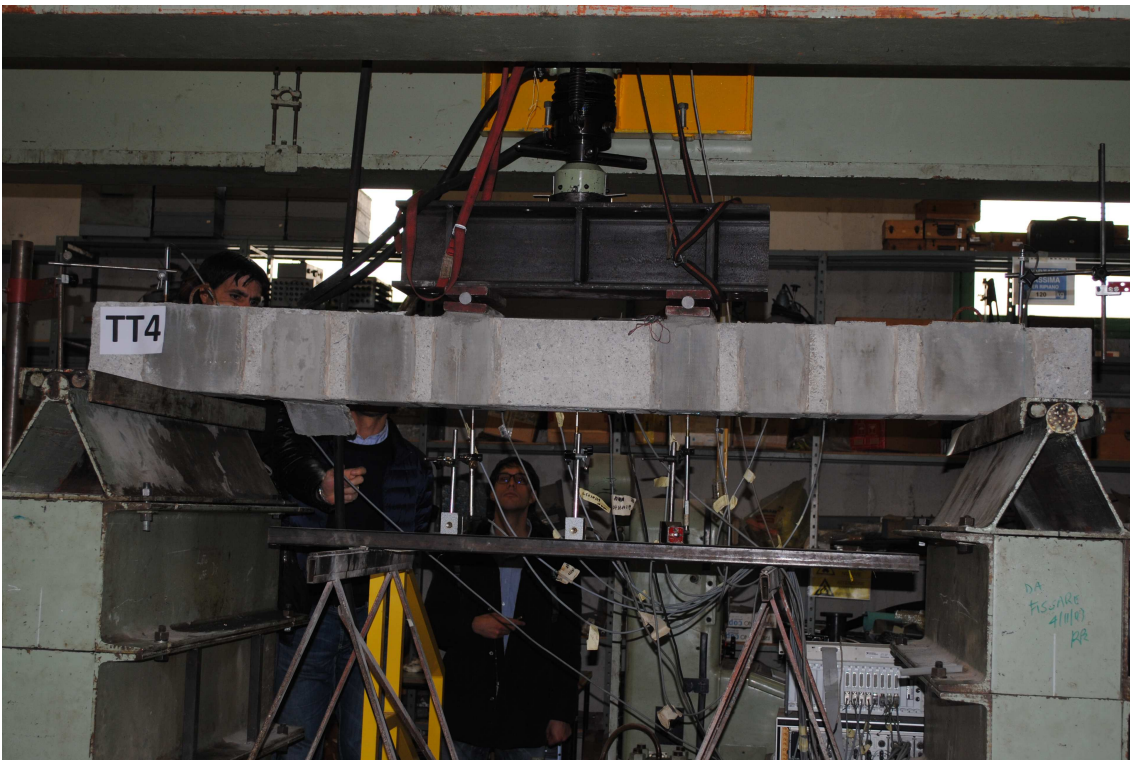




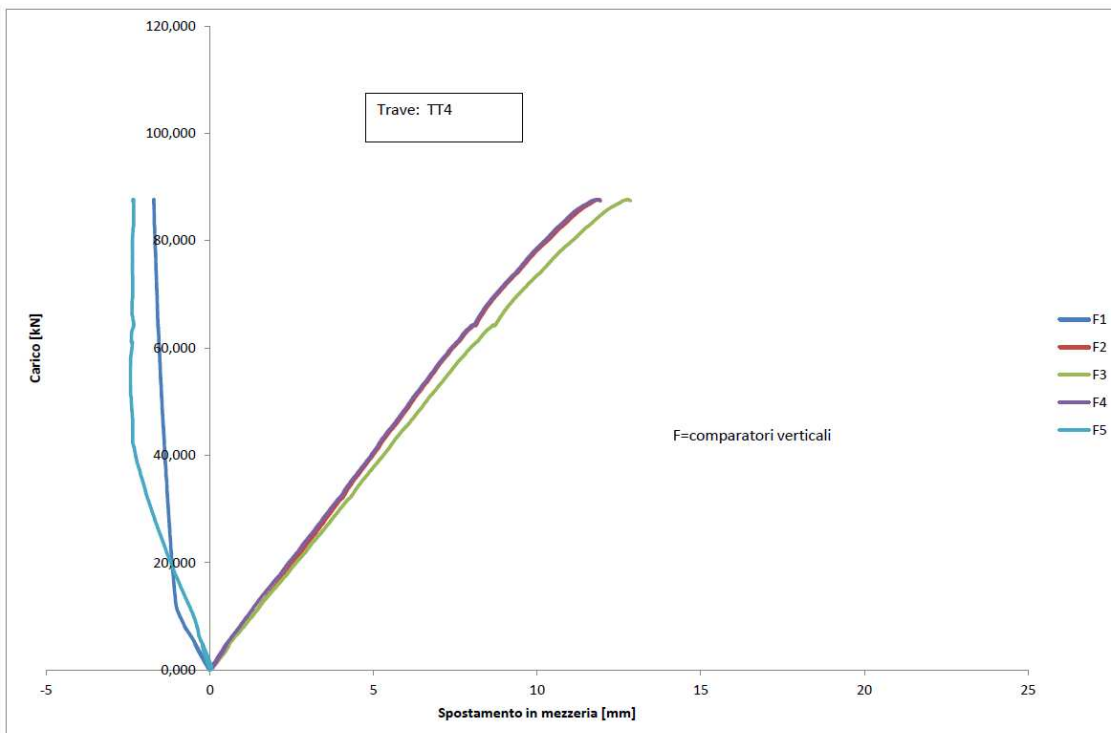
TRAVE TT4

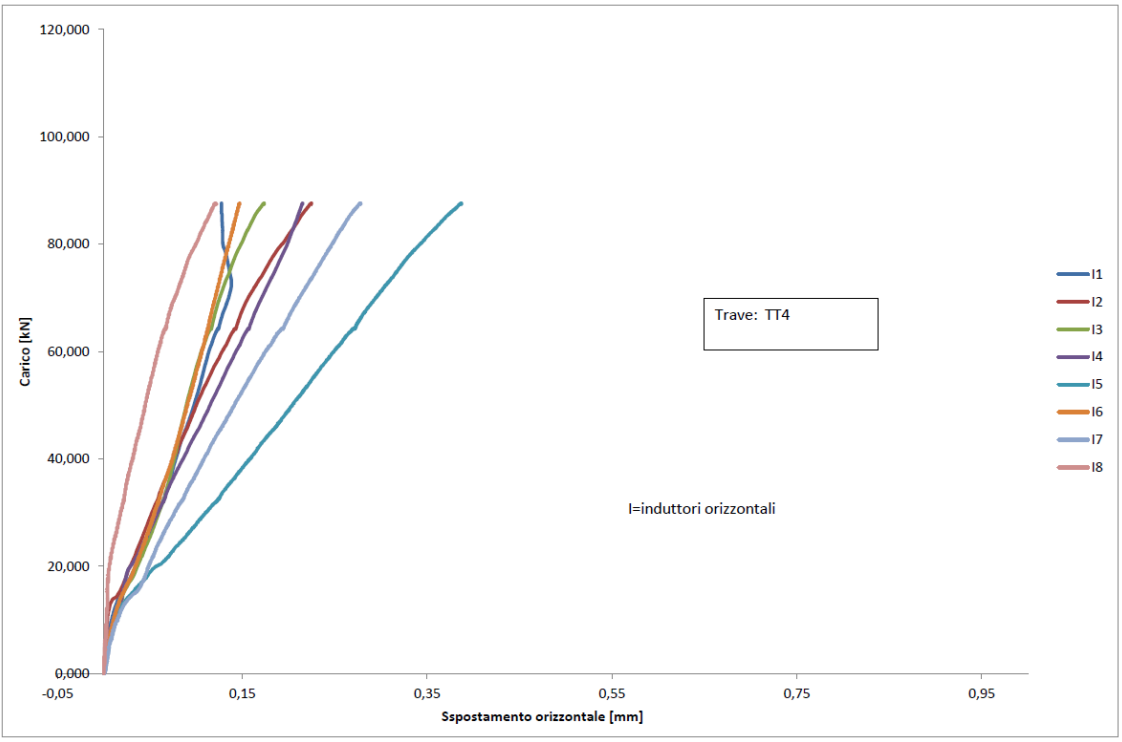
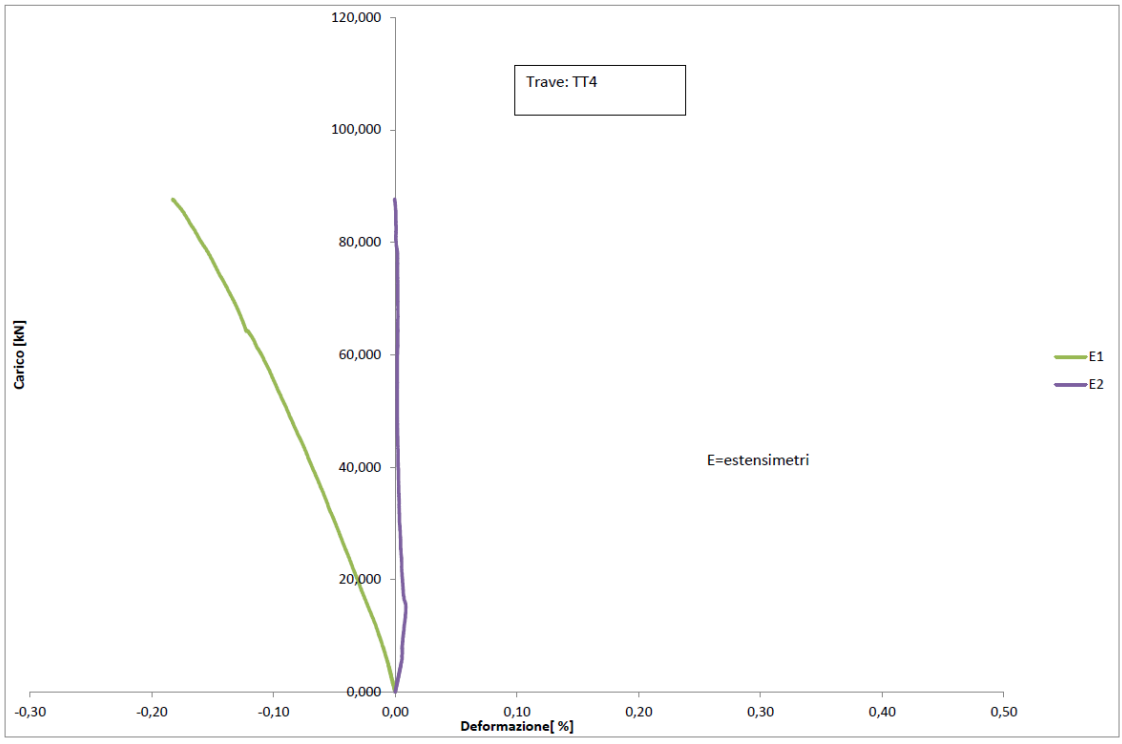
Rinforzata a taglio con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua più malta cementizia





Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 88 KN)



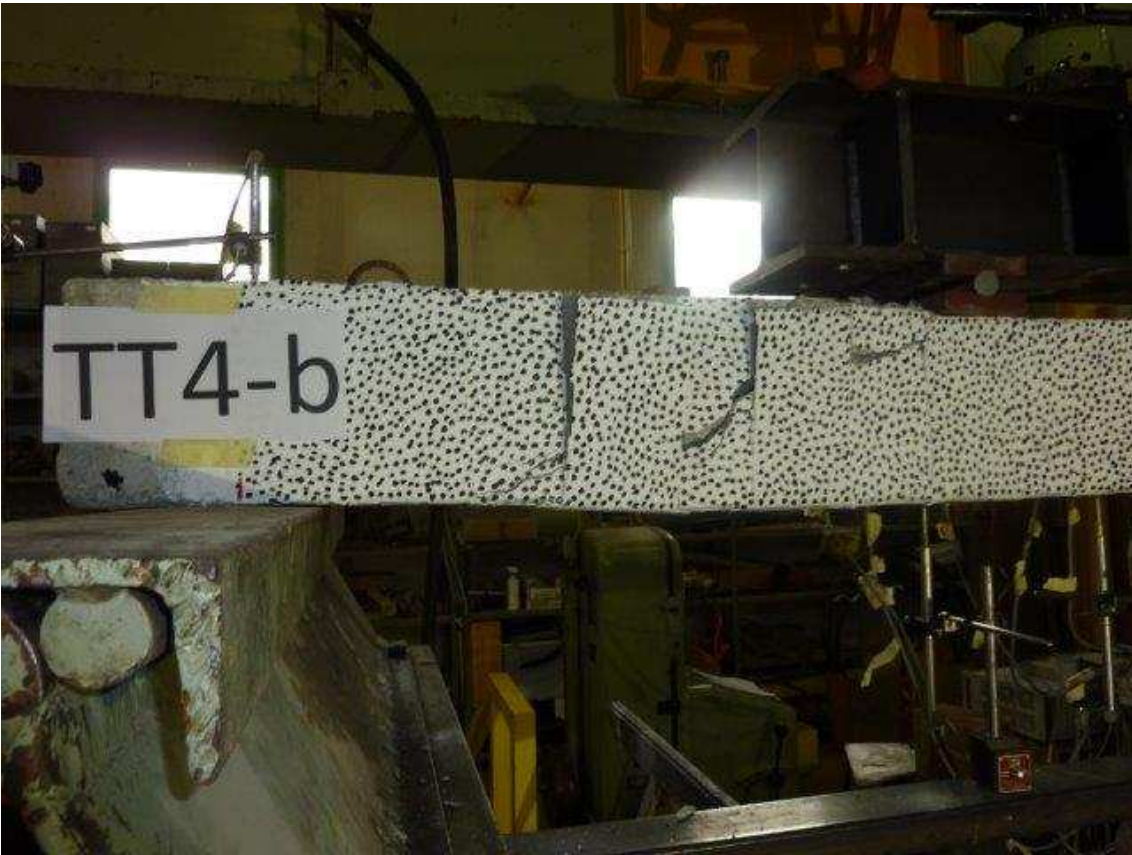


TRAVE TT4-b

Rinforzata a taglio con fibre di carbonio e resine IPN a base acqua più malta cementizia.

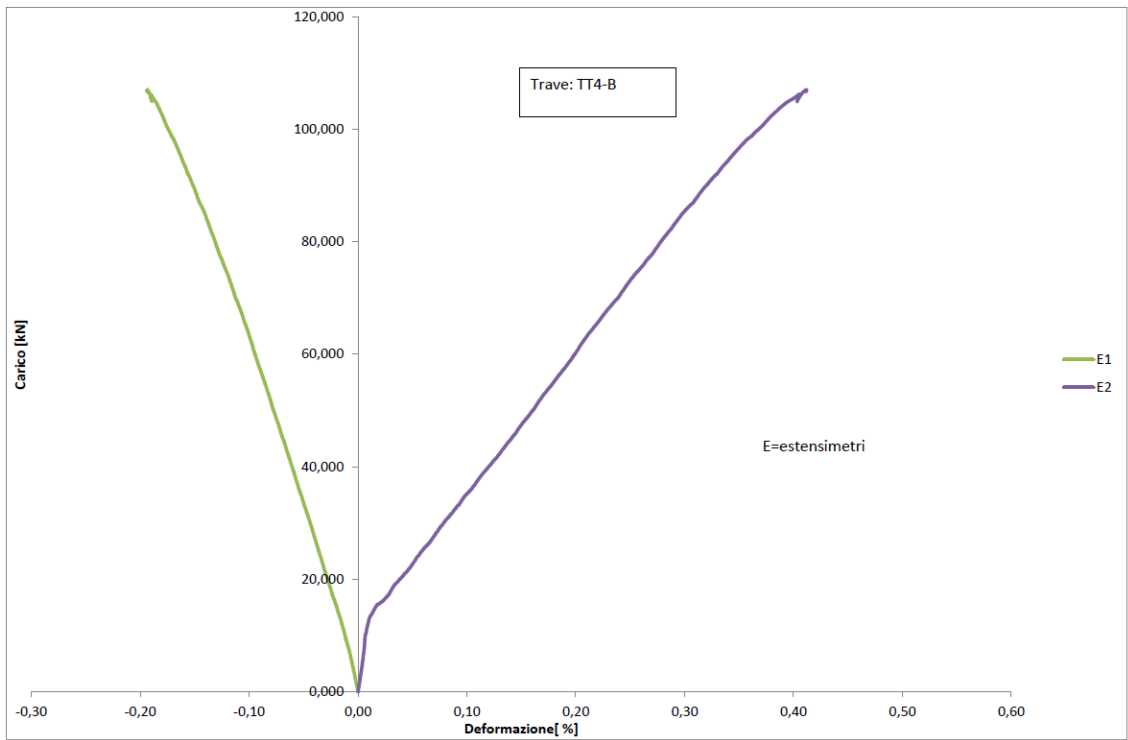
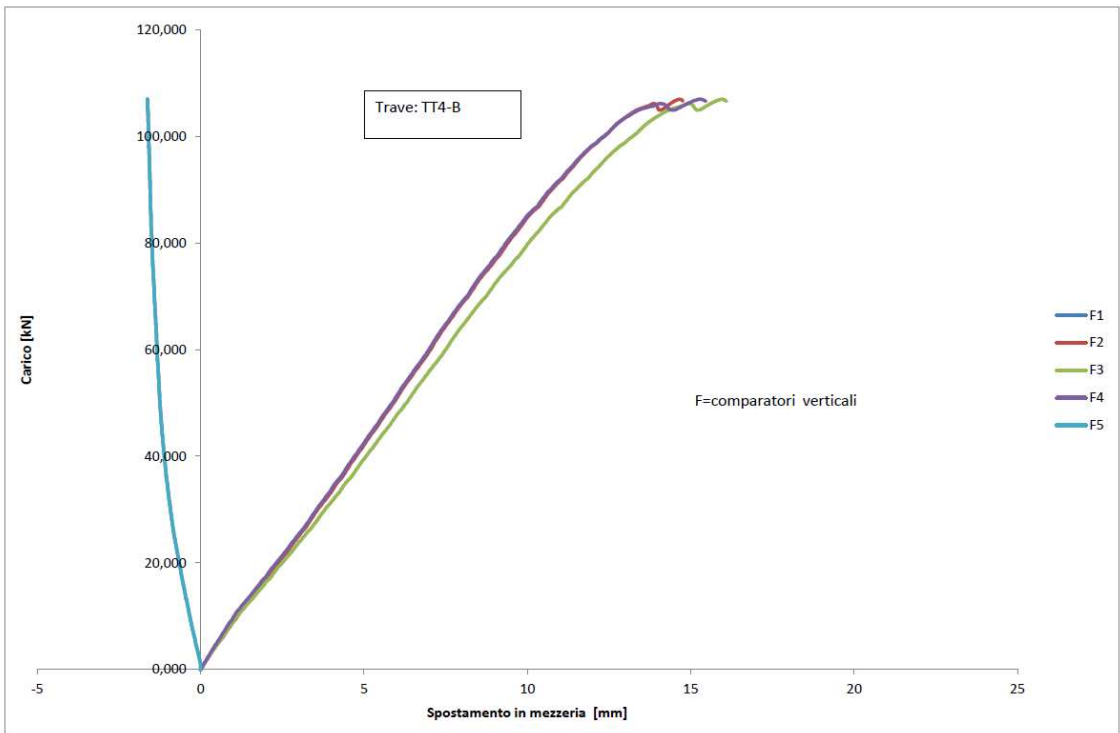


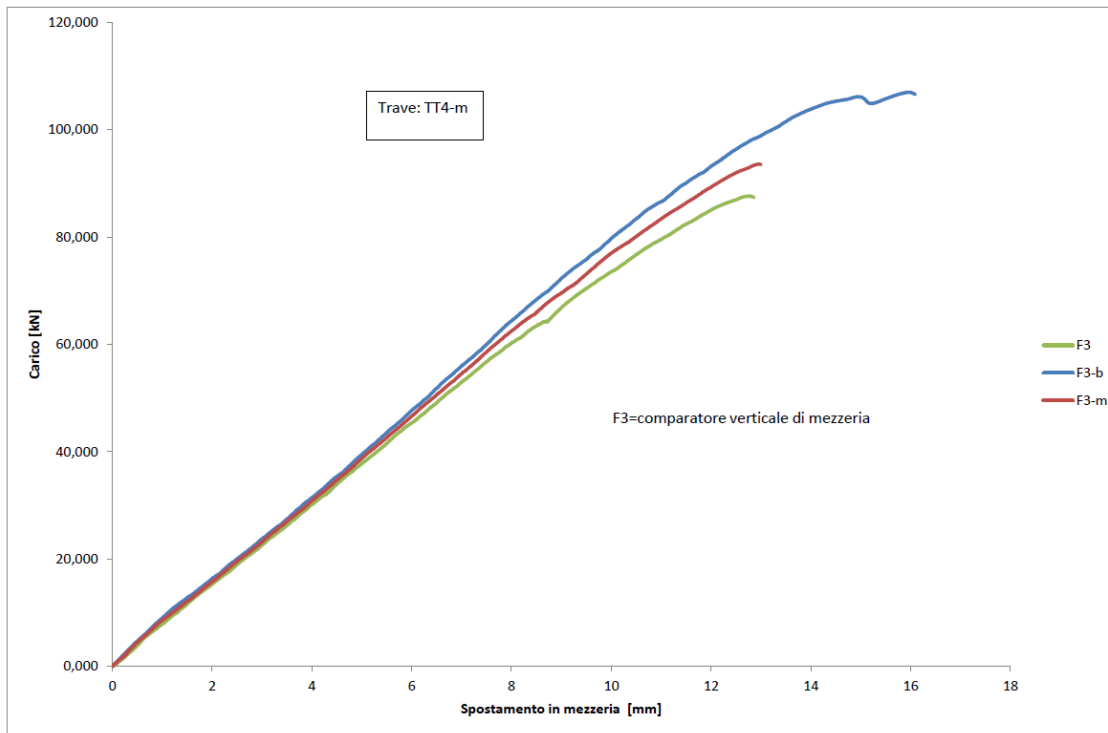
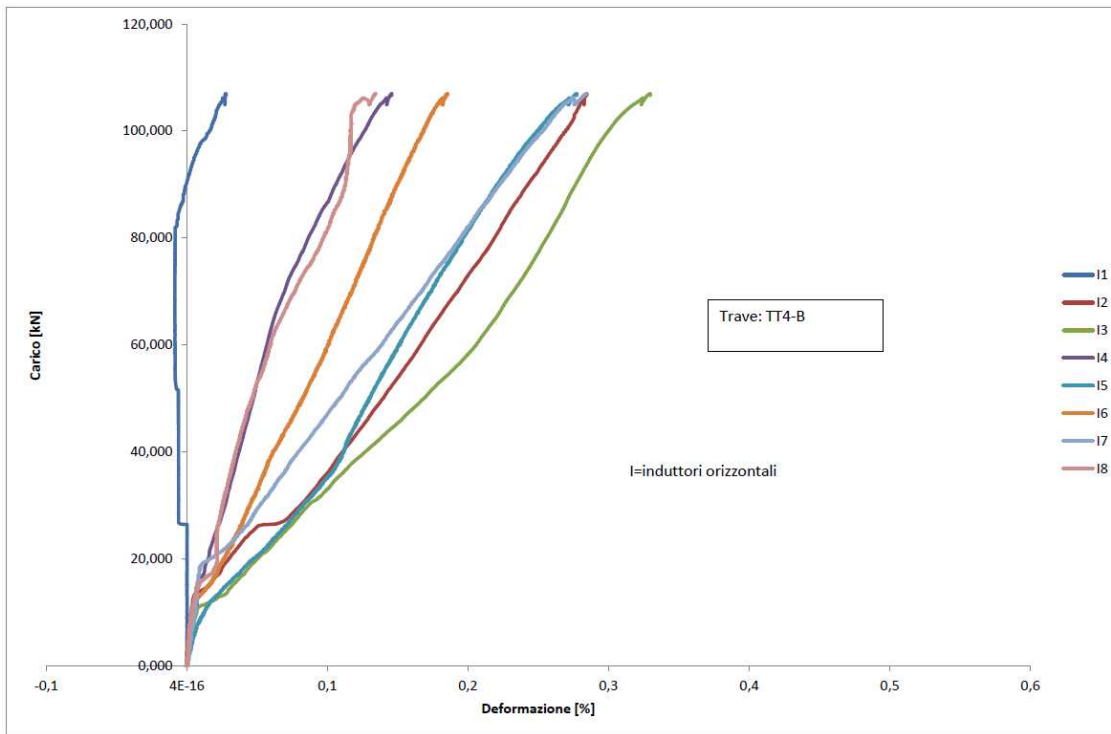


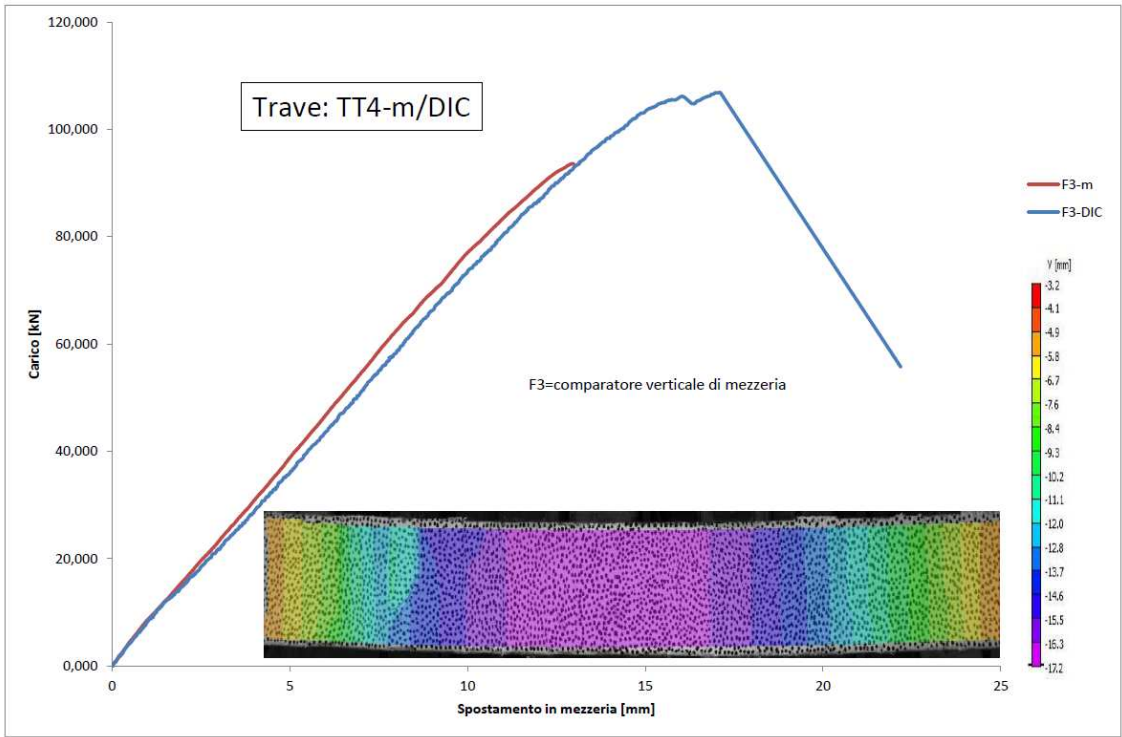




Grafici con i risultati della prova
(Carico di rottura= 107 KN)

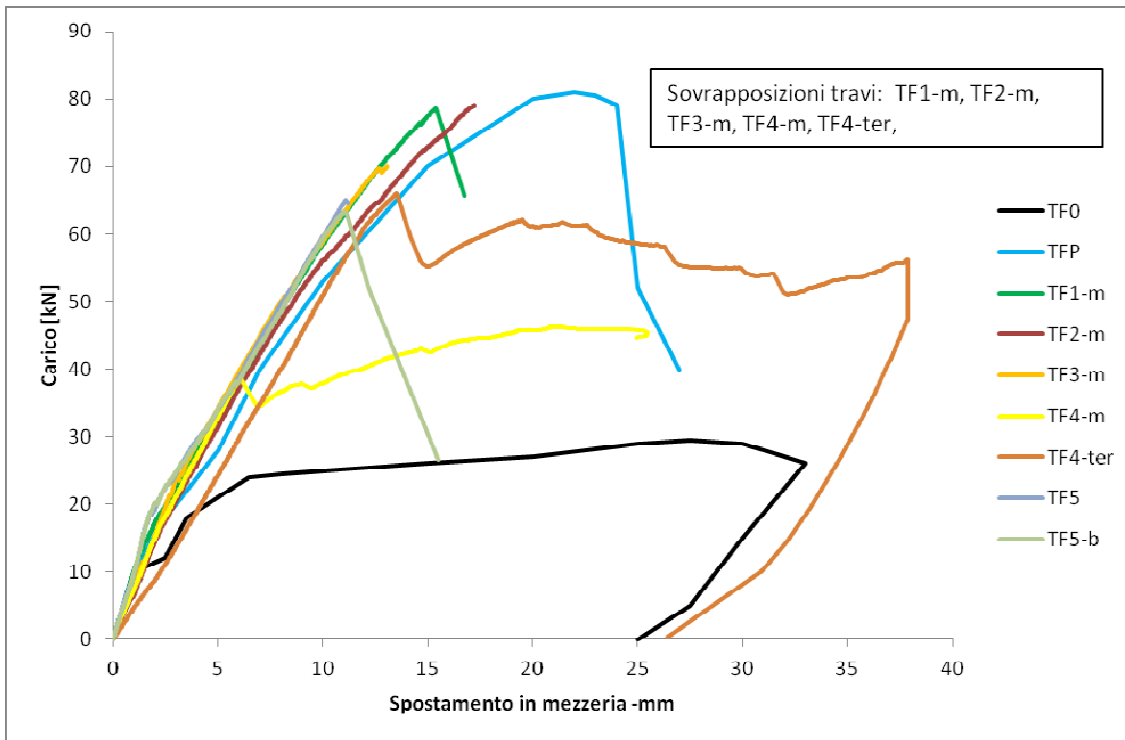






GRAFICI DI COMPARAZIONE DEI RISULTATI OMOGENEI PER TIPO DI RINFORZO DELLE TRAVI

TRAVI RINFORZATE A FLESSIONE



TRAVI RINFORZATE A TAGLIO

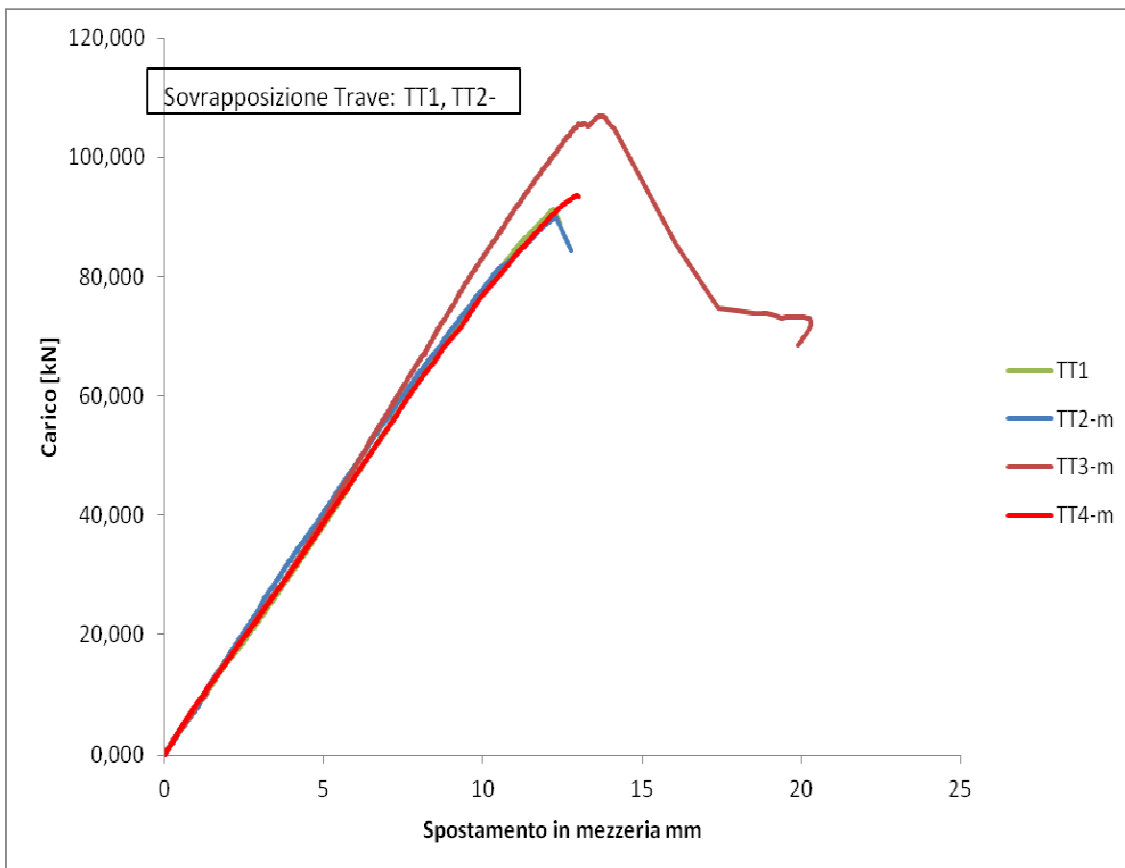


TABELLE RIEPILOGATIVE

Le seguenti tabelle riepilogative dei risultati delle prove sia per le travi rinforzate a flessione che per quelle rinforzate a taglio, contengono i valori del carico di collasso per vari tipi di carico:

- Carico di rottura teorico: ottenuto con il calcolo allo stato limite ultimo secondo le NTC2008 e secondo le CNR DT 2004;
- Carico di rottura reale: quello ottenuto con le prove;
- Carico di rottura ottenuto dall'analisi numerica condotta con programma di calcolo SAP 2000;
- Carico di rottura Prof. Poluzzi: quello ottenuto con l'esperienza del professore;
- Carico di rottura Prof. Bartoli: quello ottenuto da una ulteriore sperimentazione su campioni analoghi a quelli da noi utilizzati.

TRAVE	TIPO DI RINFORZO APPLICATO	CARICO DI ROTTURA TEORICO (2P-KN)	CARICO DI ROTTURA REALE (2P-KN)	CARICO DI ROTTURA SAP 2000 (2P-KN)	CARICO DI ROTTURA PROF. Poluzzi (con resine epoxy)	CARICO DI ROTTURA PROF. Bartoli (con resine epoxy)	TIPO DI ROTTURA	ESAME VISIVO DOPO IL COLLASSO	NOTE E APPROFONDIMENTI
TF0	FLESSIONE-TRAVE NON RINFORZATA	22	nd	22	22		FLESSIONE	Formazione di lesioni nelle zone limitrofe alla mezzeria	Esperienza condotta sotto la guida del Prof. Poluzzi
TF0	FLESSIONE-TRAVE NON RINFORZATA	22	nd	22		32	FLESSIONE	Sneramento lato acciaio con fessure da flessione.	Esperienza condotta sotto la guida del Prof. Bartoli dell'Università di Firenze
TF1	FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)	80	74	81	84	64	DELAMINAZIONE	Distacco del composito-iniziale fessurazione a taglio e delaminazione	Nell'esperienza condotta dal Prof. Poluzzi la crisi ha prodotto lesioni nella zona limitrofa alla mezzeria, con rottura lato delaminazione
TF1-b	FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)	80	85	81	nd	nd	DELAMINAZIONE + TAGLIO	Distacco(delaminazione) del composito a partire dalla zona laterale destra-iniziale fessurazione a taglio	Nell'esperienza condotta dal Prof. Bartoli la crisi è avvenuta per delaminazione di estremità
TF2	FLESSIONE-RINFORZO CON FIBRE DI CARBONIO E RESINE A BASE ACQUA(IPN)+FASCE LATERALI ANTIDEBONDING	80	92	81	nd	89	FLESSIONE	Formazione di lesioni nelle zone limitrofe alla mezzeria-delaminazione	Nell'esperienza condotta dal Prof. Bartoli le fasciature ad "U" sono disposte su tutta la trave ad un passo medio di 200 mm
TF2-b	FLESSIONE-RINFORZO CON FIBRE DI CARBONIO E RESINE A BASE ACQUA(IPN)+FASCE LATERALI ANTIDEBONDING	80	80	81	nd	nd	DELAMINAZIONE + TAGLIO	Distacco del composito nella zona di intradossi centrale della trave e all'estremità	Nell'esperienza condotta dal Prof. Bartoli i connettori Ardifix sono stati disposti ad un passo medio di 200 mm
TF3	FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)+CONNETTORI ARDIFIX	80	82	nd	nd	85	TAGLIO	Lesione a destra inclinata di circa 45° senza delaminazione	Nell'esperienza condotta dal Prof. Bartoli i connettori Ardifix sono stati disposti ad un passo medio di 200 mm La crisi è avvenuta per rottura del rinforzo senza delaminazione
TF3-b	FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)+CONNETTORI ARDIFIX	80	80,5	nd	nd	nd	TAGLIO	Distacco (de laminazione) del composito nella zona di intradossi della zona laterale destra	
TF4	FLESSIONE- RINFORZO CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)+MALTA CEMENTIZIA+FASCE ANTIDEBONDING	64	67	nd	nd		DELAMINAZIONE + TAGLIO	Distacco locale dei copri ferro del calcestruzzo	
TF4-b	FLESSIONE- RINFORZO CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)+MALTA CEMENTIZIA+FASCE ANTIDEBONDING	64	50,16	nd	nd	nd	DELAMINAZIONE + FLESSIONE	Distacco del composito lato dx	Delaminazione sia composito-calcestruzzo che composito-composito
TF4-3*	(RINFORZO) TF4-b a FLESSIONE-RINFORZO CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)+MALTA CEMENTIZIA+FASCE ANTIDEBONDING (*)	64	67	nd	nd	nd	TAGLIO + INIZIALE DELAMINAZIONE	Iniziale de laminazione lato destro	
TF5	FLESSIONE-CON RINFORZO DI FIBRE DI CARBONIO+MALTA CEMENTIZIA CON IPN (*) solo all'intradosso	64	65	64	nd	nd	DELAMINAZIONE + FLESSIONE	Distacco del solo composito (e non del calcestruzzo) e fessure di tipo flessionale	Vi è stato distacco del solo composito, senza interessare il calcestruzzo di intradosso
TF5-b	FLESSIONE-CON RINFORZO DI FIBRE DI CARBONIO+MALTA CEMENTIZIA SENZA IPN SOLO ALL'INTRADOSO (*)	64	64	nd	nd	nd	FLESSIONE + DELAMINAZIONE	Distacco del composito lato dx	Vi è stato distacco del solo composito, senza interessare il calcestruzzo di intradosso

TRAVE	TIPO DI RINFORZO APPLICATO	CARICO DI ROTTURA TEORICO (2P-KN)	CARICO DI ROTTURA REALE (2P-KN)	CARICO DI ROTTURA SAP 2000 (2P-KN)	CARICO DI ROTTURA PROF. Poluzzi	CARICO DI ROTTURA PROF. Bartoli (con resine epoxy)	TIPO DI ROTTURA	ESAME VISIVO DOPO IL COLLASSO
TT1	TAGLIO-SENZA RINFORZO	65	90	nd	nd	nd	TAGLIO	Lesione importante sul lato sinistro inclinata circa a 45°
TT2	TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE EPOXY	90	112	nd	nd	nd	FLESSIONE+TAGLIO+Rottura calcestruzzo compresso	Formazione di lesioni nella mezzeria+distacco del calcestruzzo compresso
TT2-b	TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE EPOXY	90	111,20	nd	nd	nd	TAGLIO	Rottura fasciatura a taglio lato dx
TT3	TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)	90	112	nd	nd	nd	TAGLIO+Delaminazione	Delaminazione+lesione a circa 45° vicino all'appoggio destro
TT3-b	TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)	90	123,6	nd	nd	nd	TAGLIO	Grossa fessura a 45° lato sinx
TT4	TAGLIO-CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN)+MALTA CEMENTIZIA	72	88	nd	nd	nd	TAGLIO+ Delaminazione fascia verticale	Lesione a circa 45° vicino appoggio sinistro+distacco parte verticale fascia composito
TT4-b	TAGLIO-RIRINFORZATA LA TT1 CON SOLA MALTA CEMENTIZIA	72	107	nd	nd	nd	TAGLIO	Grossa lesione a 45° vicino appoggio sinistro
TT4-bis	TAGLIO-TT1 RIRINFORZATA LA TT1 CON SOLA MALTA CEMENTIZIA	72	123,65	nd	nd	nd	FLESSIONE	Grossa lesione a 45° vicino appoggio sinistro

TRAVI RINFORZATE A FLESSIONE

Per le travi rinforzate a flessione il carico di rottura reale è praticamente in linea con il quello di collasso teorico e con quello della sperimentazione condotta dalla precedente sperimentazione (tranne che per qualche rara eccezione). Occorre però fare attenzione al fatto che la matrice del composito è l'IPN (resina a base acqua) e non la resina epossidica. Peraltro i risultati ottenuti con l'IPN sono, grosso modo, coincidenti a quelli raggiunti con le resine epossidiche. Questo è un grande risultato in quanto le resine epossidiche sono notoriamente le più resistenti a trazione fra le possibili matrici.

Fanno eccezione le travi rinforzate con malta cementizia, con o senza IPN, che hanno dato risultati, in termini di carico di rottura, inferiori a quelli ottenuti con solo IPN, in media del 25% in meno. Ciò significa che la malta cementizia quale matrice è di per sé un elemento di debolezza in termini di resistenza al tiro e, in modo rilevante, riguardo il fenomeno della delaminazione.

TRAVI RINFORZATE A TAGLIO

Per queste travi i risultati delle prove, in termini di carico di collasso, se rinforzate con IPN, i risultati sono mediamente migliori di quelli di calcolo teorici, anche del 20% in più.

Solo in presenza di malta cementizia, accanto all'IPN, si ottengono risultati meno ottimistici.

ANALISI NUMERICHE

ANALISI NUMERICA ESEGUITA
CON IL PROGRAMMA DI CALCOLO AGLI ELEMENTI
FINITI SAP 2000, TESA A VALIDARE I RISULTATI
DELLE PROVE SPERIMENTALI IN TERMINI DI
CONFRONTO DEI CARICHI ULTIMI. INOLTRE SI E'
PROCEDUTO ALLA VALUTAZIONE NUMERICA DELLE
TENSIONI DI INTERFACCIA CLS/FRP, CONFRONTATA
CON I VALORI DESUNTI DALLE CNR DT.

Si tratta di verificare la coerenza dei carichi ultimi delle sperimentazioni con quelli ricavati dalle normative e dall'analisi numerica condotte, sia per travi rinforzate a flessione e a taglio, che per travi non rinforzate.

Inoltre si vogliono indagare le tensioni di interfaccia che si sviluppano fra i rinforzi FRP e il supporto in calcestruzzo.

Caso di studio nr. 1 - Verifica a flessione trave NON rinforzata (f.e.m: "beam")

Caso di studio nr. 2 - Verifica a flessione trave rinforzata (f.e.m: "beam")

Caso di studio nr. 3 - Verifica a flessione trave NON rinforzata (f.e.m: "shell")

Caso di studio nr. 4 - Verifica a flessione trave rinforzata (f.e.m: "shell")

Caso di studio nr. 5 - Verifica a flessione: legame di aderenza cls. - FRP

Caso di studio nr. 6-Verifica a flessione:elementi biella (o shell membranali)

Caso di studio nr. 7 - Verifica a taglio: cerniere plastiche a taglio

Caso di studio nr. 8 - Verifica a taglio: legame di aderenza cls. - frp

Conclusioni

Premesse

Le seguenti analisi numeriche, sono state condotte utilizzando il programma di calcolo agli elementi finiti SAP 2000.

Sono stati svolti diversi casi di studio con il fine ultimo di investigare, oltre i carichi ultimi, anche le tensioni che si sviluppano all'interfaccia fra rinforzo in FRP e il supporto costituito da una trave in c.a.

Per giungere a tale obiettivo sono stati eseguiti inizialmente i **casi di studio da 1 a 4** che riguardano i rinforzi a **FLESSIONE**.

Si sono definiti i diagrammi momento - curvatura per la trave con e senza rinforzo in FRP e sono stati confrontati i momenti e i carichi ultimi teorici forniti dall'elaboratore con i valori ricavati dalle prove sperimentali.

Nel dettaglio i casi di studio 1 e 2 riguardano **l'analisi agli elementi finiti con modelli ad elementi "beam"**. I casi di studio 3 e 4 riguardano l'analisi numerica con elementi di tipo **"shell" non lineari a strati ("shell layered")**, elementi bidimensionali orizzontali lungo l'asse della trave.

Per quanto riguarda i materiali, gli stessi sono ampiamente descritti nel proseguo, mentre **la matrice del composito è la resina a base acqua del tipo IPN, oltreché quella epossidica.**

Le proprietà non lineari degli elementi risultano inserite quindi direttamente attraverso la definizione dei legami dei materiali implementati all'interno del programma di calcolo.

Con il **caso di studio 5**, sempre nell'ambito del **rinforzo a flessione**, si è giunti alla definizione e alla taratura del **legame di aderenza** che si sviluppa all'interfaccia fra rinforzo in FRP e supporto in calcestruzzo.

E' stato dapprima ricavato il **diagramma "τ" - "slip"** secondo i dettami delle CNR DT 200 del 2012.

Si sono poi svolte alcune simulazioni numeriche di confronto con i casi di studio condotti in laboratorio sia nel caso di

rinforzo con FRP e resina a base acqua del tipo IPN che di
rinforzo con FRP e resina epossidica.

La legge di aderenza fra la trave in c.a. e il rinforzo in F.R.P. è stata simulata tramite l'ausilio di opportune molle **"elementi link" non lineari a taglio**, cioè molle che simulano l'adesivo, (implementate nel codice di calcolo SAP 2000). Sono stati realizzati modelli numerici con **elementi "beam"**.

Con il **caso di studio 6** si è concluso il percorso di studio "flessionale" con un semplice ma significativo modello numerico con **elementi tipo "biella"**.

Oltre al modello con elementi "beam" tipo biella è stato realizzato anche un modello con elementi tipo **"shell membranali"**, che lavorano solo all'interfaccia FRP-calcestruzzo.

Si sono ricercati gli sforzi nei vari materiali (definiti come semplici bielle o "shell membranali") e di nuovo effettuati i confronti in termini di carico ultimo, con i risultati di laboratorio.

L'indagine numerica del rinforzo a taglio in fibra di carbonio con resina a base d'acqua del tipo IPN viene articolato nei casi di studio 7 e 8.

Con il **caso di studio 7** si è voluto ricavare il diagramma taglio - scorrimento delle cerniere plastiche nella sezione di appoggio, con un modello numerico con **elementi di tipo "beam"**, che simulasse il comportamento sperimentale **" a taglio"** della trave.

Il modello numerico è stato sviluppato incrementando il carico massimo fino al valore di prova; questo è servito per indagare "localmente" nella sezione in cui si forma la cerniera plastica, sull'andamento dello scorrimento in funzione del taglio agente nella sezione stessa.

In appendice a tale caso di studio viene poi riportato, come ulteriore confronto, il calcolo e verifica del rinforzo a taglio in FRP condotto secondo le CNR DT 200 del 2012.

Infine nel **caso di studio** denominato **8** è stato indagato il **legame di aderenza**, nell'ambito del **rinforzo a taglio**, che si sviluppa all'interfaccia rinforzo in FRP a taglio (realizzato con fasce ad "U") e supporto in calcestruzzo.

In particolare si sono svolte simulazioni numeriche di confronto con gli analoghi casi di studio condotti in laboratorio nel caso di rinforzo con FRP e resina a base acqua.




La trave in c.a. e le fasce di tessuto in FRP sono state modellate con elementi **"shell di tipo "membranali"** che lavorano solo nel piano dell'interfaccia.

La legge di aderenza fra la trave in c.a. e il rinforzo in FRP è stato simulato tramite l'ausilio di opportune molle **"elementi link" non lineari a taglio**.

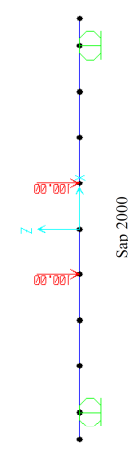
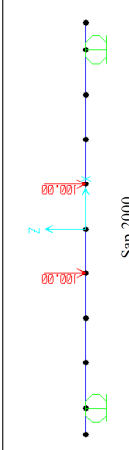
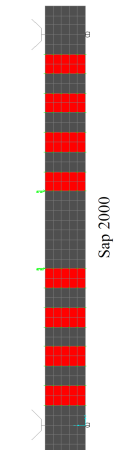
Infine sono riportate due significative tabelle che descrivono sinteticamente i modelli numerici e le principali risultanze delle analisi svolte.

Ogni capitolo ripercorre in dettaglio i casi di studio svolti; all'inizio di ogni capitolo, per maggior chiarezza espositiva, vengono riportati una sintesi e una tabella riepilogativa che descrive le principali caratteristiche del modello in esame e i risultati principali.

TABELLA DELLE ANALISI NUMERICHE CONDOTTE SU TRAVI IN CEMENTO ARMATO RINFORZATE E NON RINFORZATE CON MATERIALI COMPOSITI
FLESSIONE

	Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Carico di Rottura Analisi numerica 2P (kg)	Carico di Rottura Reale 2P (kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kg m)	Tensione di delaminazione (kg/cm ²)	Legame di aderenza t _{max} (kg/cm ²)	Scorrimento (corrisp.) (mm)
↑	Calcolo analitico	excel	Calcolo del diagramma momento curvatura (FORMULE DEL FIB)	-	-	756	-	-	-
	Elementi beam senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare (caso di studio 1)	2246	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	842	-	-	-
Obiettivo delle analisi numeriche: Perla trave in c.a. con e senza rinforzo FLESSIONE	Elementi shell (piastre) a strati verticali di materiale senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. (caso di studio 3)	2532	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	950	-	-	-
	Elementi biella Senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. (caso di studio 6.1)	2266	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	850	-	-	-
↓	Elementi shell membranali Senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. (caso di studio 6.2)	2276	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	853	-	-	-
	Elementi beam con rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare FRP con modellato come tondino di area equivalente (caso di studio 2)	8120	7400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	3045	-	-	-
Obiettivo delle analisi numeriche: (resina a base acqua e resina epossidica FLESSIONE)	Elementi shell (piastre) a strati verticali di materiale con rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. FRP modellato come singolo strato della piastra. (caso di studio 4)	7540	7400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	2827	7640	-	-
	CNR (DT 200 del 2012)	excel	Calcolo del diagramma "r-scorrimento"	-	-	-	6740	27,9	0,025
Obiettivo delle analisi numeriche: (resina a base acqua e resina epossidica FLESSIONE)	Elementi beam + molle a taglio non lineari che simulano l'adesivo costituito da resina a base acqua		Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi beam Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi beam (caso di studio 5)	7280	7400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	2730	7500	37	0,030
	Elementi beam + molle a taglio non lineari che simulano l'adesivo costituito da resina epossidica		Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi beam Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi beam (caso di studio 5)	8466	8400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE EPOSSIDICHE)	3175	7500	39	0,033

**TABELLA DELLE ANALISI NUMERICHE CONDOTTE SU TRAVI IN CEMENTO ARMATO
RINFORZATE E NON RINFORZATE CON MATERIALI COMPOSITI**
TAGLIO

	Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Taglio di rottura reale (Carico di Rottura Reale "2P") (kg)	Taglio resistente Analisi numerica (kg)	Legame di aderenza T _{max} (kg/cm ²)	Scorrimento (corrisp.) (mm)
<p>← Obiettivo delle analisi numeriche: → ricavare il taglio resistente Perla trave in c.a. con e senza rinforzo</p> <p style="text-align: center;">TAGLIO</p>	Elementi beam con cerniere plastiche localizzate a taglio senza rinforzo a taglio		Analisi statica non lineare. Le cerniere plastiche a taglio sono zone plastiche concentrate disposte in SEZIONI alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico (caso di studio 7)	4500 (2P = 9000) (TT1 - TAGLIO-SENZA RINFORZO)	1) 4500 2) -	-	-
	Elementi beam con cerniere plastiche localizzate a taglio con rinforzo a taglio in fasce ad "u" in FRP		Analisi statica non lineare. Le cerniere plastiche a taglio sono zone plastiche concentrate disposte in SEZIONI alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico (caso di studio 7)	5600 (2P = 11200) (TT3 - TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	1) 5500 2) -	-	-
<p>← Obiettivo delle analisi numeriche: → ricavare il diagramma forza-scorrimento (resina a base acqua</p> <p style="text-align: center;">TAGLIO</p>	CNR (DT 200 del 2012). Trave rinforzata a taglio con fasce ad "u" in FRP	excel	Calcolo del taglio resistente con fasce ad "u" in frp di rinforzo. Calcolc del diagramma "r-scorrimento"	5600 (2P = 11200) (TT3 - TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	1) 5786 2) 5376	27,9	0,025
	Elementi shell (lastre) membranali (sono elementi che lavorano solo per azioni nel loro piano) + molle a taglio non lineari che simulano l'adessivo costituito da resina a base acqua		Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi shell membranali Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi shell membranali (caso di studio 8)	5600 (2P = 11200) (TT3 - TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	-	31	0,026

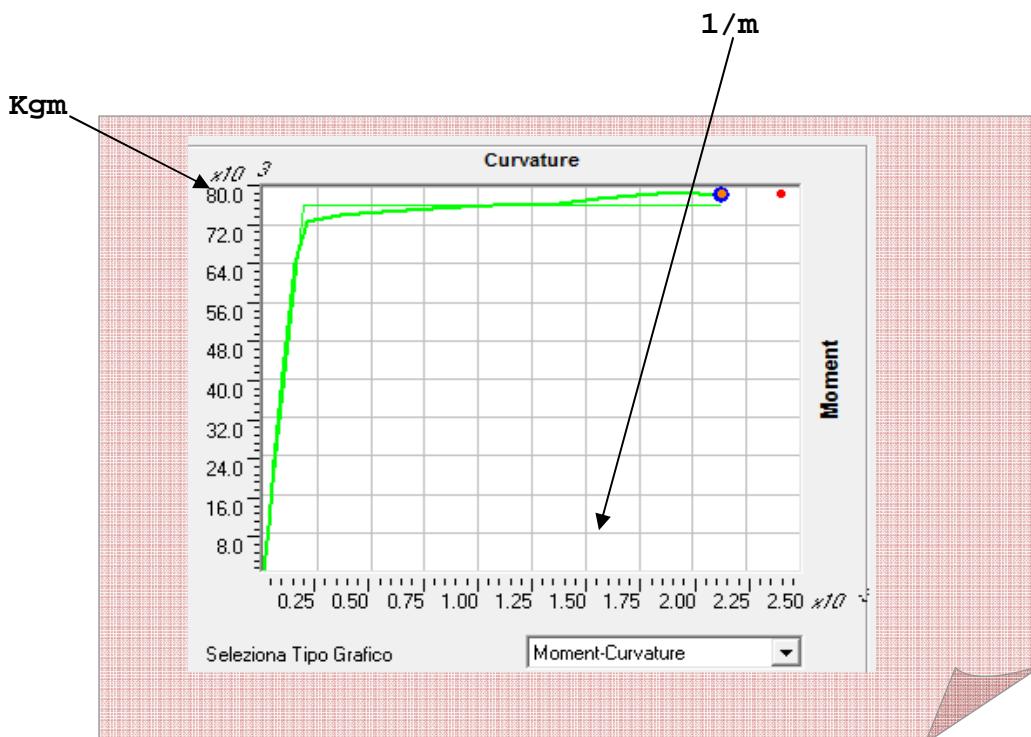
1. Caso di studio nr. 1 - RINFORZO A FLESSIONE: trave TF0 NON rinforzata (f.e.m: "beam")

IPOTESI:

- Trave in c.a. senza rinforzo a flessione modellata con elementi finiti tipo "beam".
- Definita la geometria, i materiali e i relativi legami costitutivi (calcestruzzo e acciaio),

il codice di calcolo (SAP 2000) fornisce in automatico

il diagramma momento curvatura della sezione in c.a.



Il programma incrementa con successivi step il carico applicato alla trave (di 100 Kg alla volta nei due punti di applicazione) fino a raggiungere il valore del momento ultimo resistente della trave.

RISULTATI

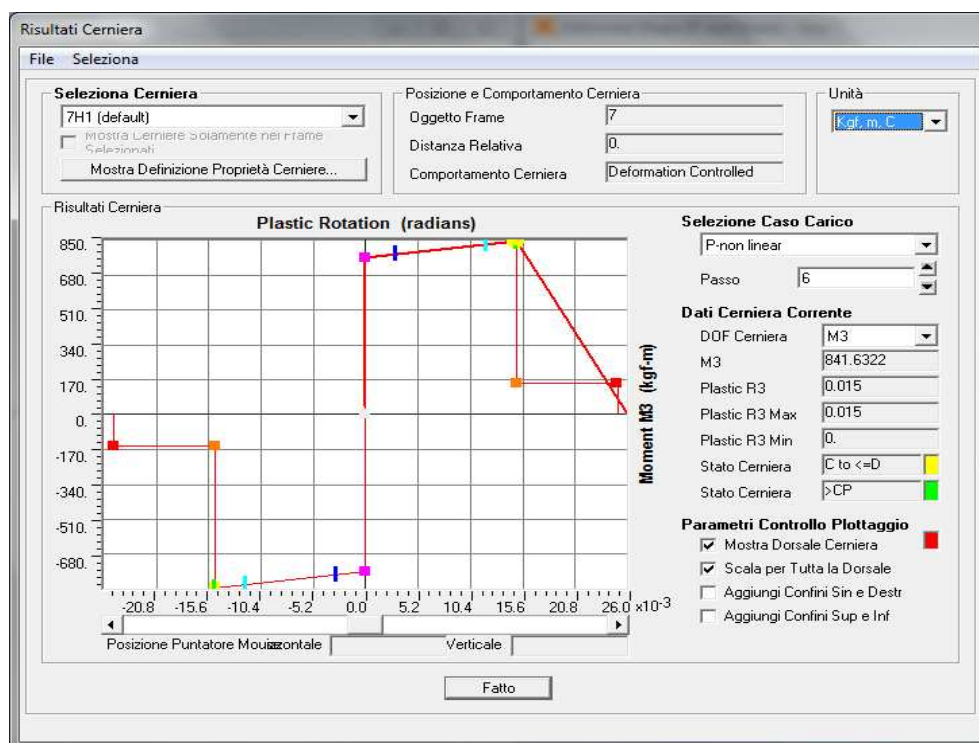
Si ricava quel particolare valore della forza applicata per il quale si raggiunge il momento ultimo resistente della sezione più sollecitata (formazione della cerniera plastica).

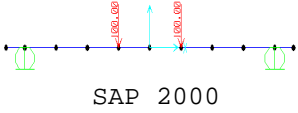
Tale valore di momento flettente ultimo, pari a 842 Kg m, si ha in corrispondenza del carico pari a 1123 Kg (carico P).

Si riporta per maggior chiarezza espositiva, a pag. 218, una tabella sintetica che descrive le principali caratteristiche del modello in esame e i risultati salienti. Successivamente viene riportata, nei dettagli, l'analisi svolta per il caso di studio in esame.

- Il valore di forza applicata per il quale si raggiunge il valore ultimo di momento resistente della sezione, trova conferma nella prova precedentemente condotta.
- Risultati analisi statica non lineare: **diagramma**

" Momento flettente - rotazione cerniera plastica"

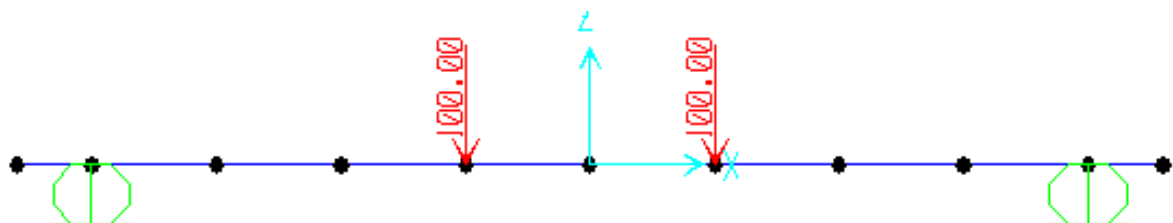


MODELLO ANALITICO (FORMULE DEL F.I.B.) E MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "BEAM"					
Obiettivo del caso di studio nr.1: ricavare il carico e il momento di rottura per la trave in c.a. SENZA rinforzo a FLESSIONE					
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Carico di Rottura <u>Analisi numerica</u> 2P (kg)	Carico di Rottura <u>Reale</u> 2P (kg)	Momento di Rottura <u>Analisi numerica</u> (kg m)
Calcolo analitico	excel	Calcolo del diagramma a momento curvatura (FORMULE DEL FIB)	-	-	756
Elementi beam senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare (caso di studio 1)	2246	2200 (TF0 - flessione e trave non rinforzata)	842

SVILUPPO DETTAGLIATO ANALISI NUMERICA

IPOTESI:

• Nel presente capitolo viene analizzata la trave in c.a. senza rinforzo a flessione modellata con elementi finiti tipo "beam" (= elementi trave). Il codice di calcolo utilizzato è il programma agli elementi finiti SAP 2000.



• Definita la geometria, i materiali con i relativi legami non lineari costitutivi (calcestruzzo e acciaio), il programma di calcolo (SAP 2000) fornisce in automatico il diagramma momento curvatura della sezione in c.a.

- Nell'analisi svolta il programma incrementa con successivi step il carico applicato alla trave (carico P ovvero $2 \cdot P$) fino a raggiungere il valore del momento ultimo resistente della trave.

RISULTATI:

- Si ricava quel particolare valore della forza applicata per la quale si raggiunge il momento ultimo resistente della sezione più sollecitata (è il valore del momento flettente per il quale si forma nella sezione la cerniera plastica).

Tale valore di momento flettente ultimo, pari a 842 Kg m, si ha in corrispondenza del carico pari a 1123 Kg (carico P).

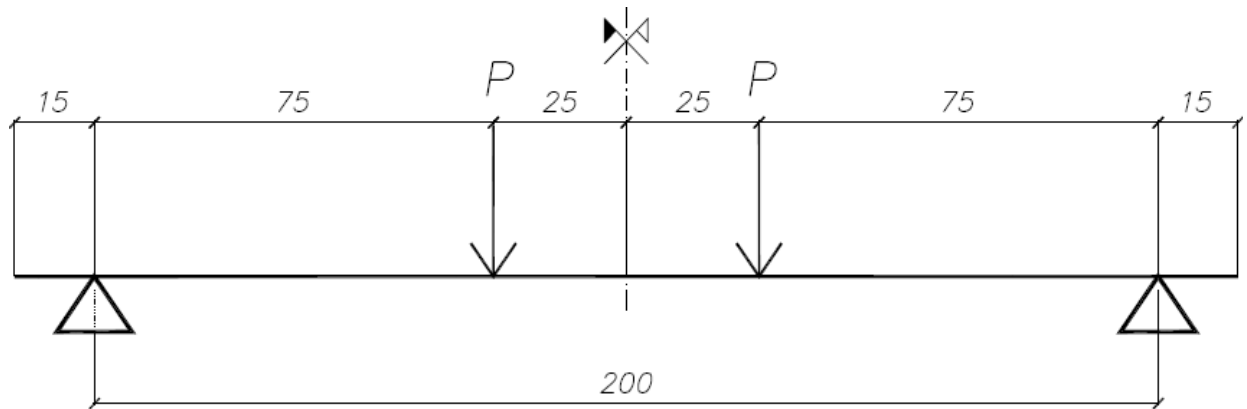
- Il valore di forza applicata (sopra descritto) per il quale si raggiunge il valore ultimo di momento resistente della sezione, trova conferma nella prova precedentemente.

- Si confronta inoltre il diagramma momento curvatura ottenuto con il programma agli elementi finiti SAP 2000, con quello ottenuto con un semplice foglio excel (determinazione del grafico Momento-Curvatura secondo le formule del capitolo "Duttilità di strutture in c.a." del Corso di Tecnica delle Costruzioni tenuto dal Prof. Luca Landi DISTART-Tecnica delle Costruzioni-Università di Bologna).

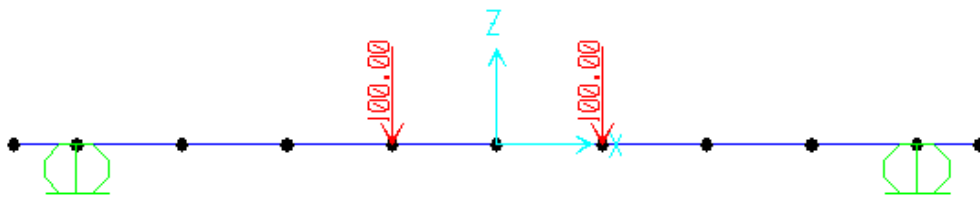
Come si evince dal confronto fra i due diagrammi Momento-Curvatura, il valore del M_u ottenuto con Excel è pari a circa 800 Kg m, mentre quello che si ha con il programma SAP 2000 è pari a circa 842 Kg. La differenza è del 5%

Vengono definiti i diagrammi momento - curvatura per la sezione con e senza rinforzo in FRP e vengono confrontati i momenti e carichi ultimi teorici forniti dall'elaboratore con i valori ricavati dalle prove sperimentali.

TRAVE ARMATA CON SOLI 2Ø8 SUP E 2Ø8 INF.

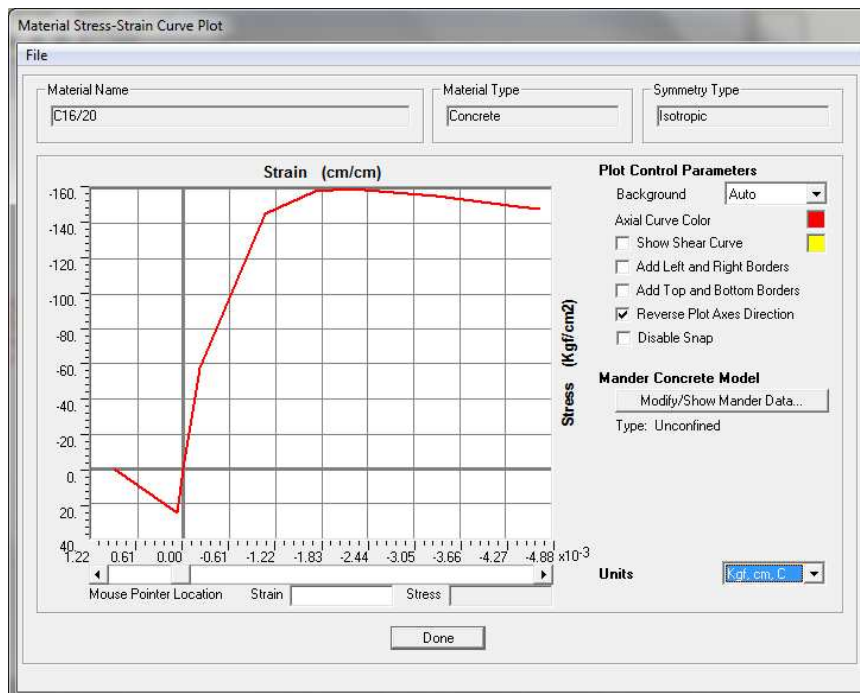


schema statico e geometria (misure in cm)



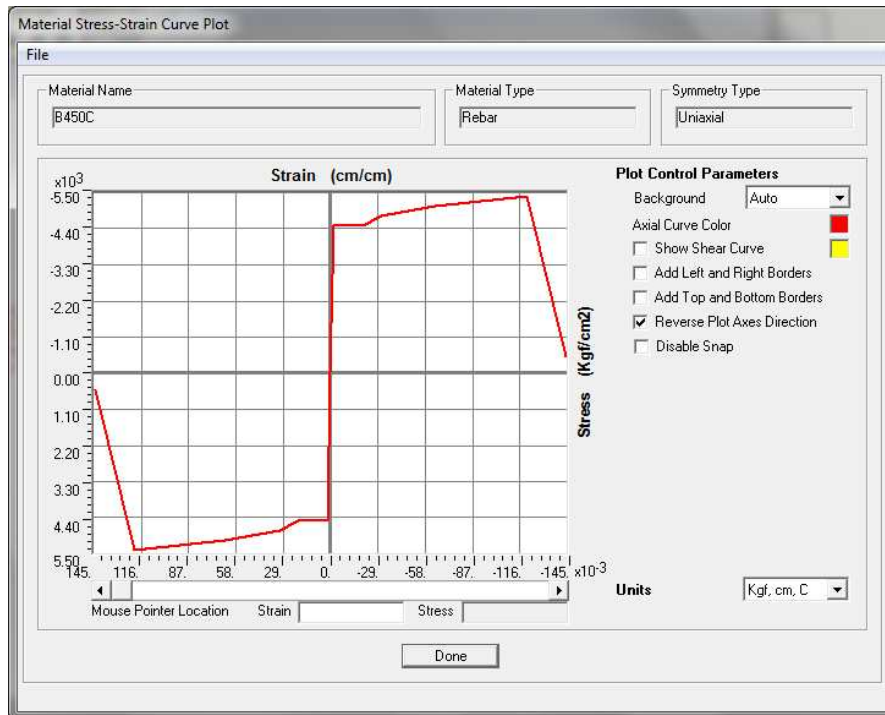
modello fem

Calcestruzzo C16/20



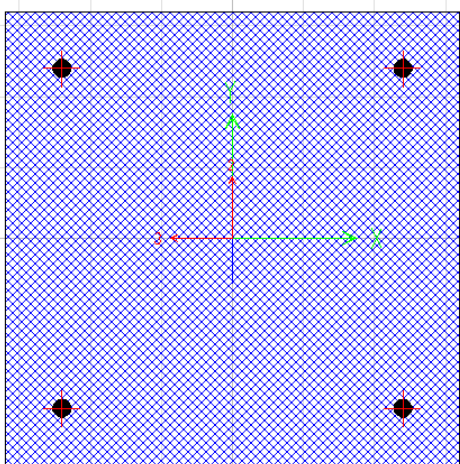
**Legame costitutivo calcestruzzo
Acciaio B450C**

Unità di misura: Kg/cm²



Legame costitutivo acciaio

Unità di misura: Kg/cm²



Sezione in C.A. 20 x 20 cm

Si riportano, per confronto, il diagramma momento - curvatura ottenuto con il programma agli elementi finiti SAP 2000 e quello ottenuto con semplici calcoli con un foglio Excel appositamente redatto.

2014-11-11 rev

diagramma momento curvatura di sez rettangolare in c.a. Con armatura semplice

materiali

calcestruzzo classe	fck=	160 kg/cmq	Rck =	200 kg/cmq	$\gamma_c =$	1,5
	fc _m = fck + 8	=	240 kg/cmq	resistenza cilindrica media a compressione del cls		
	fc _{tm} = 0,3 * fck ^ (2/3)	=	19,05 kg/cmq	resistenza media del cls a trazione semplice		
	fct _{fm} = 1,2 * fc _{tm}	=	22,86 kg/cmq	resistenza media del cls a trazione x flessione		
	fct _{fk} = 0,7 * fct _{fm}	=	16,00 kg/cmq	resistenza caratteristica del cls a trazione x flessione		
	fct _{fd} = fct _{fk} /Gamma _c	=	10,67 kg/cmq	resistenza di design del cls a trazione x flessione		
E _{cm} = mod.elas medio cls	=	286079 kg/cmq	modulo elastico Istantaneo medio del cls			
			E _{cm} = 22000 * (f _{cm} /10)^(0,3)			

Acciaio da c.a.

fy _k	=	4500 kg/cmq	resistenza caratteristica di snervamento acciaio
fy _t	=	5400 kg/cmq	resistenza caratteristica a rottura acciaio
E _{s_} elastico	=	2100000 kg/cmq	

sezione rettangolare

b = base	cm	20,0
h = altezza totale	cm	20,0

copriferro all'asse toni inf.	=	2,50 cm	
As = area tot toni inf	=	1,00 cm ²	(2φ8)

per costruire il diag momento curvatura debbo trovare alcuni punti significativi

1 - fase e l a s t i c a

n = rapporto mod.elas acciaio e cls

siamo in fase elastica

E _{s_} elastico =	2100000 kg/cm ²	
E _{c_} elastico =	286079 kg/cm ²	siamo in fase elastica, uso il E _{elas_} ISTANTANEO_iniziale_cls
n = E _{steel} /E _{cls}	=	7,34

area ideale = b * h + n * A _{steel}	=	407,34 cm ²	
mom.stat.ID rispetto bordo inferiore =		4018,35 cm ³	b x h ² /2 + n x As x c
baricentro sez. interam reag		9,865 cm	rispetto al bordo inf YG = (Mstatico / Aideale)

momento d'inerzia sez ideale interamente reagente

J_{ci} = b * h³/12 + n * A_s * (h/2 - c)² + b * h * (h/2 - yG)² = 13753,55 cm⁴

MOMENTO di prima fessurazione = sigma_TRAZ * Jci / yG = M_{cr} kg*cm

a seconda di che valore usiamo della resistenza a trazione per flessione abbiamo :

resistenza di design del cls a trazione x flessione	fct _{fd} =	10,67 kg/cm ²	>>>	14872
resistenza caratteristica cls a trazione x flessione	fct _{fk} =	16,00 kg/cm ²	>>>	22309
resistenza media del cls a trazione x flessione	fct _{fm} =	22,86 kg/cm ²	>>>	31869

adottiamo la resistenza di design (resistenza più bassa)

adottiamo fct_{fd} 10,67 per cui calcoliamo M_{cr} = mom. Di prima fessuraz = kg*cm 149 kg*m

ne consegue la CURVATURA di prima fessurazione
M_{cr} = fct_{fd} x Jc / Yg
χ_{cr} = 1 / R_{curvatura}

χ_{cr} = M_{cr} / (E * J) = 0,00000004

2 - il cls e' fessurato e l'acciaio inizia a snervarsi cioe' l'acciaio teso è snervato

cls compresso in campo elastico

$\rho = \% \text{ geometrica di armatura} = A_s / (b \cdot d) =$	0,0028571	
$n = E_s / E_c =$	7,34	... Il cls e' ancora nel ramo ascendente della curva $\sigma - \varepsilon$... ?
$\zeta_y = x/d = \text{formula appunti prof.} =$	$(\rho \cdot n)^2$	0,000440
	$2 \cdot \rho \cdot n$	0,041946
	$\rho \cdot n$	0,020973
$\zeta_y = x/d = \text{formula appunti prof.} =$	0,184906	$\zeta_y = [(\rho \cdot n)^2 + 2 \cdot \rho \cdot n]^{1/2} - \rho n$
$x = \text{profondità asse neutro} = \zeta_y \cdot d =$	3,236 cm	$n = E_s / E_c$
		$\rho = \% \text{ geometrica di armatura}$
$\varepsilon_y = \text{snervam acc.} = f_{yk} / E_s$	0,002143	
$\chi_y = \text{curv allo snervam acc.} = \varepsilon_y / (d-x) =$	0,00015023	
$M_y = \chi_y \cdot E \cdot J$		
$J = \text{mom di inerzia sez parzializz., adesso} =$	$b \cdot x^3 / 3 + n \cdot A_s \cdot (d-x)^2 =$	2050,09 cm ⁴
$\varepsilon_{c_elastico} =$	286079 kg/cm ²	
per cui otteniamo	$M_y = \chi_y \cdot E \cdot J =$	881 kg*m momento di snervamento

3 - SLU- condizione ULTIMA. . . M_u cioe' acciaio teso snervato

cls compresso a rottura

$f_{yk} =$	4500 kg/cm ²
$f_{ck} =$	160 kg/cm ²
$R_o = \% \text{ geometrica di armatura} = A_s / (b \cdot d) =$	0,0028571
ipotesi $\beta \cdot f_c = 0,80 \cdot f_c$	
cioe' $\beta = 0,80$	
$\zeta_u = \rho \cdot f_y / (0,8 \cdot f_c) =$	0,10045 deformazione allo S.L.U.
$\xi_{slu} =$	$\zeta_u \cdot d =$ 1,758 cm
ipotesi $\beta_{2/2} = 0,40$	
$M_{slu} = A_s \cdot f_{yk} \cdot d \cdot (1 - \zeta_u / 2 \cdot \beta) =$	
$=$	$A_s \cdot f_{yk} \cdot d \cdot (1 - 0,40 \cdot \zeta_u) =$ 756 kg*m
$\varepsilon_{cu} =$	0,0035 NTC'08
$\chi_{slu} =$	$\varepsilon_{cu} / (\zeta_u \cdot d) =$ 0,00199111 curvatura allo slu

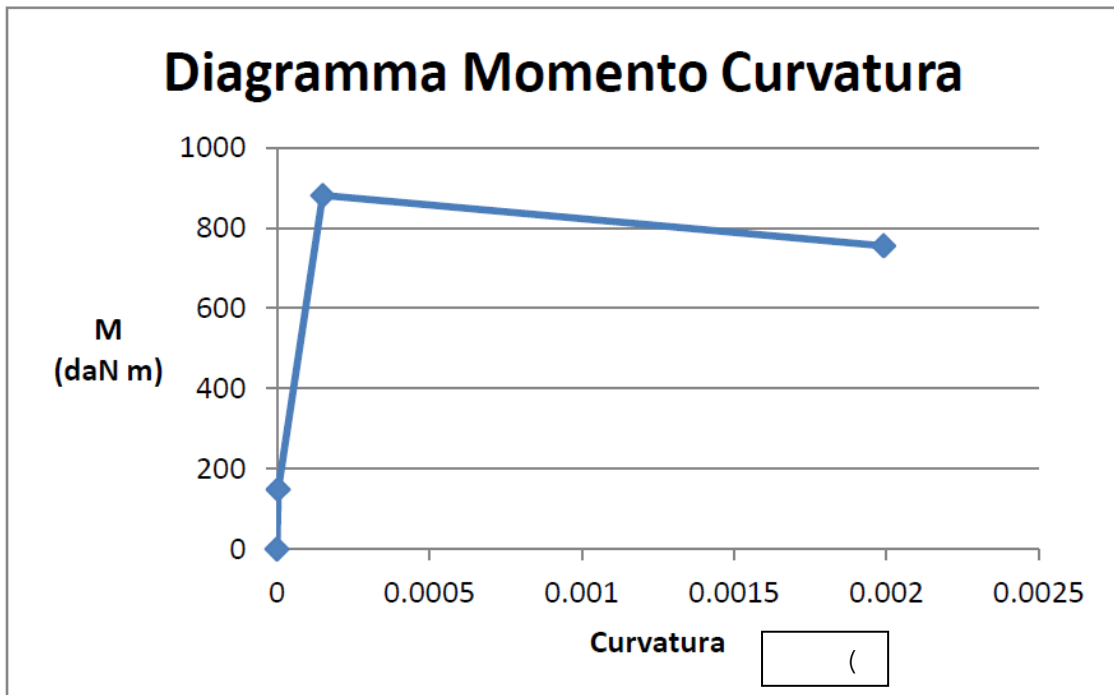


Diagramma ottenuto con il precedente programma EXCEL

Il momento di 1^a fessurazione si ha per $M < 200 \text{ Kg m}$ ($1 \text{ daN} = 1 \text{ Kg}$)

Lo snervamento si ha per $M > 800 \text{ daN m}$

Allo SLU il M è circa = 756 Kg m

Diagramma linearizzato

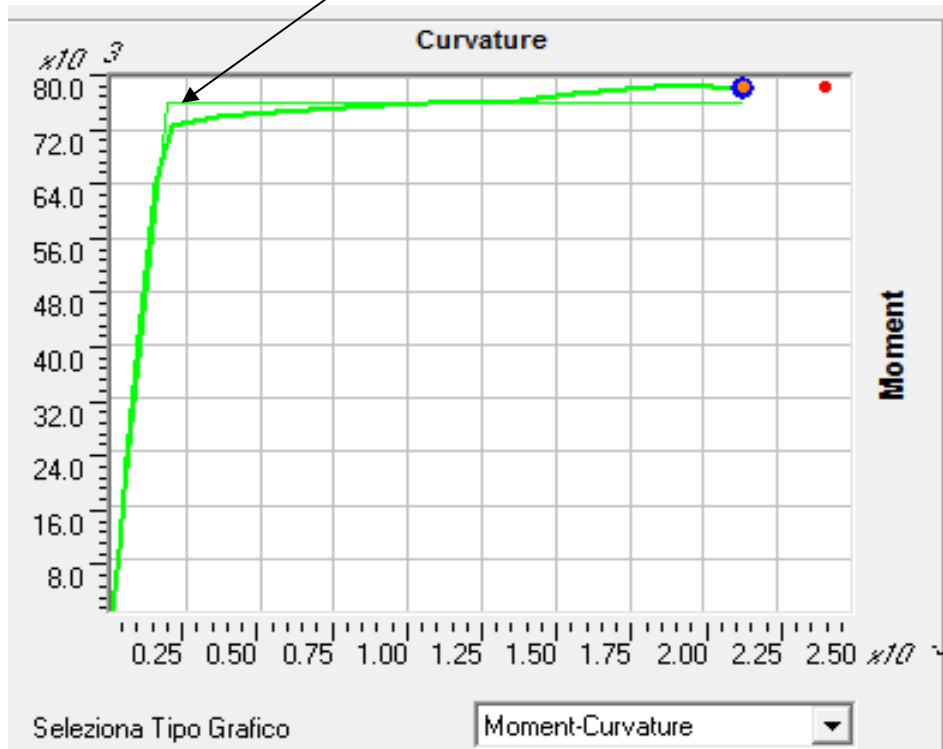
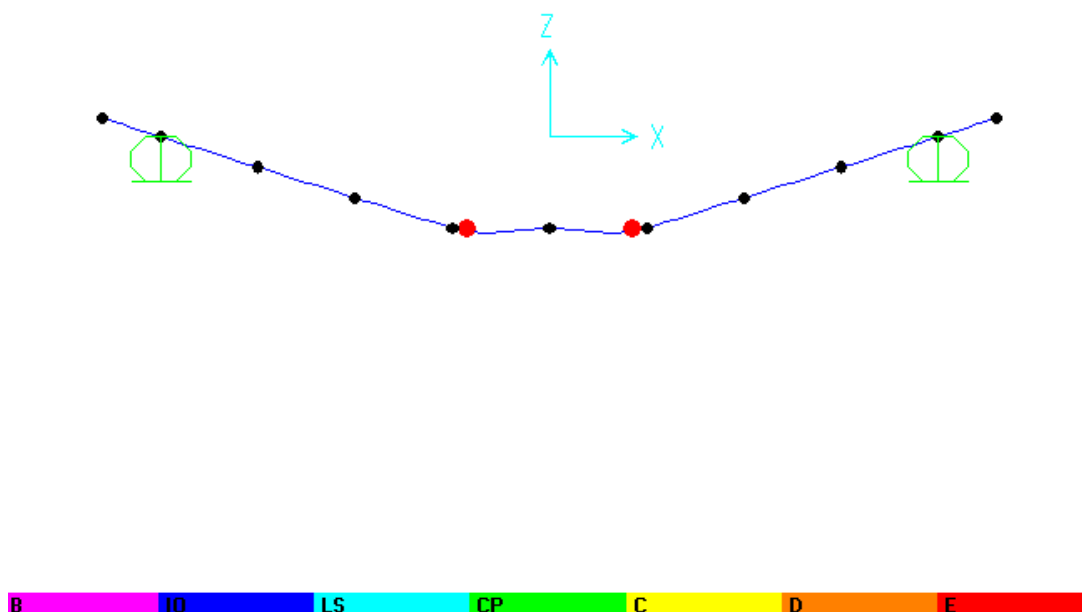
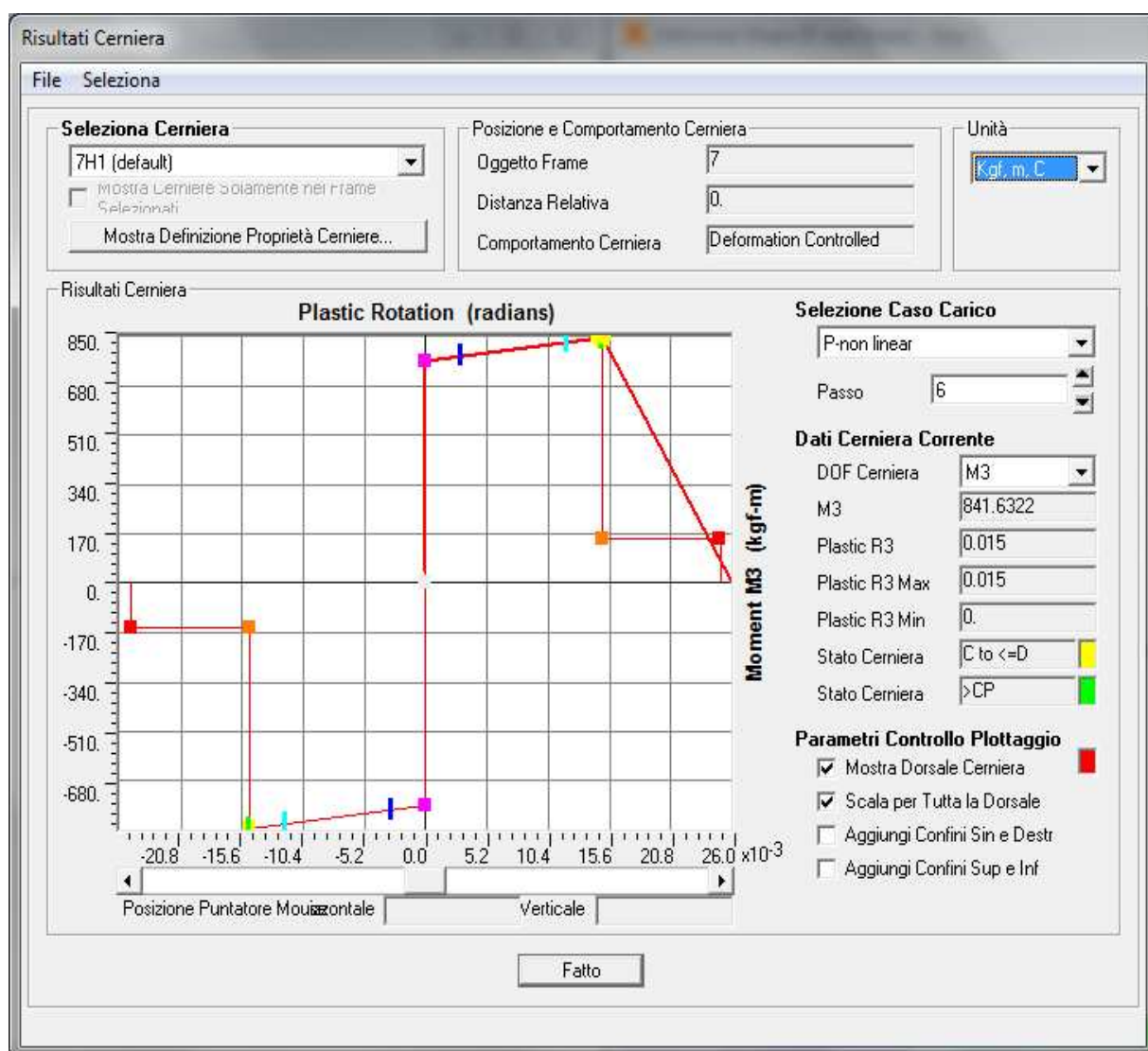


Diagramma momento-curvatura fornito dal SAP 2000

Come si evince dal confronto fra i due diagrammi momento-curvatura, il valore del μ ottenuto con Excel è pari a 800 Kg m, mentre quello che si ha con il programma SAP 2000 è pari a circa 840 Kg. La differenza è del 5%.

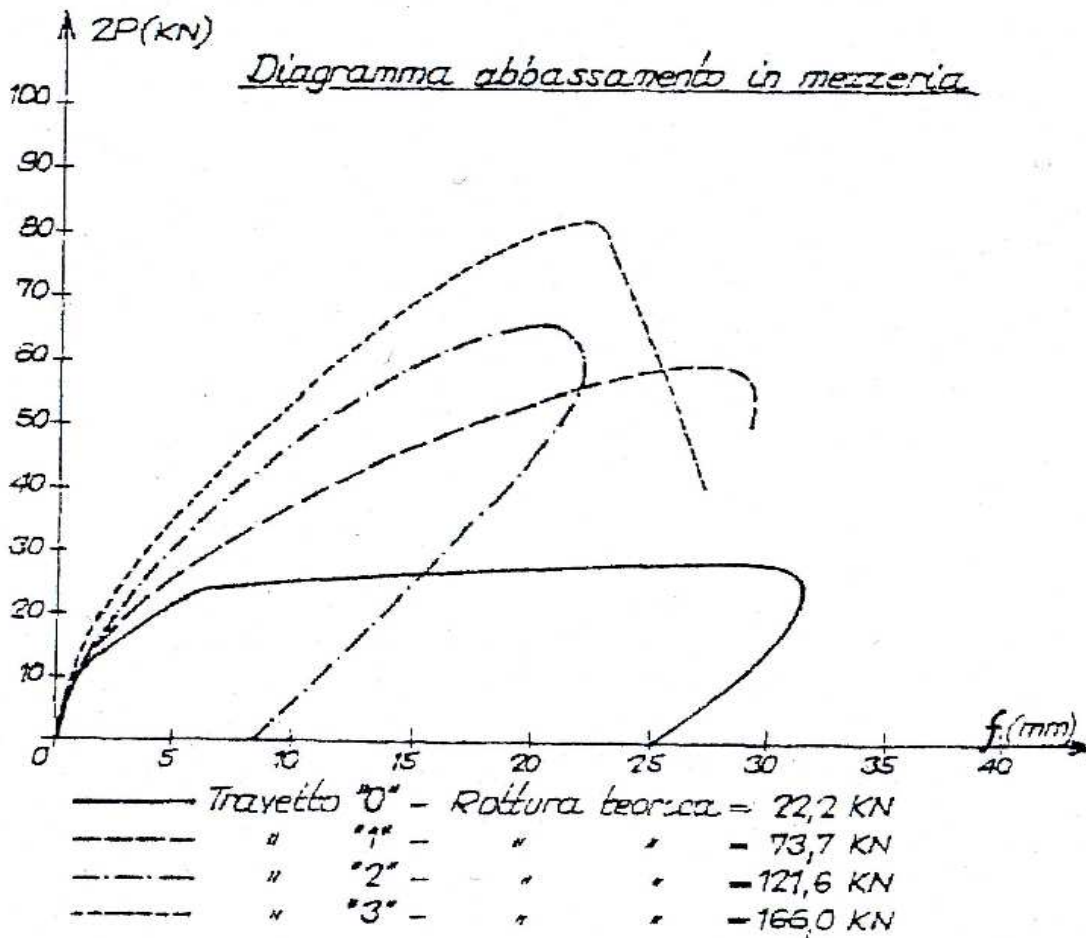
Risultati analisi statica non lineare: **deformata e formazione delle cerniere plastiche**





**Risultati analisi statica non lineare:
diagramma Momento -rotazione cerniera plastica**

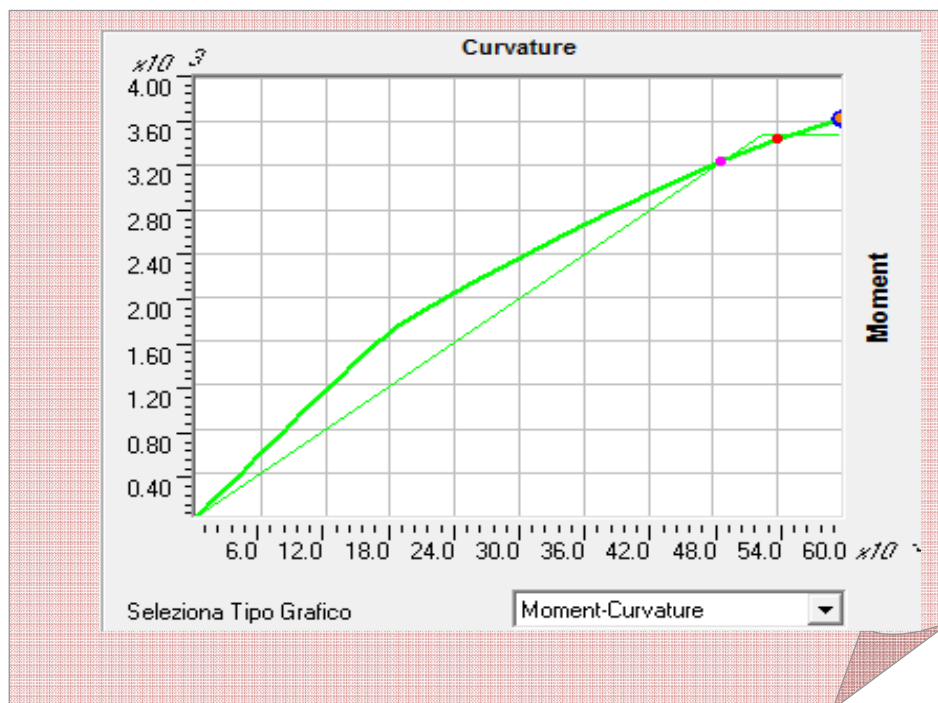
Come si evince dal diagramma sopra riportato la formazione della cerniera plastica avviene per un valore del momento flettente pari a 683 Kg m (punto di colore viola), che corrisponde ad una forza applicata pari a $683/0,75 = 910 \text{ Kg} (= P)$. Il momento ultimo risulta pari a 842 Kg m (punto di colore giallo), che corrisponde ad una forza applicata pari a $842/0,75 = 1123 \text{ Kg} (= P)$. E questo trova conferma nella prova condotta precedentemebnte.(Vedi grafico sotto riportato).



2. Caso di studio nr. 2 - RINFORZO A FLESSIONE: TRAVE TF1
rinforzata con resine IPN (f.e.m: "beam")

IPOSTESI:

- Viene analizzata la trave in c.a. rinforzata all'intradosso con strisce di FRP e modellata con elementi finiti tipo "beam".
- Diagramma momento curvatura della sezione in c.a. rinforzata



RISULTATI:

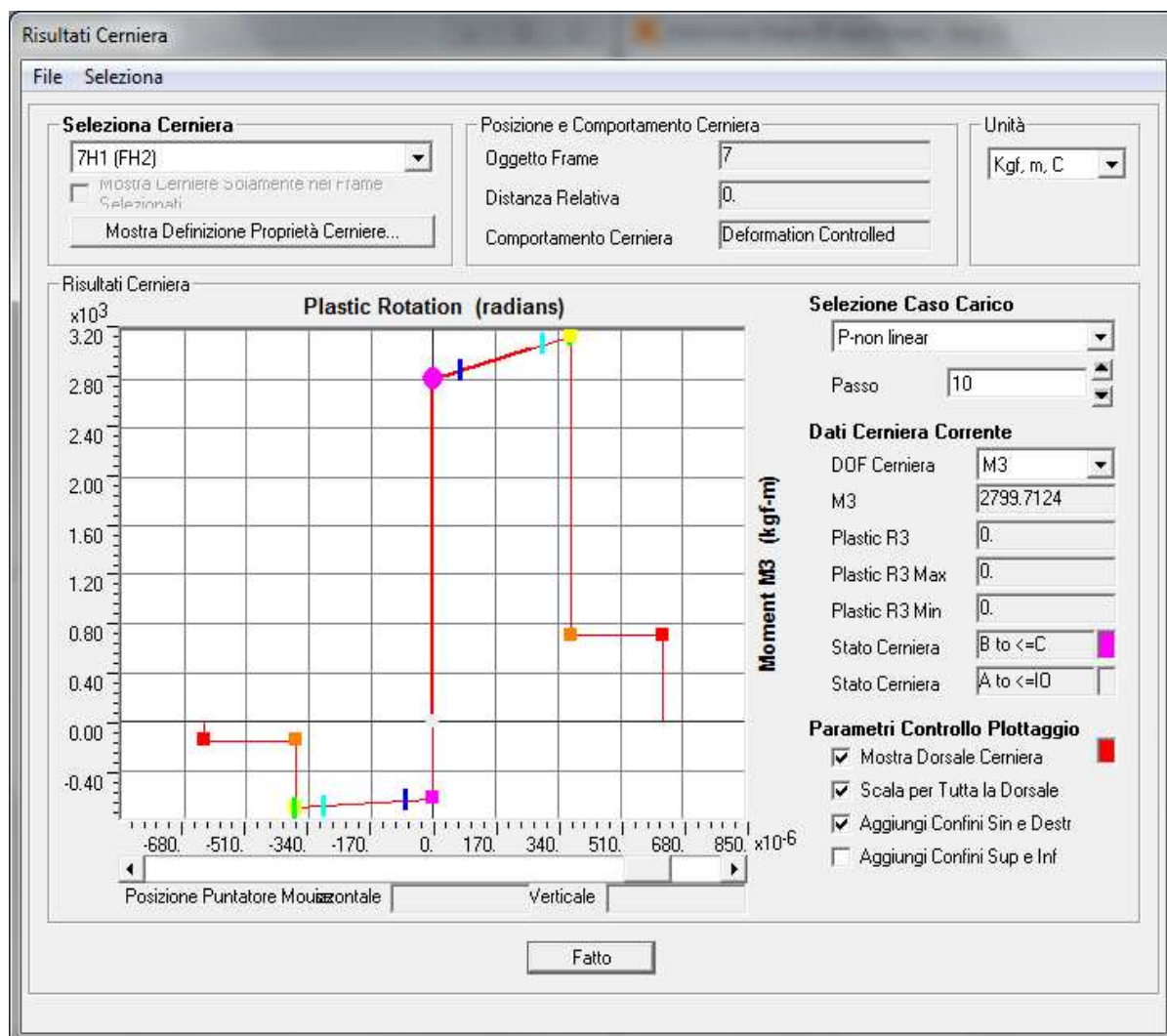
- Si ricava quel particolare valore della forza applicata per il quale si raggiunge il momento ultimo resistente della sezione più sollecitata (formazione della cerniera plastica).

Tale valore di momento flettente ultimo, che risulta pari

a 3045 Kg m, si ha in corrispondenza del carico pari a 4060 Kg.

- Confrontando i risultati numerici (SAP 2000) con i risultati delle prove di laboratorio si ha una differenza in termini di

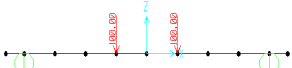
carico ultimo pari a circa l'8%: il carico 2P teorico è pari a 8120 kg ($4060 \cdot 2$), il carico sperimentale è pari a 7400 kg.



Risultati:

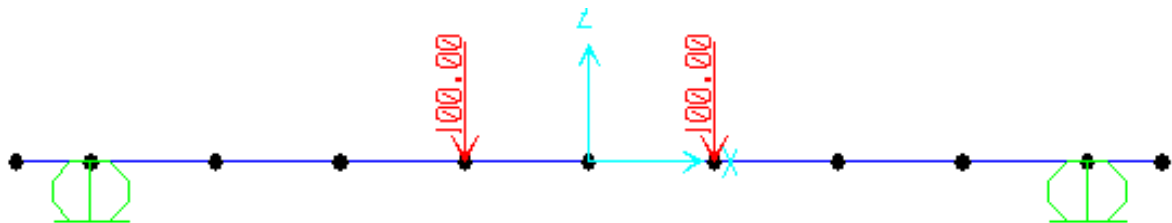
analisi statica non lineare: **diagramma " Momento flettente-rotazione cerniera plastica"**

SVILUPPO DETTAGLIATO ANALISI NUMERICHE

MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "BEAM"					
Obiettivo del caso di studio nr.2: ricavare il carico e il momento di rottura per la trave in c.a. <u>CON</u> rinforzo a <u>FLESSIONE</u>					
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione e analisi	Carico di Rottura <u>Analisi numerica</u> 2P (kg)	Carico di Rottura <u>Reale</u> 2P (kg)	Momento di Rottura <u>Analisi numerica</u> (kg m)
Elementi beam con rinforzo a flessione	 SAP 2000	Analisi statica non lineare FRP con modellato come tondino di area equivalente (caso di studio 2)	8120	7400 (TF1 - flessione-rinforzata con fibre di carbonio +resine a base acqua (IPN))	3045

IPOTESI:

- Nel presente capitolo viene analizzata la trave in c.a. rinforzata all'intradosso con strisce di FRP e modellata con elementi finiti tipo "beam" (= elementi trave).



- Definiti la geometria, i materiali con i relativi legami costitutivi non lineari (calcestruzzo, acciaio e FRP), il programma di calcolo (SAP 2000) fornisce in automatico il diagramma momento curvatura della sezione in c.a.

- Nell'analisi svolta il programma incrementa con successivi step di carico il carico applicato alla trave (carico P ovvero 2·P) fino a raggiungere il valore del momento ultimo resistente della trave.

- Il rinforzo costituito da strisce di FRP viene modellato come una armatura aggiuntiva di area equivalente, posta all'intradosso della trave. (L'equivalenza fra aree di acciaio e aree di

composito, costituisce l'approssimazione del presente metodo di calcolo)

RISULTATI:

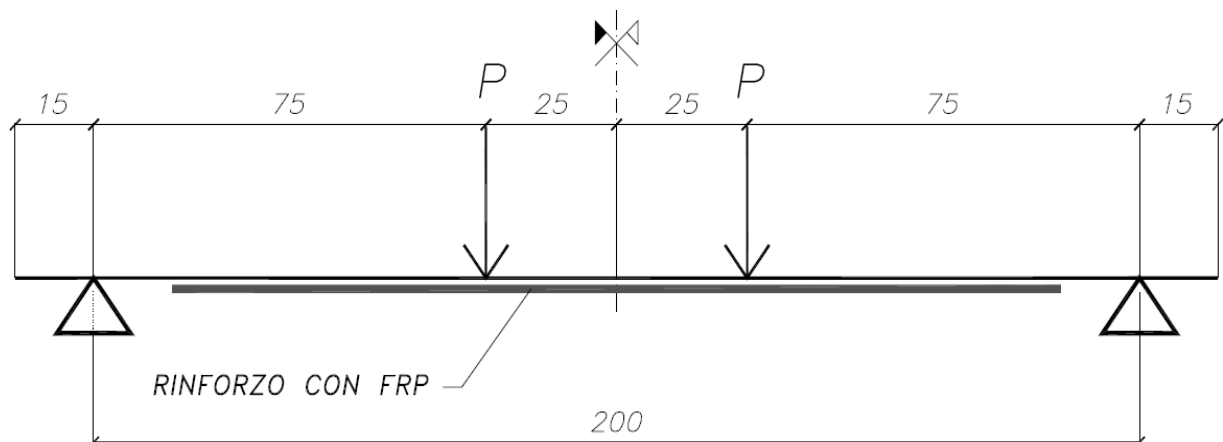
- Si ricava quel particolare valore della forza applicata per la quale si raggiunge il momento ultimo resistente della sezione più sollecitata (è il valore del momento flettente per il quale si forma nella sezione la cerniera plastica).

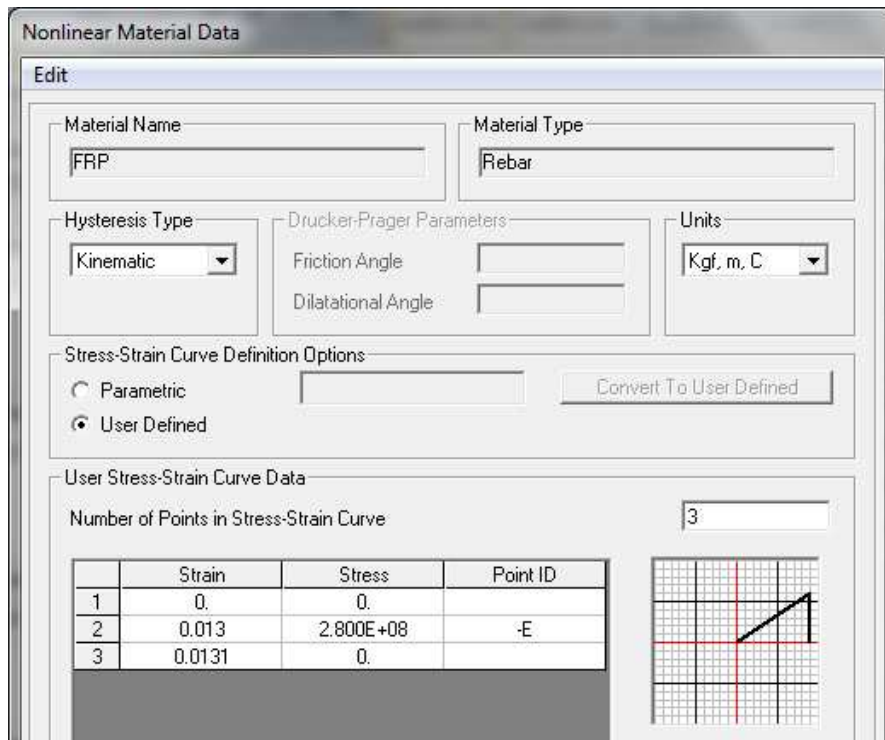
Tale valore di momento flettente ultimo, che risulta pari a 3045 Kg m, si ha in corrispondenza del carico pari a 4060 Kg (carico P).

- Confrontando i risultati numerici (SAP 2000) con i risultati delle prove di laboratorio si ha una differenza in termini di carico ultimo pari a circa l'8%: il carico 2P teorico è pari a 8120 kg ($4060 \cdot 2$), il carico sperimentale è pari a 7400 kg.

Il **secondo caso di studio** consiste sempre in una analisi statica non lineare considerando questa volta la trave rinforzata con strisce di FRP all'intradosso.

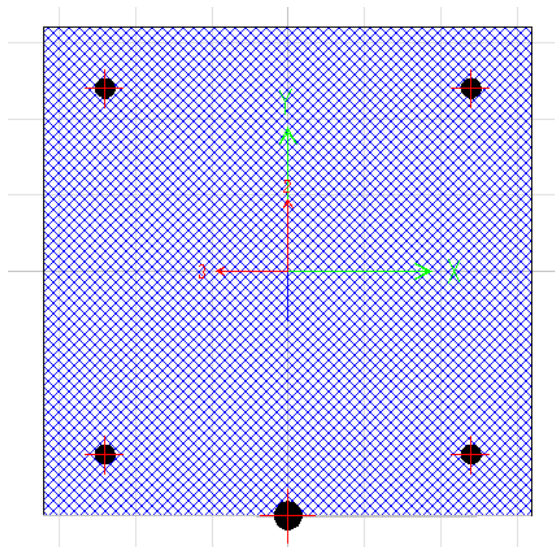
TRAVE ARMATA CON 2Ø8 SUP E 2Ø8 INF. + RINFORZO IN FRP





Legame costitutivo FRP

Il carico parte da 0, poi cresce fino ad ottenere una tensione di $2.8 \cdot E8$ Kg/mq, poi raggiunto il valore di deformazione ultima, la tensione scende fino a 0.



$$A_{FRP, equivalente} = 2 \text{ strisce da } 160 \text{ g/m}^2 + 2 \text{ strisce da } 300 \text{ g/m}^2 = 2 \times 0,088 + 2 \times 0,165 = \text{cmq } 1,01$$

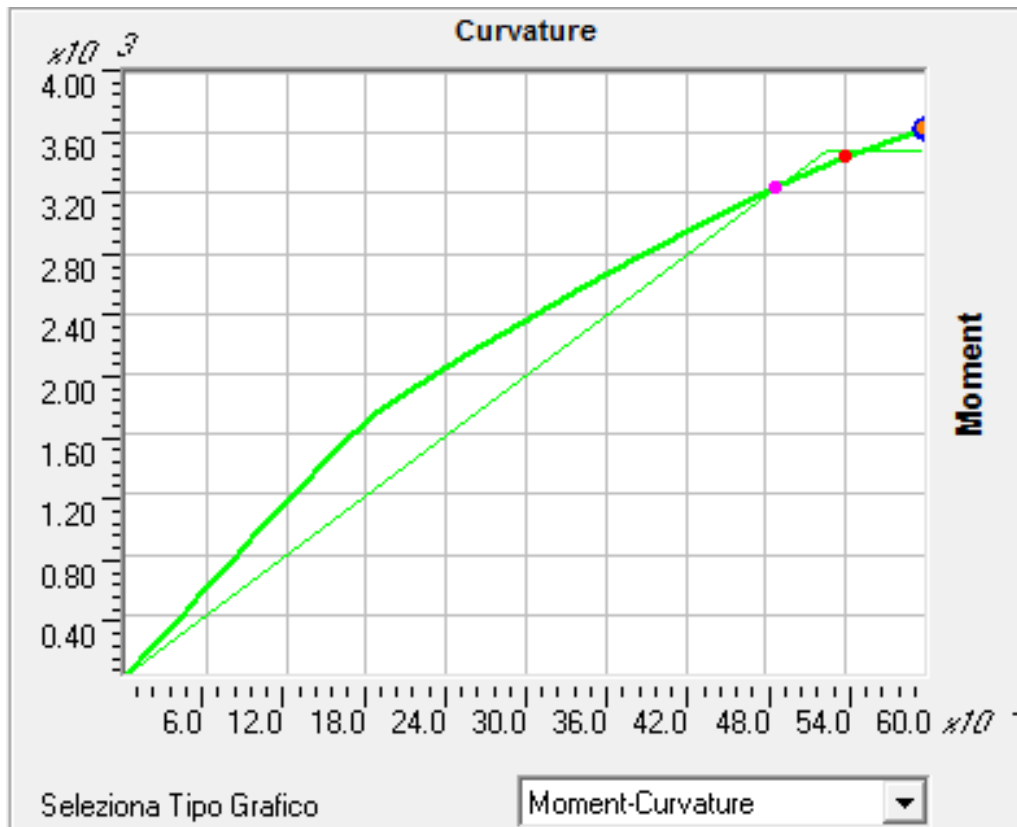
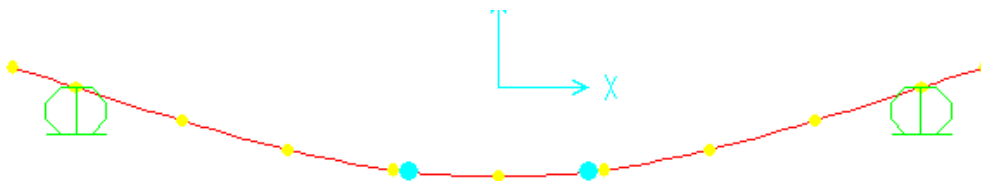


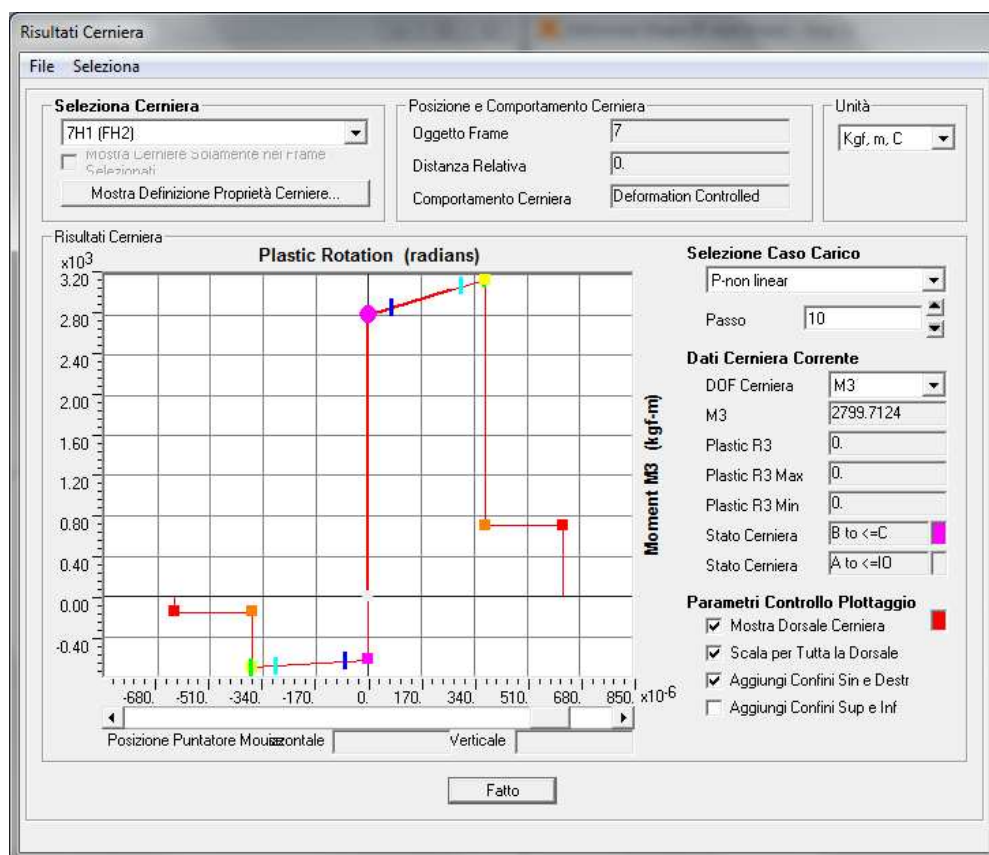
Diagramma momento curvatura sezione rinforzata con FRP

In ordinata vi è il Momento (Kgm), mentre in ascissa vi è la curvatura (1/m)

La 1^a fessurazione si ottiene in corrispondenza di un momento pari a $1,62 \cdot 10^3$ (Kgm), lo snervamento per $M = 3,2 \cdot 10^3$ (Kgm), la rottura per $M = 3,60 \cdot 10^3$.



Risultati analisi statica non lineare: deformata e formazione delle cerniere plastiche



**Risultati analisi statica non lineare:
diagramma Momento -rotazione cerniera plastica**

Come si evince dal diagramma sopra riportato la formazione della cerniera plastica avviene per un valore del momento flettente pari a 2800 Kg m (punto viola), che corrisponde ad una forza applicata pari a $2800/0,75 = 3733 \text{ Kg} (= P)$.

Il momento ultimo risulta pari a 3045 Kg m (punto giallo), che corrisponde ad una forza applicata pari a $3045/0,75 = 4060 \text{ Kg} (= P)$.

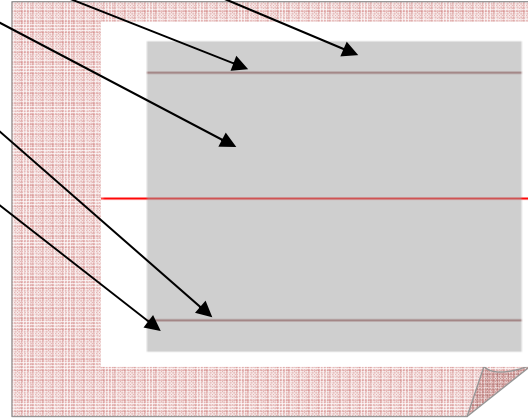
3. Caso di studio nr. 3 - VERIFICA A FLESSIONE: trave NON rinforzata (f.e.m: "shell")

I casi di studio 3 e 4 riguardano l'analisi numerica con elementi di tipo "shell" non lineari a strati ("shell layered").

IPOTESI:

- Trave in c.a. senza rinforzo a flessione modellata con elementi finiti bidimensionali "shell layered" (= elementi a piastra costituiti da strati verticali di diverso materiale.).

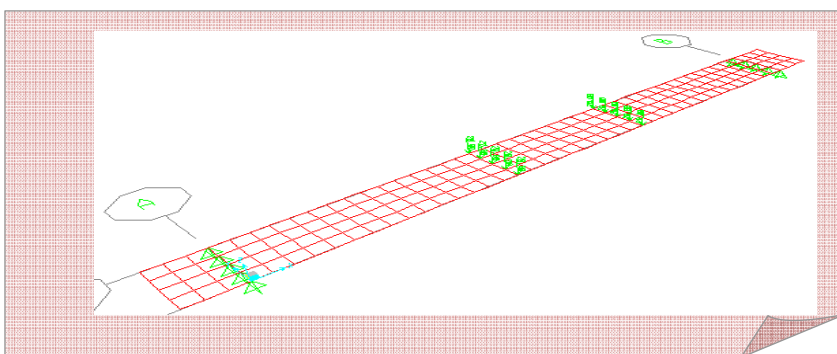
- copriferro superiore
- acciaio superiore
- anima di calcestruzzo
- acciaio inferiore teso
- copriferro inferiore



- Il programma incrementa con successivi step di carico il carico applicato alla trave (carico P ovvero 2·P) fino a raggiungere il valore del momento ultimo resistente della trave.

RISULTATI:

- Si ricava quel particolare valore della forza applicata per la quale si raggiunge la tensione ultima dell'acciaio teso e del calcestruzzo compresso. Al raggiungimento del valore di momento flettente pari a 950 kg m, si giunge alla massima tensione per il calcestruzzo



compresso ($\sigma_c = 160$ kg/cm²).

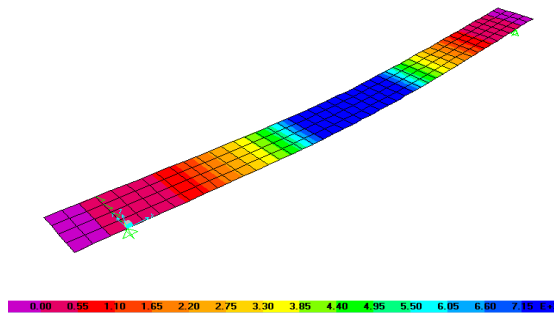
Tale momento flettente è provocato da due forze concentrate poste a 75 cm dagli appoggi,

pertanto tali forze concentrate valgono: $950 / 0,75 = 1266$ Kg (=P).

- Confrontando i risultati numerici (SAP 2000) con i risultati delle prove di laboratorio, si ha una differenza, in termini di

carico ultimo, pari a circa l'13%: il carico 2P teorico è pari a 2532 kg (1266·2), il carico sperimentale è pari a 2200 kg.

- Con questo modello numerico, a differenza dei precedenti (modelli con elementi "beam"), si esegue una analisi più dettagliata delle tensioni che si sviluppano all'interno di ogni materiale modellato come singolo strato all'interno di elementi "shells".



- Si ricava inoltre, un valore indicativo della tensione all'interfaccia FRP/calcestruzzo (tensione all'interfaccia FRP/calcestruzzo massima all'appoggio pari a 12 Kg/cm²).

Per confronto, come può dedursi dalle NTC 2008, la resistenza di adesione tra rinforzo e calcestruzzo è strettamente legata alla sua resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo che vale:

$$f_{ctk} = 13,6 \text{ Kg/cm}^2$$

(essendo infatti $f_{ck} = 160 \text{ Kg/cm}^2$)

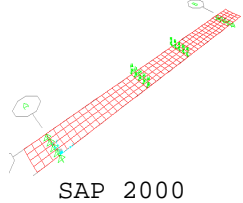
$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 160^{2/3} = 19 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 19,5 = 13,6 \text{ Kg/cm}^2$$

Detto valore in realtà corrisponde al minimo della resistenza a trazione che si sviluppa all'interfaccia.

Infatti, in base al successivo caso di studio n. 5, dove si è aggiunto il contributo dell'adesivo simulato dalle molle a taglio non lineari, il valore di tensione tangenziale massima all'interfaccia calcestruzzo - composito è ben superiore a 12 kg/cm².

SVILUPPO DETTAGLIATO ANALISI NUMERICA

MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "SHELL"					
Obiettivo del caso di studio nr.3: ricavare il carico e il momento di rottura per la trave in c.a. <u>SENZA</u> rinforzo a <u>FLESSIONE</u>					
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Carico di Rottura Analisi numerica 2P(kg)	Carico di Rottura Reale 2P (kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kg m)
Elementi shell (piastre) a strati verticali di materiale senza rinforzo a flessione	 SAP 2000	Analisi statica non lineare. (caso di studio 3)	2532	2200 (TF0 - flessione trave non rinforzata)	950

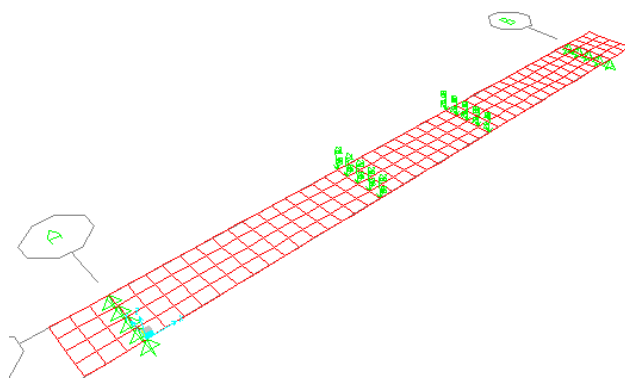
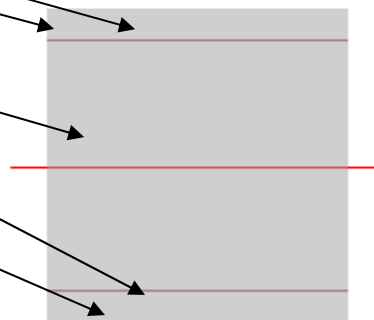
IPOTESI:

- Nel presente caso viene analizzata la trave in c.a. senza rinforzo a flessione modellata con elementi finiti bidimensionali "shell layered" (elementi a piastra costituiti da strati verticali di diverso materiale.). Il programma di calcolo utilizzato è il programma agli elementi finiti SAP 2000.

- Partendo dall'estradosso della trave avremo in ordine sulla sezione verticale i seguenti strati:

- copriferro superiore
- acciaio superiore compresso
- anima di calcestruzzo
- acciaio inferiore teso
- copriferro inferiore

- elementi shell layered

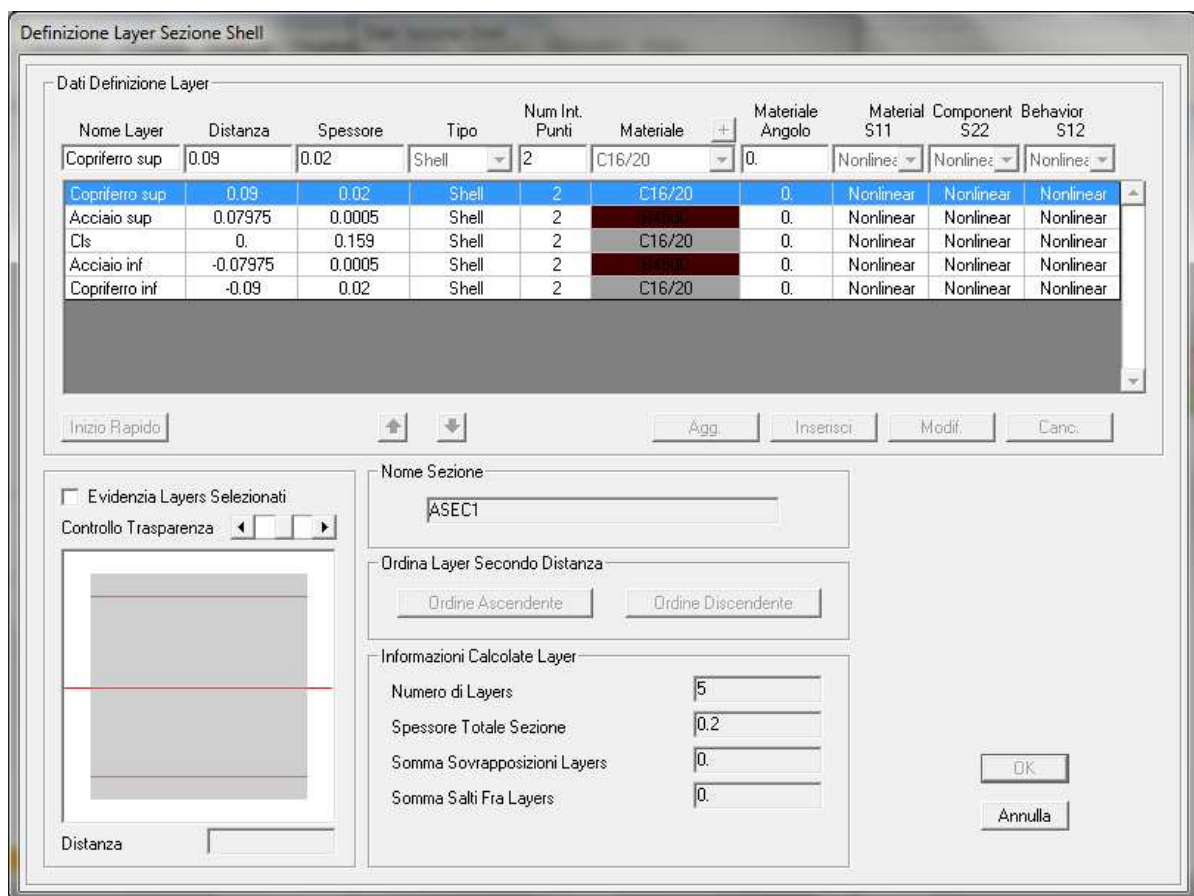


- Vengono definiti i legami costitutivi non lineari dei vari materiali (calcestruzzo e acciaio).

- Nell'analisi svolta il programma incrementa, con successivi step di carico, il carico applicato alla trave (carico P ovvero 2·P) fino a raggiungere il valore del momento ultimo resistente della trave.

Vengono condotti, come per i casi di studio 1 e 2, confronti in termini di momento e carico ultimo sopportabile con in più una analisi dettagliata delle tensioni che si sviluppano all'interno di ogni materiale modellato appunto come singolo strato all'interno di elementi "shell".

(Sono stati creati striscie di n. 4 elementi "shell" larghi 5 cm x 20 cm di altezza)



proprietà degli elementi "shell-layered"

STRATI E TIPI DI MATERIALI

strato 1 = copriferro superiore: cm 2 di calcestruzzo C16/20
distanza baricentro strato 1 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 - 2/2 = 10 - 1 = 9 \text{ cm}$$

strato 2 = acciaio superiore: 2 Ø8 (A= 0,50cm²) → 2·0,50 = 1,00 cm²

distribuendolo su una larghezza di 20 cm (=larghezza trave) si ha: 1,00/20 = 0,05 cm

distanza baricentro strato 2 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 - 2 - 0,05/2 = 10 - 2 - 0,025 = 7,975 \text{ cm}$$

strato 3 = calcestruzzo zona centrale: cm 15,9 (=20-2-0,05-2-0,05) di calcestruzzo C16/20

distanza baricentro strato 3 dal baricentro intera sezione:

$$0 \text{ cm}$$

strato 4 = acciaio inferiore: 2 Ø8 (A= 0,50cm²) → 2·0,50 = 1,00 cm²

distribuendolo su una larghezza di 20 cm (=larghezza trave) si ha: 1,00/20 = 0,05 cm

distanza baricentro strato 4 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 - 2 - 0,05/2 = 10 - 2 - 0,025 = 7,975 \text{ cm}$$

strato 5 = copriferro superiore: cm 2 di calcestruzzo C16/20

distanza baricentro strato 5 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 - 2/2 = 10 - 1 = 9 \text{ cm}$$

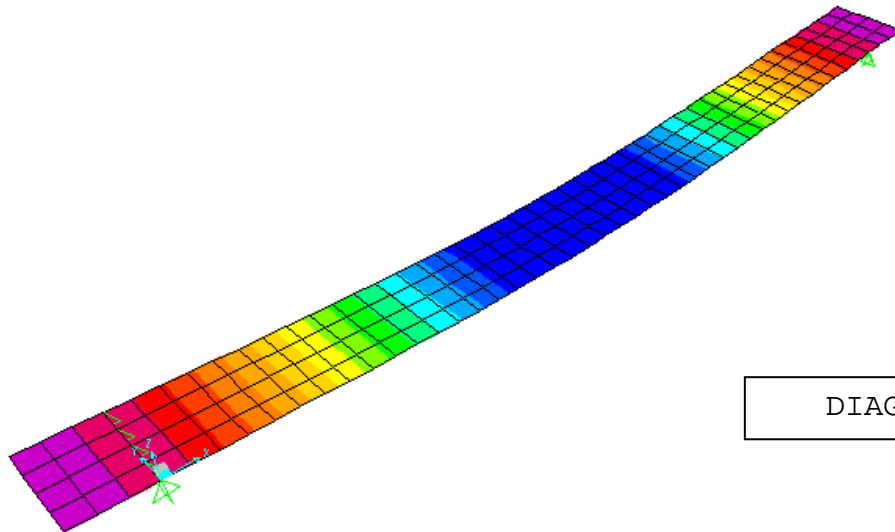
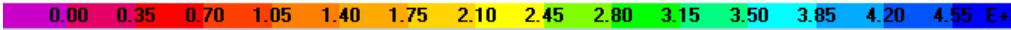


DIAGRAMMA MOMENTO



Al raggiungimento del valore di momento flettente pari a 4746 kgm/m (valido per uno "shell" lungo 1 metro) si giunge alla massima tensione per il calcestruzzo compresso ($\sigma_c = 160 \text{ kg/cm}^2$).

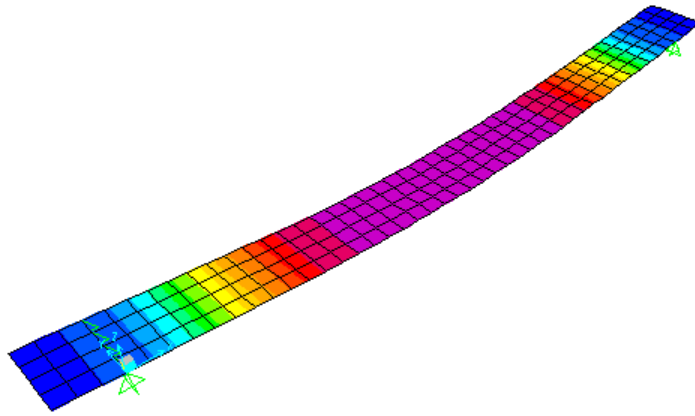
$$M = 4746 \text{ Kg m /mt} \rightarrow 4746 \cdot 0,20 = 950 \text{ Kg m (1daN=1Kgm)}$$

Tale momento flettente è provocato da 2 forze concentrate poste a 75 cm dagli appoggi, pertanto tali forze concentrate valgono:

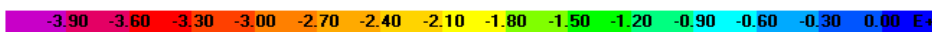
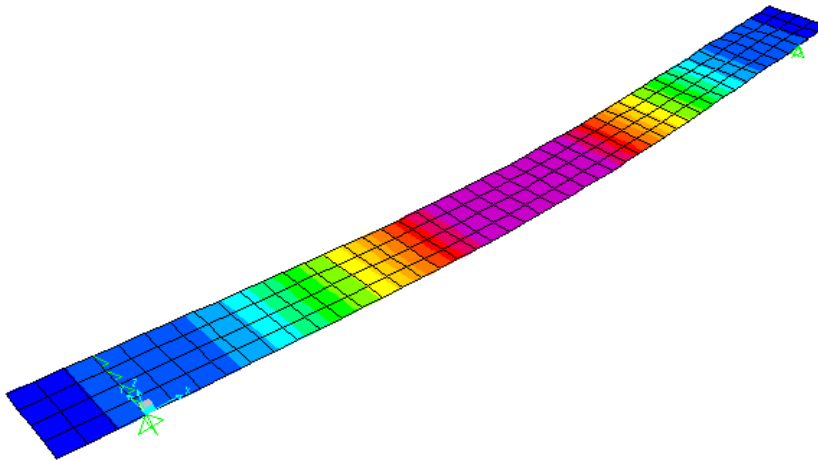
$$950 / 0,75 = \underline{1266 \text{ Kg (=P)}}$$

Essendo la sezione della trave larga 0,20 m, si ha che il momento sulla striscia larga 20 cm vale $M = 4746 \times 0,20 = 950 \text{ Kgm}$

Si riportano nel seguito i diagrammi delle tensioni agenti sui vari materiali (strati degli "shell layered").



tensione nel calcestruzzo compresso superiore letto dal programma (tensione massima in mezzeria pari a 160 Kg/cm² = fck = tensione cilindrica caratteristica del calcestruzzo)



tensione nell'acciaio inferiore (tensione massima in mezzeria pari a 4000 Kg/cm²)

4. Caso di studio nr. 4 - VERIFICA A FLESSIONE: TRAVE TF1
rinforzata con resine IPN (f.e.m: "shell")

IPOTESI:

• Trave in c.a. con rinforzo a flessione modellata con elementi finiti bidimensionali "shell layered" (elementi a piastra costituiti da strati verticali di diverso materiale.).

- copriferro superiore
- acciaio superiore compresso
- anima di calcestruzzo
- acciaio inferiore teso
- copriferro inferiore
- strisce di FRP

Strati come nel caso 3 con l'aggiunta del composito FRP

RISULTATI:

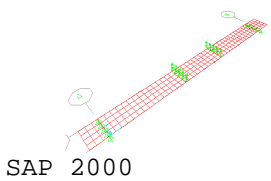
• Al raggiungimento del valore di momento flettente pari a 2827 Kg m, si giunge alla massima tensione per il calcestruzzo compresso ($\sigma_c = 160 \text{ kg/cm}^2$).

Tale momento flettente è provocato da 2 forze concentrate poste a 75 cm dagli appoggi, pertanto tali forze concentrate valgono: $2827 / 0,75 = 3770 \text{ Kg (P)}$.

• Confrontando i risultati numerici (SAP 2000) con i risultati delle prove di laboratorio si ha una differenza in termini di carico ultimo pari a circa l'1%: il carico 2P teorico è pari a 7540 kg ($4060 \cdot 2$), il carico sperimentale è pari a 7400 kg.

• Si ricava la tensione nell'FRP (tensione massima pari a 7640 Kg/cm^2).

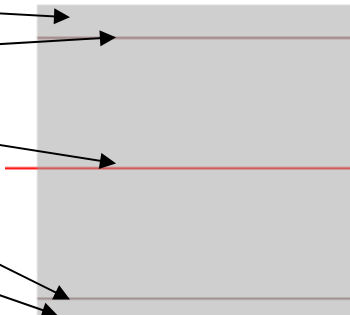
SVILUPPO DETTAGLIATO ANALISI NUMERICA

MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "SHELL"						
Obiettivo del caso di studio nr.4: ricavare il carico e il momento di rottura per la trave in c.a. CON rinforzo a <u>FLESSIONE</u>						
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione di analisi	Carico di Rottura Analisi numerica 2P (kg)	Carico di Rottura Reale 2P(kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kg m)	Tensione di delaminazione (kg/cm ²)
Elementi shell (piastre) a strati verticali di materiale con rinforzo a flessione	 SAP 2000	Analisi statica non lineare. FRP modellato come singolo strato della piastra. (caso di studio 4)	7540	7400 (TF1 - flessione rinforzata con fibre di carboni o+resine a base acqua (IPN))	2827	7640

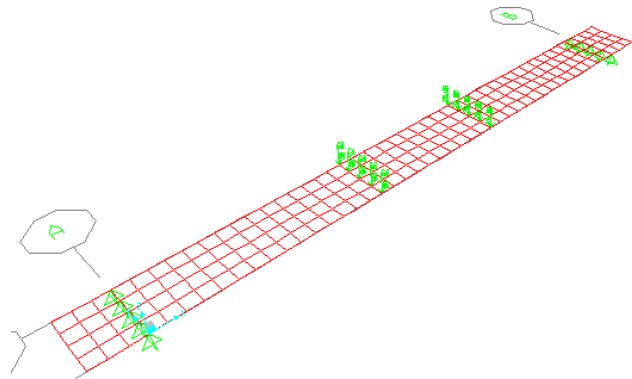
IPOTESI:

- Nel presente caso viene analizzata la trave in c.a. TF1 rinforzata all'intradosso con strisce di FRP e modellata con elementi finiti bidimensionali "shell layered" (= elementi a piastra costituiti da strati verticali di diverso materiale.). Il programma di calcolo utilizzato è il programma agli elementi finiti SAP 2000.

- Partendo dall'estradosso della trave avremo in ordine sulla sezione verticale i seguenti strati:

- copriferro superiore
 - acciaio superiore compresso
 - anima di calcestruzzo
 - acciaio inferiore teso
 - copriferro inferiore
 - strisce di FRP
- 

elementi "shell layered"



- Vengono definiti i legami costitutivi non lineari dei vari materiali (calcestruzzo, acciaio) e del FRP.
- Nell'analisi svolta il programma incrementa con successivi step di carico il carico applicato alla trave (carico P ovvero $2 \cdot P$) fino a raggiungere il valore del momento ultimo resistente della trave.

RISULTATI:

- Al raggiungimento del valore di momento flettente pari a 2827 Kgm, si giunge alla massima tensione per il calcestruzzo compresso ($\sigma_c = 160 \text{ kg/cm}^2$).

Tale momento flettente è provocato da 2 forze concentrate poste a 75 cm dagli appoggi, pertanto tali forze concentrate valgono: $2827 / 0,75 = \underline{3770 \text{ Kg}} (=P)$.

- Confrontando i risultati numerici (SAP 2000) con i risultati delle prove di laboratorio si ha una differenza in termini di carico ultimo pari a circa l'1%: il carico 2P teorico è pari a 7540 kg ($4060 \cdot 2$), il carico sperimentale è pari a 7400 kg.

- Si ricava la tensione nell'FRP (tensione massima pari a 7640 Kg/cm²).

- Si ricava inoltre, grazie al programma di calcolo che consente di ricavare il valore delle tensioni fra strati di qualsiasi materiale, un valore indicativo della tensione all'interfaccia

FRP/calcestruzzo (tensione all'interfaccia FRP/calcestruzzo massima all'appoggio pari a 12 Kg/cm²).

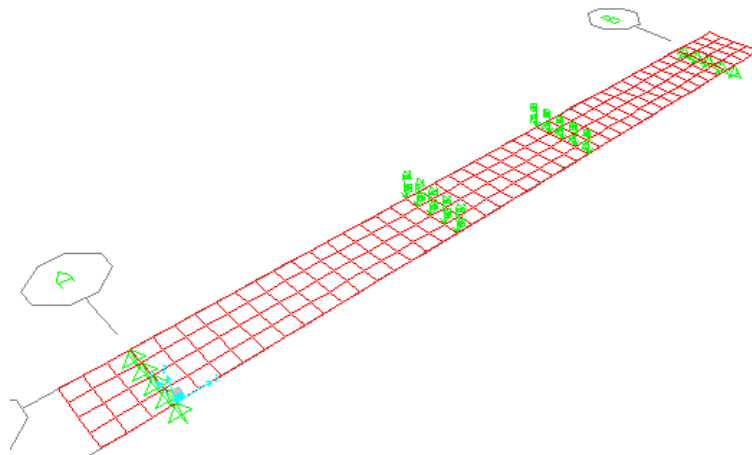
Per confronto, come può dedursi dalle NTC 2008, la resistenza di adesione tra rinforzo e calcestruzzo è strettamente legata alla sua resistenza caratteristica a trazione che vale: $f_{ctk}=13,6$ Kg/cm² (essendo infatti $f_{ck} 160$ Kg/cm² → $f_{ctm}=0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}=0,3 \cdot 16^{2/3}=19$ Kg/cm² →

$$\rightarrow f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 19,5 = \underline{13,6 \text{ Kg}}).$$

Detto valore in realtà corrisponde al valore della resistenza a trazione che si sviluppa all'interfaccia. Infatti in base al successivo caso di studio n. 5, dove si è aggiunto il contributo dell'adesivo simulato dalle molle a taglio, il valore di tensione tangenziale massima all'interfaccia calcestruzzo - composito è ben superiore a 12 kg/cm².

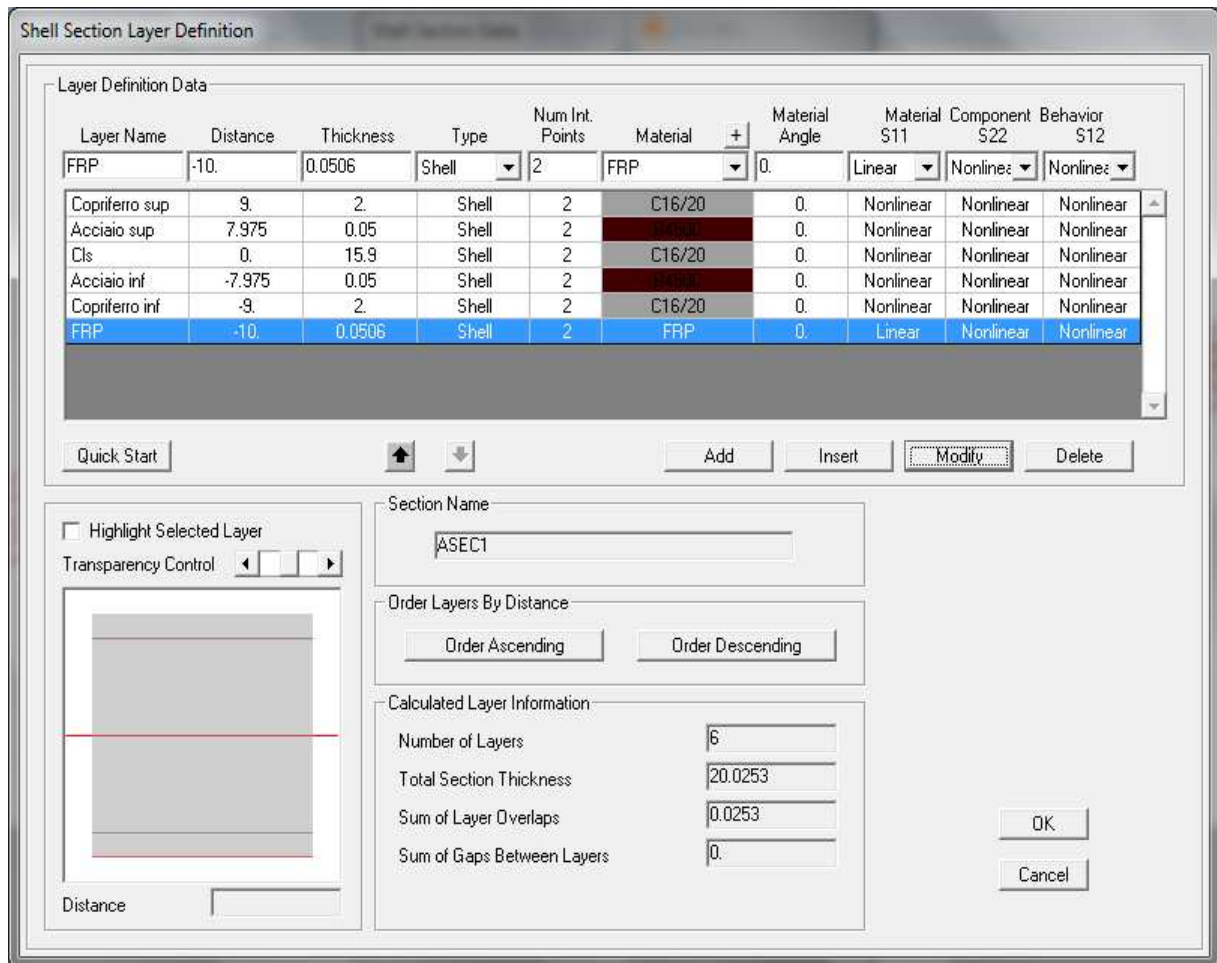
Riassumendo:

Il quarto caso di studio consiste nel modello f.e.m. modellato con elementi bidimensionali (elementi "shell-layered") rinforzo FRP



modello bidimensione con elementi "shell-layered"

(dei 4 strati di fibra ne è stato considerato uno equivalente)



Proprietà degli elementi "shell-layered"

(Strati e tipi dei materiali)

strato 1 = copriferro superiore: cm 2 di calcestruzzo C16/20
distanza baricentro strato 1 dal baricentro intera sezione:
 $20/2 - 2/2 = 10 - 1 = 9$ cm

strato 2 = acciaio superiore: 2 Ø8 ($A = 0,50\text{cm}^2$) $\rightarrow 2 \cdot 0,50 = 1,00$ cm²

distribuendolo su una larghezza di 20 cm (=larghezza trave) si ha: $1,00/20 = 0,05$ cm

distanza baricentro strato 2 dal baricentro intera sezione:
 $20/2 - 2 - 0,05/2 = 10 - 2 - 0,025 = 7,975$ cm

strato 3 = calcestruzzo zona centrale: cm 15,9 (=20-2-0,05-2-0,05) di calcestruzzo C16/20

distanza baricentro strato 3 dal baricentro intera sezione:
0 cm

strato 4 = acciaio inferiore: 2 Ø8 ($A = 0,50\text{cm}^2$) $\rightarrow 2 \cdot 0,50 = 1,00$ cm²

distribuendolo su una larghezza di 20 cm (=larghezza trave) si ha: $1,00/20 = 0,05$ cm

distanza baricentro strato 4 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 - 2 - 0,05/2 = 10 - 2 - 0,025 = 7,975 \text{ cm}$$

strato 5 = copriferro superiore: cm 2 di calcestruzzo C16/20

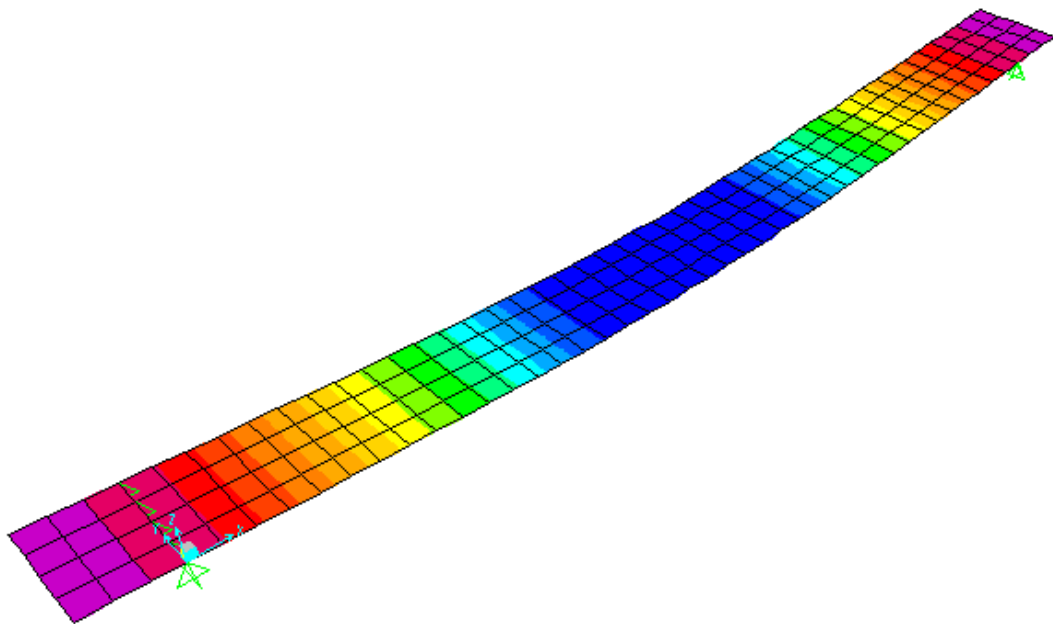
distanza baricentro strato 5 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 - 2/2 = 10 - 1 = 9 \text{ cm}$$

strato 6 = FRP: cm 0,0506 di FRP (spessore equivalente di 2 strati di FRP da mm 0,088 e 2 strati di FRP da mm 0,165)

distanza baricentro strato 6 dal baricentro intera sezione:

$$20/2 = 10 \text{ cm}$$



Il momento flettente che provoca lo snervamento dell'acciaio e la massima tensione sul calcestruzzo compresso risulta pari a:

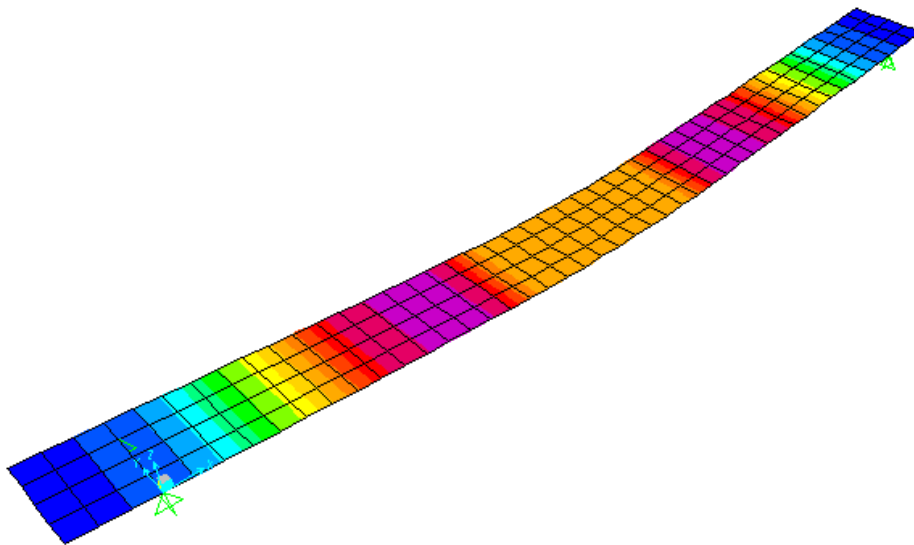
$14139 \text{ KgN m /mt} \rightarrow 14139 \cdot 0,20 = 2827 \text{ Kg m}$ (in quanto la trave è larga 20 cm)

Tale momento flettente è provocato da 2 forze concentrate poste a 75 cm dagli appoggi, pertanto tali forze concentrate valgono:

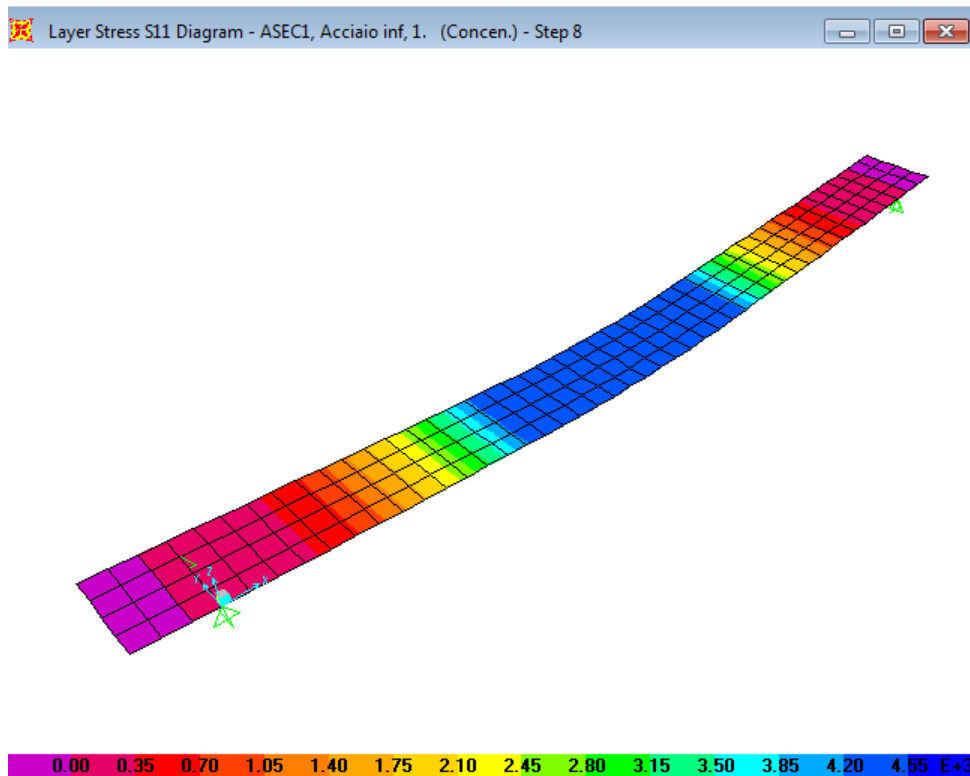
$$\underline{2827 / 0,75 = 3770 \text{ Kg (=P)}}$$

Si riportano nel seguito i diagrammi delle tensioni agenti sui vari materiali (strati della "shell layered").

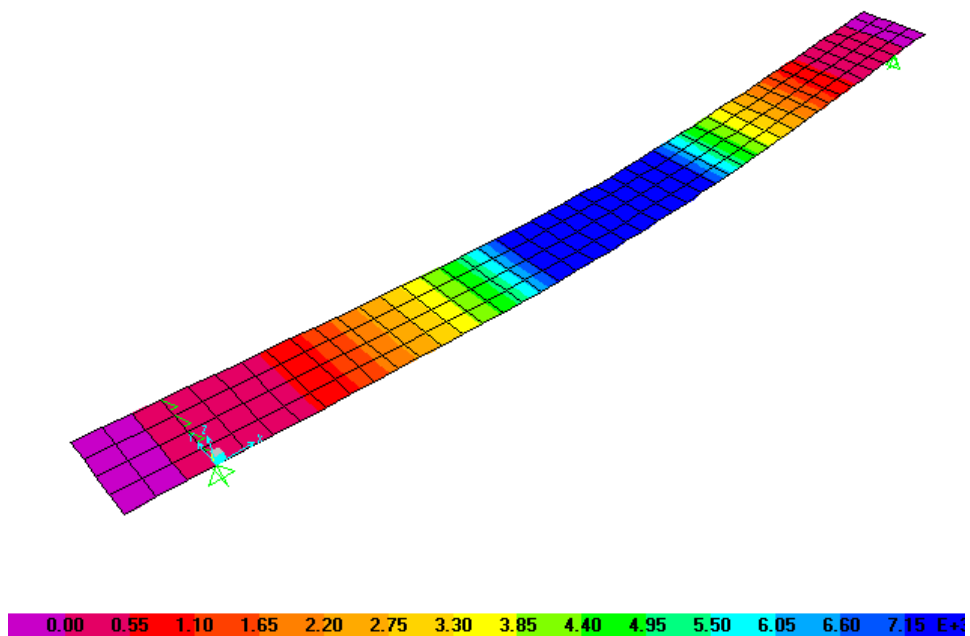
Layer Stress S11 Diagram - ASECI, Copriferro sup, 1. (Concen.) - Step 8



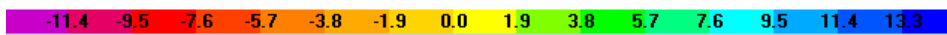
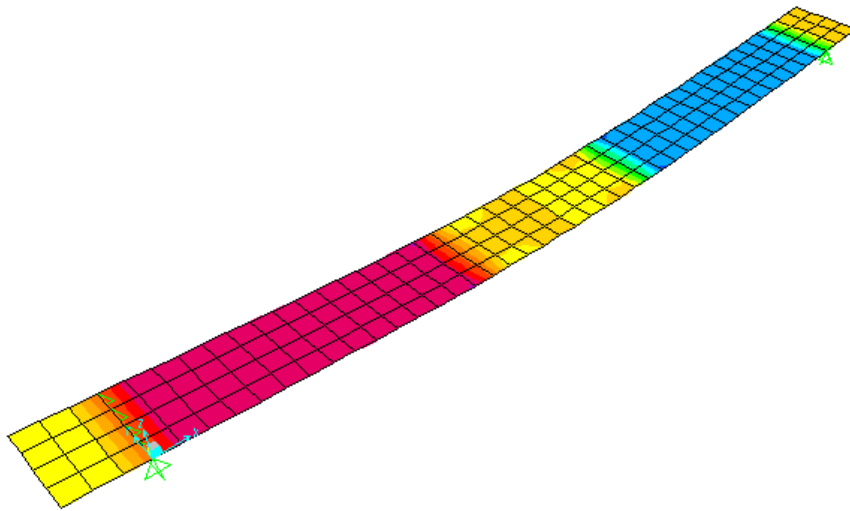
tensione nel calcestruzzo compresso al lembo superiore
(tensione massima in mezzeria pari a $160 \text{ Kg/cm}^2 = f_{ck} = \text{tensione}$
cilindrica caratteristica del calcestruzzo)



tensione nell'acciaio inferiore (tensione massima in mezzeria pari a $4500 \text{ Kg/cm}^2 = f_{yk} = \text{tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio}$)



tensione nell'FRP (tensione massima in mezzeria pari a 7640 Kg/cm^2) = valore di delaminazione come vedremo nel seguito. Quindi, mentre l'acciaio e il calcestruzzo arrivano a rottura, la tensione del FRP si ferma al valore di sperimentazione.



La tensione all'interfaccia FRP/calcestruzzo (tensione massima all'appoggio pari a 12 Kg/cm²), è ricavabile dal grafico precedente, ottenuto mediante l'analisi numerica condotta con il programma SAP 2000. (Al programma si può chiedere il valore delle tensioni fra strati di qualsiasi di qualsiasi materiale).

Per confronto, come può dedursi dalle NTC 2008, la resistenza di adesione tra rinforzo e calcestruzzo è strettamente legata alla sua resistenza caratteristica a trazione che vale:

$$f_{ctk} = 13,6 \text{ Kg/cm}^2$$

essendo:

$$f_{ck} = 160 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 16^{2/3} = 19 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 19,5 = 13,6 \text{ Kg}$$

Detto valore 12 Kg/cm² in realtà corrisponde al minimo della resistenza a trazione che si

RIEPILOGO DEI RISULTATI DEI PRIMI 4 CASI DI STUDIO

TIPO DI RINFORZO	TIPO DI ANALISI (SAP 2000)	CARICO DI ROTTURA TEORICO (Kg)	CARICO DI ROTTURA REALE (Kg) (Prove di Laboratorio)	DIFFERENZE %
NESSUN RINFORZO	"beam"	2246	2200	0
RINF. A FLESSIONE	"beam"	8120	7400	-8%
NESSUN RINFORZO	"shell"	2533	2200	13%
RINF. A FLESSIONE	"shell"	7540	7400	1%

In generale si assiste ad una sovrastima del carico di rottura teorico, rispetto a quello reale, in tutti i casi. Questo fatto può voler dire alcune cose. Anzitutto che ci possono essere problemi di esecuzione sia delle travi che dei compositi. La loro realizzazione in cantiere non può mai considerarsi perfetta.

In secondo luogo sono stati usati legami costitutivi dei materiali (acciaio, calcestruzzo, fibre e resina), puramente teorici e assunti direttamente dai cataloghi dei fornitori.

5. Caso di studio nr. 5 - RINFORZO A FLESSIONE: legame di interfaccia CLS - FRP per le TRAVI TFP(resine epoxy) e TF1(resine IPN)

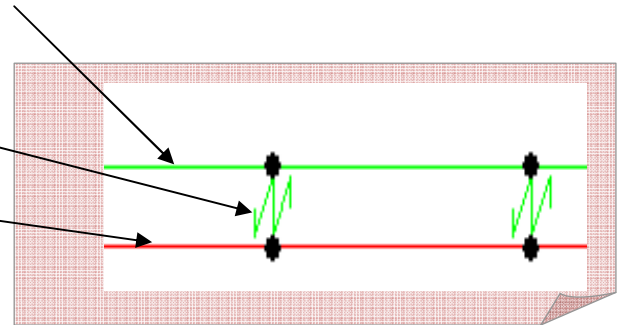
OBIETTIVO:

RICERCA DEL DIAGRAMMA DI ADERENZA CALCESTRUZZO - F.R.P.

IPOTESI:

- Trave modellata con elementi "beam"; fasce in FRP modellate con elementi "beam"; adesivo (resina a base acqua nel caso 2 e resina epossidica nel caso 1) modellato con molle a taglio non lineari

"beam" che simula la trave in cls
molla a taglio non lineare che
simula adesivo
"beam" che simula FRP



- Per via analitica (CNR DT 200 del 2012) si ricava il diagramma " τ " - "slip (scorrimento)" .

Tale diagramma è assunto come diagramma di riferimento, (diagramma che descrive il legame di interfaccia tra supporto in cls e materiale composito). Si ricava inoltre, sempre per via analitica, la tensione di delaminazione interna dell'FRP che risulta pari a 6740 Kg/cm^2 .

- Passando al modello numerico viene fissata la rigidezza iniziale dell'adesivo ($k=E/t$), che è calcolata come rapporto fra il modulo elastico dell'adesivo e lo spessore dell'adesivo.

- Vengono implementate opportune molle a taglio con passo longitudinale delle molle: 12,5 cm (sottomultiplo di 0,75 m).

Si fissa lo scorrimento e si fa variare, per tentativi, il carico supportabile dalle molle fino a che il momento resistente

trovato sia approssimativamente pari a quello dedotto per via sperimentale.

RISULTATI:

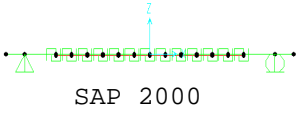
diagramma forza di taglio($\text{kg } 10^3$)/
scorrimento ($\text{cm} \cdot 10^{-3}$)

- Si ricavano i diagrammi forza - scorrimento delle molle non lineari che simulano il legame di aderenza fra il calcestruzzo e il rinforzo a flessione con fasce in FRP, per i 2 casi di adesivo a base acqua e adesivo epossidico.
- La forza di taglio massima che si legge nel diagramma in corrispondenza del punto di flesso della curva, va divisa per l'area di influenza delle molle. Pertanto si può così ricavare la tensione tangenziale massima.
- Si confrontano i legami forza scorrimento ottenuti con il legame forza - scorrimento teorico delle CNR DT 200 del 2012 (con entrambi i modelli numerici si ottengono valori di tensione tangenziale massima, rispettivamente 37 (per il caso con adesivo a base acqua) e 39 kg/cm^2 (per il caso di adesivo epossidico), superiori rispetto a quella teorica calcolata con le CNR: $\sim 28 \text{ /kg}/\text{cm}^2$.
- Si possono inoltre confrontare i valori di tensione massima di delaminazione che il rinforzo in FRP riesce a trasmettere prima di delaminare : nel caso di rinforzo con adesivo a base acqua tale valore è pari a circa $7500 \text{ kg}/\text{cm}^2$; nel caso di rinforzo con adesivo epossidico tale valore è pari a circa $7700 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Entrambi i valori trovati risultano superiori a quanto desunto per via analitica (CNR DT200 $\rightarrow 6740 \text{ kg}/\text{cm}^2$).

In sintesi:

$\tau_{\text{ader.teorico/sperim.}} > \tau_{\text{ader. Cnr}}$ sia con epoxy che con IPN



MODELLO NUMERICO SAP 2000 CON ELEMENTI "BEAM" E "MOLLE A TAGLIO NON LINEARI"					
Obiettivo del caso di studio nr. 5.3: ricavare il diagramma di aderenza cls - FRP					
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Cari-co di Rottura Analisi numerica 2P (kg)	Carico di Rottura Reale 2P (kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kgm)
Elementi beam + molle a taglio non lineari che simulano l'adesivo costituito da <u>-resina epossidica</u>	 SAP 2000	Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi "beam" Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi beam (caso di studio 5)	8466	8400 (TF1 - flessione- rinforzata con fibre di carbonio+ Resine epossidiche	3175

Tensione delaminazione (kg/cm ²)	di	Legame di aderenza	
		τ_{max} (kg/cm ²)	Scorrimento (corrisp.) (mm)
7500		39	0,033

N.B. Il **diagramma "τ" - "s"** (tensione tangenziale - scorrimento) è necessario per studiare la delaminazione del composito rispetto al supporto. Si utilizza per tale scopo un modello bilineare del legame di interfaccia definito sulla base delle formulazioni delle CNR (vedi più avanti).

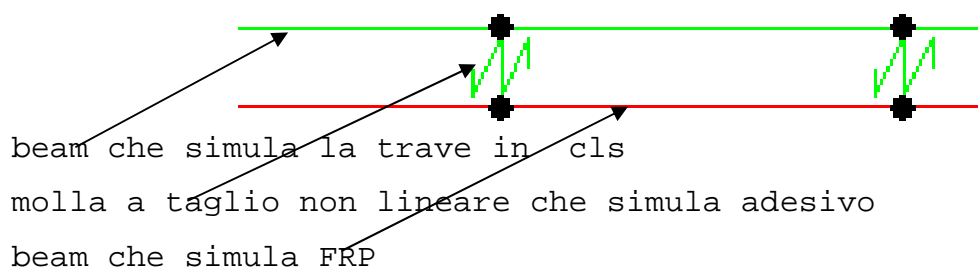
Nel ramo crescente di tale diagramma le tensioni tangenziali (che si sviluppano tra supporto e composito) crescono in maniera direttamente proporzionale allo scorrimento tra i due materiali. Giunti al valore di " τ_{max} " si assiste alla delaminazione del composito: nel ramo decrescente del diagramma le tensioni tangenziali calano mentre lo scorrimento continua a crescere.

IPOTESI:

- Trave modellata con elementi "beam"

fasce in FRP modellate con elementi "beam"

Adesivo (resina a base acqua nel caso 1 e resina epossidica nel caso 2) modellato con molle a taglio non lineari



- Viene dapprima ricavato per via analitica il diagramma "τ" - "slip" secondo i dettami delle CNR DT 200 del 2012. Tale diagramma è infatti assunto come diagramma analitico di riferimento, (diagramma che descrive il legame di interfaccia tra supporto e materiale composito), utilizzato per confrontare i risultati forniti dal modello di calcolo numerico.

Si ricava inoltre, sempre per via analitica, la tensione di delaminazione dell'FRP che risulta pari a 6740 Kg/cm^2 (si ricorda che la larghezza del tessuto in FRP è pari alla larghezza della trave = 20 cm).

- Passando al modello numerico viene fissata la rigidezza iniziale dell'adesivo che è calcolata come rapporto fra il modulo elastico dell'adesivo e lo spessore dell'adesivo.

- Vengono implementate opportune molle a taglio con passo longitudinale delle molle: 12,5 cm (sottomultiplo di 0,75 m).

Si è fissato lo scorrimento e si è fatto variare, per tentativi, il carico sopportabile dalle molle fino a che il momento resistente trovato sia approssimativamente pari a quello dedotto per via sperimentale.

RISULTATI:

- Si ricavano i diagrammi forza - scorrimento delle molle non lineari che simulano il legame di aderenza fra il calcestruzzo e il rinforzo a taglio con fasce in FRP per i 2 casi di adesivo a base acqua e adesivo epossidico.

- Si confrontano i legami forza scorrimento ottenuti con il legame forza - scorrimento teorico delle CNR DT 200 del 2012 (con entrambi i modelli numerici si ottengono valori di tensione tangenziale massima, rispettivamente 37 (per il caso con adesivo a base acqua) e 39 kg/cm² (per il caso di adesivo epossidico), superiori rispetto a quella teorica calcolata con le CNR: ~ 28 kg/cm²).

- Si possono inoltre confrontare i valori della tensione di delaminazione che il rinforzo in FRP riesce a trasmettere prima di delaminare: nel caso di rinforzo con adesivo a base acqua tale valore è pari a circa 7500 kg/cm²; nel caso di rinforzo con adesivo epossidico tale valore è pari a circa 7700 kg/cm². Entrambi i valori trovati risultano superiori a quanto desunto per via analitica (CNR DT200 → 6740 kg/cm²).

Inizialmente si è condotto un calcolo analitico della tensione di delaminazione secondo le CNR DT200 del 2012.

VERIFICA ANALITICA

RINFORZO A FLESSIONE CON C-FRP CALCOLO TENSIONI DI DELAMINAZIONE
CNR DT 200-2012

CLS (NTC08)

(par. 11.2.10.1)

Rck 20 N/mm² **resistenza caratteristica CUBICA a compressione**

fck 16.6 N/mm² **resistenza caratteristica CILINDRICA a compressione**
 fck=0.83*Rck

In sede di previsioni progettuali si può passare dal valore caratteristico al **valore medio della resistenza cilindrica** (e viceversa):

fcm=fck+8 = 24.60 N/mm²

(par. 4.1.2.1.1.1)

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{\alpha_{cc} \cdot (0.83 \cdot R_{ck})}{\gamma_c} \quad \text{resistenza di calcolo a compressione}$$

γ_c 1.5 coefficiente parziale di sicurezza relativo al Materiale conglomerato cementizio per strutt. ord.

α_{cc} 0.85 coefficiente riduttivo per le azioni di lunga durata

$f_{cd} = \frac{0.85 \cdot 0.83}{1.5} R_{CK} = 0.470 R_{CK}$ **resistenza di calcolo a compressione per strutt. ord.** = 9.41 N/mm²

(par. 11.2.10.2.) ricaviamo nell'ordine:

resistenza media a trazione semplice

$f_{cm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3}$ per classi ≤ C50/60 = 1.95 N/mm²

$f_{cm} = 2.12 \cdot \ln[1 + f_{cm} / 10]$ per classi > C50/60 = - N/mm²

resistenza caratteristica a trazione per flessione del calcestruzzo

$f_{ctfm} = 1.2 \cdot f_{ctm}$ = 2.34 N/mm²

Acciaio (Fe B 450C) (par. 11.3.2.1)

$$f_{ytd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \text{(SLU)}$$

fyk	tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio	450.00	N/mm ²
γ_s	coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio	1.15	
fyd	tensione di snervamento di calcolo	=	391.30 N/mm ²
(Agt)k	allungamento	≥	7.50%
6< ϕ <40	range diametro barre		
Es	modulo elastico	200000	N/mm ²
eyk	deformazione di snervamento dell'acciaio	1.96	%

(1N/mmq=1Kg / cmq)

RINFORZO IN C-FRP

FC =	1.00	(fattore di confidenza 1,35; 1,20 ; 1,00)
b =	200 mm	(larghezza supporto)
bf =	200 mm	(larghezza rinforzo)
kb =	1.00	$k_b = \sqrt{\frac{2-b_r/b}{1+b_r/b}} \geq 1$ Kb varia tra 1,00 (bf=b/2) e 1,18 (bf=b/4)
KG =	0.023 mm	da prove sperimentali; 0,023 per i compositi preformati; 0,037 per i compositi impregnati in situ
tf =	0.5 mm	(spessore rinforzo) ft = 2800 N/mm2
Ef =	215384 N/mm2	(modulo elastico) st = 0,013 (→ E = ft / s = ...)

Energia Specifica di Frattura

$$\Gamma_{r,c} = \frac{k_1 \cdot k_2}{FC} \cdot \sqrt{f_{t,cr} \cdot f_{t,cr}}$$

$$= \boxed{0.17} \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}$$

Tensione di delaminazione di estremità

$$f_{r,ed} = \frac{1}{\gamma_{r,ed}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_r \cdot \Gamma_{r,c}}{t_r}}$$

$\gamma_{r,c} = 1,20; 1,50$ **1.20**

in funzione della maggiore o minore possibilità di prevedere, per la specifica applicazione, l'effettivo comportamento del composito nei riguardi del distacco dal supporto

$$= \boxed{323} \text{ Mpa}$$

Tensione di delaminazione interna

$$f_{r,ed,2} = \frac{k_2}{\gamma_{r,ed}} \cdot \sqrt{\frac{E_r \cdot 2 \cdot k_1 \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{t,cr} \cdot f_{t,cr}}}$$

$$\varepsilon_{r,ed,2} = \frac{f_{r,ed,2}}{E_r} \geq \varepsilon_{st} - \varepsilon_0$$

KG2 =	0.10 mm	da prove sperimentali, <u>indipendentemente dal tipo di supporto</u>
Kq =	1.00	1,25 per carichi distribuiti; 1,00 per carichi concentrati
	674 Mpa	corrispondente a una dilatazione del 3.13 ‰ > 1.96 ‰

N.B) La tensione di delaminazione esterna dipende dalla lunghezza dell'ancoraggio, vicino agli appoggi, (la larghezza è fissa 20 cm.). In genere sono sufficienti 10-20 cm..

La tensione trasmissibile in corrispondenza dell'applicazione dei carichi (tensione di delaminazione), è di 3370 Kg/cm² per ogni 10 cm. di larghezza dell'ancoraggio, quindi vale complessivamente 3370x2= 6740 Kg/cm²

(1Mpa~10Kg/cmq)

FORZA TRASMISSIBILE PER b = 10 cm

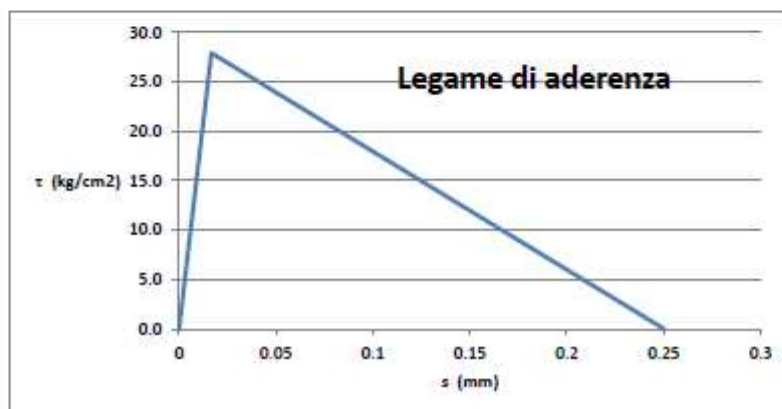
3370 daN

- su = **0.25** mm scorrimento ultimo di interfaccia
- tm = **1.40** N/mm² valor medio della tensione tangenziale di aderenza interfaccia
- K1 = **168** N/mm coefficiente angolare del ramo lineare crescente, K1
- essendo:
- Ga = **650** N/mm² modulo di elasticità tangenziale dell'adesivo
- Gc = **12258** N/mm² modulo di elasticità tangenziale del cls
- ta = **1** mm spessore nominale dell'adesivo
- tc = **25** mm spessore dello strato di cls che partecipa alla deformabilità dell'interfaccia
in mancanza di dati sperimentali tc = 20 ÷ 30
- c1 = **0.6** e c1 = 0,5 ÷ 0,7

$$f_v = \frac{2 \cdot \Gamma_{fa}}{s_a}$$

$$K_1 = \frac{c_1}{t_a/G_a + t_c/G_c}$$

τ	s
0.0	0
27.9	0.02
0.0	0.25



Questo grafico ci permette di dimensionare le tensioni tangenziali di aderenza, calcolate con le CNR, sono inferiori rispetto a quelle che ricaveremo con l'analisi condotta con il SAP 2000, che vedremo nel seguito, nella quale vengono implementati i parametri ricavati dalle prove sperimentali, applicati alle molle a taglio non lineari.

N.B. Il grafico τ/s sopra riportato si ottiene attraverso quanto indicato nelle CNR-DT 2012, per le quali i parametri sono ottenuti attraverso prove sperimentali (come era per quello del FIB)

VERIFICA NUMERICA CON ELABORATORE (SAP 2000)

La modellazione consente di studiare le modalità di propagazione della massima tensione tangenziale all'interfaccia calcestruzzo - adesivo/tessuto.

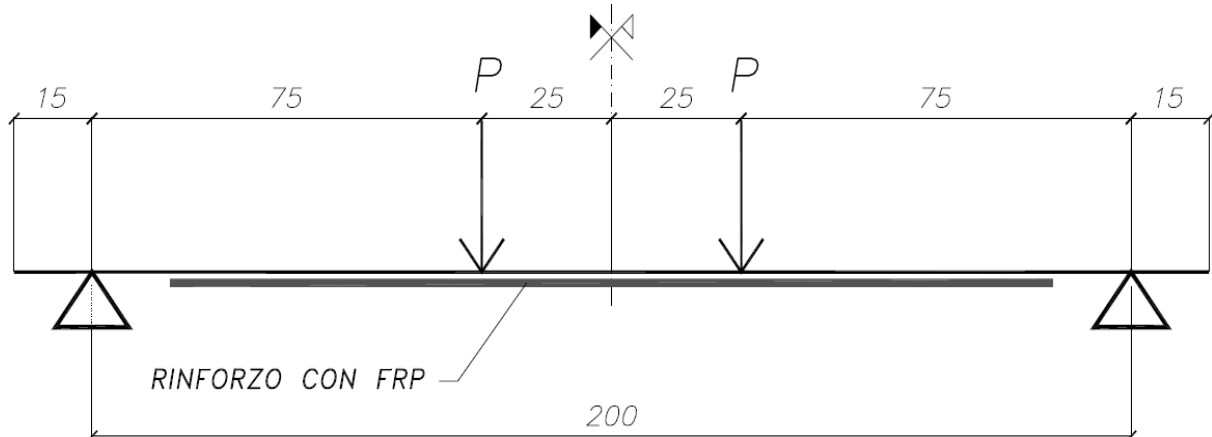
La rigidezza dell'adesivo è calcolata come rapporto fra il modulo elastico dell'adesivo e lo spessore dell'adesivo.

$E_{\text{adesivo}} = 100 \text{ MPa}$ ($\sim 1000 \text{ kg/cm}^2$) (modulo elastico adesivo)

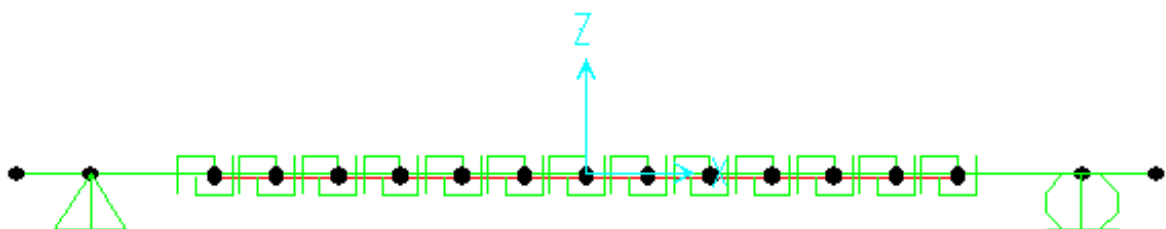
$t_{\text{adesivo}} = 2 \text{ mm}$ (0,2 cm) (spessore dell'adesivo)

$\rightarrow K = \text{rigidezza dell'adesivo} = 1000/0,2 = 5000 \text{ kg/cm}^3$

Si riporta nel seguito lo schema statico, la geometria del modello di calcolo realizzato e, in forma sintetica, i risultati della analisi statica non lineare.



CONFRONTO CON LA TRAVE TF1: " RINFORZO A FLESSIONE CON FIBRE DI CARBONIO + RESINA A BASE ACQUA DEL TIPO IPN"



Modello numerico

Vengono implementate opportune molle a taglio non lineari così definite: passo longitudinale delle molle: 12,5 cm (sottomultiplo di 0,75 m).

Si è ricercato quel particolare legame "τ-slip" per il quale il momento ultimo teorico resistente della trave rinforzata (e conseguentemente la massima forza applicata alla trave) sia assimilabile al valore trovato in laboratorio.

Si è dunque fissato lo scorrimento e si è fatto variare, per tentativi, il carico supportabile dalle molle fino a che il momento resistente trovato sia approssimativamente pari a quello dedotto per via sperimentale.

Dalla prova di laboratorio si è desunto:

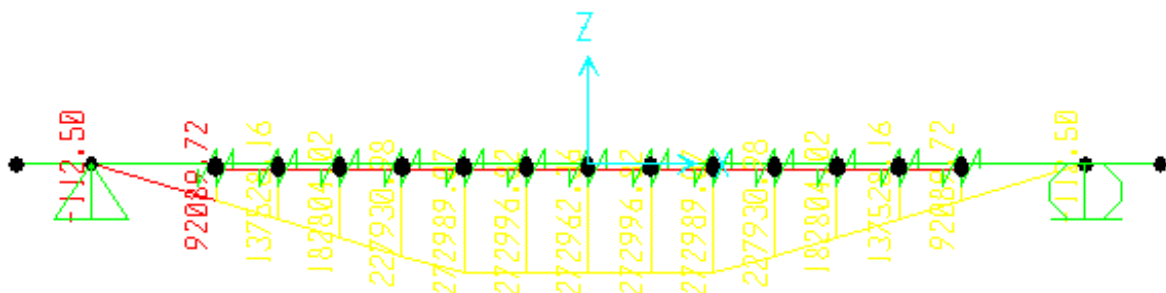
trave TF1 : " RINFORZO A FLESSIONE CON FIBRE DI CARBONIO + ADESIVO IPN"

TIPO DI ROTTURA: Delaminazione:(fessure a flessione ortogonali all'asse delle trave e conseguente distacco del rinforzo)

CARICO DI ROTTURA:

2 P = 7400 kg (P = 3700 kg)

Il modello numerico ha fornito i seguenti risultati:



Momento flettente massimo

Il momento ultimo risulta pari a 2730 kg m che corrisponde ad una forza applicata pari a $2730/0,75 = 3640$ Kg (= P).

Questo valore si è ottenuto per tentativi, partendo da un carico basso e aggiungendo step successivi di carico fino a raggiungere il carico di rottura ottenuto dalle prove.

La tensione di delaminazione che il rinforzo in FRP riesce a trasmettere prima di delaminare è pari a circa 7500 kg/cmq ($7500/1 = 7500$ Kg, con $l =$ area sezione FRP), (valore superiore a quanto desunto per via analitica (CNR DT200), come descritto in precedenza si era ottenuto tensione maxCNR = 6740 kg/cmq).

Pertanto sulle molle maggiormente caricate si ha una forza pari a:

$$7500 / \text{nr. molle} = 7500/5 = 1500 \text{ kg molla}$$

Si è trovato che il carico massimo che la molla (e dunque l'adesivo) riesce a trasmettere è pari a circa 1500 kg per ogni molla.

L'area di influenza di ogni molla è pari a:

$$t_c \cdot b = 2 \text{ cm} \cdot 20 \text{ cm} = 40 \text{ cm}^2$$

essendo:

$t_c =$ spessore di calcestruzzo che partecipa alla deformabilità di interfaccia

$b =$ influenza della molla = 20 cm.

Si ha pertanto che la tensione massima " τ " che l'adesivo riesce a trasmettere è pari a $\sim 1500/40 \sim 37 \text{ kg/cm}^2$.

Si ha :

" τ " massima = $\sim 28 \text{ kg/cm}^2$ (secondo le CNR DT 200 del 2012)

" τ " massima = $\sim 37 \text{ kg/cm}^2$ (secondo le elaborazioni numeriche)

Si riportano in output delle analisi svolte i seguenti diagrammi:

- diagramma scorrimento delle molle a taglio non lineari in funzione degli step di carico incrementali

- diagramma della forza esplicata dalle molle a taglio non lineari in funzione degli step di carico incrementali

- diagramma forza - scorrimento delle molle a taglio non lineari

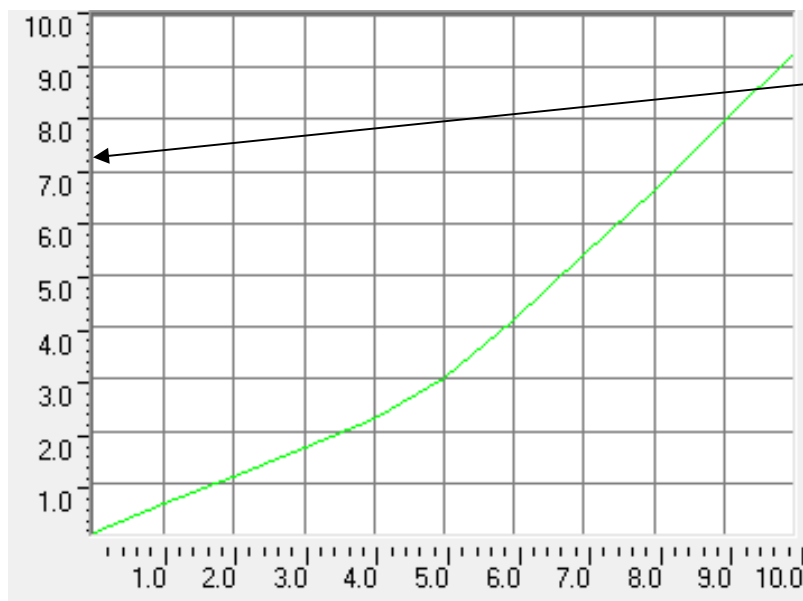
Tali diagrammi sono il risultato delle analisi svolte con il modello agli elementi finiti (SAP 2000): si ricava per via numerica il diagramma τ/s fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in frp.

Output codice di calcolo:

Il primo diagramma descrive l'aumento dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in frp all'aumentare del carico applicato alla trave (dallo step 1 allo step 10).

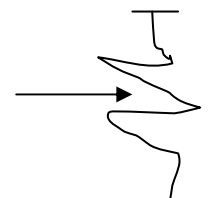
In ascissa sono riportati gli step successivi di carico (dallo step 1 allo step 10).

In ordinata è descritto lo scorrimento (in cm): si può notare che lo scorrimento massimo, in corrispondenza del quale si ha un cambiamento di rigidezza del diagramma (dove è presente il ginocchio), è pari a $0,003 \text{ cm} = 0,03 \text{ mm}$.



Scorrimento

diagramma scorrimento ($\text{cm} \cdot 10^{-3}$) in funzione degli step di carico incrementali



Il secondo diagramma descrive l'andamento della aderenza fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP, all'aumentare del carico applicato alla trave (dallo step 1 allo step 10), e gli step successivi di carico, riportati in ascissa.

La della forza di taglio è rappresentata nel modello numerico dalla forza esplicata dalla molla: la forza di aderenza massima si legge nel diagramma in corrispondenza del punto di flesso della curva, e risulta pari a 1500 kg. Si ricorda che l'area di influenza di ogni molla è pari a 40 cm² pertanto si può così ricavare la tensione tangenziale massima che risulta pari a: $\tau_{\max} = 1500 / 40 = 37 \text{ kg/cm}^2$.

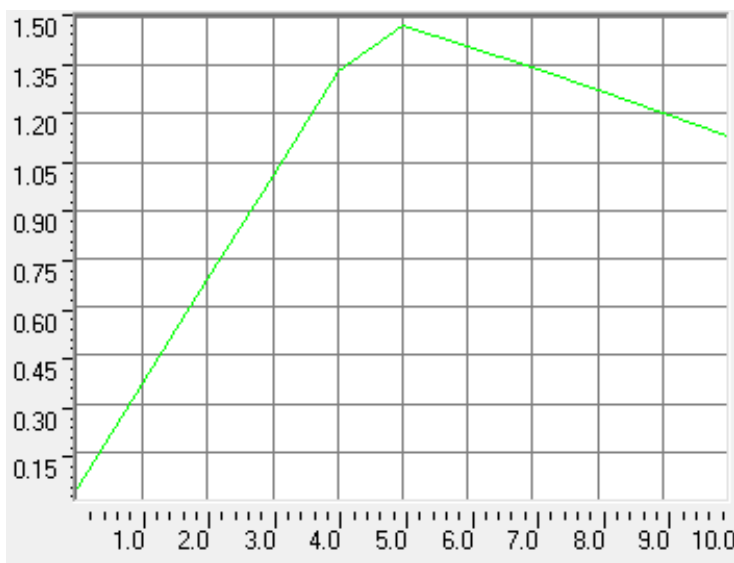


diagramma della forza esplicata (kg 10³) dalla molla in funzione degli step di carico incrementali

Il terzo e ultimo diagramma dei risultati numerici trovati non è altro che l'unione dei 2 diagrammi sopra descritti: è il **DIAGRAMMA TENSIONE DI ADERENZA - SCORRIMENTO.**

Si descrive infatti l'andamento della tensione di aderenza in funzione dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP.

In ordinata è riportata la tensione di aderenza e in ascissa lo scorrimento.

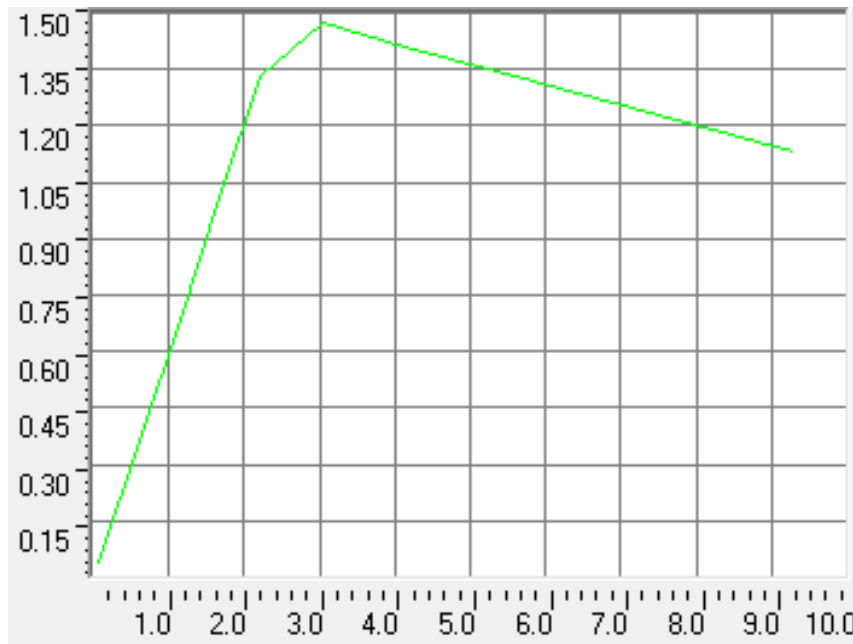
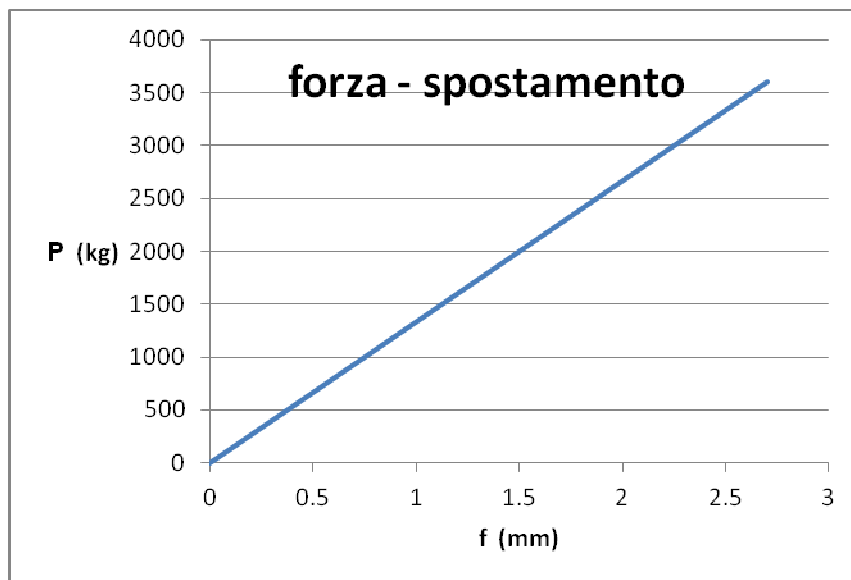


diagramma forza (kg 10³) - scorrimento (cm·10⁻³)

Si riporta infine, come ulteriore controllo di confronto fra il modello numerico e quello sperimentale, il diagramma carico - spostamento per la trave in oggetto.



In ascissa è riportata la freccia max (pari a 2,7 mm);
 in ordinata è riportato il carico impresso alla trave nei successivi step di carico (Pmax = 3640 kg).

Si ottengono risultati in linea con quelli sperimentali.

CONFRONTO CON LA TRAVE TFP: "RINFORZO A FLESSIONE CON FIBRE DI CARBONIO + RESINA EPOSSIDICA"

Vengono implementate opportune molle a taglio non lineari così definite:

passo longitudinale delle molle: 12,5 cm

Si ricerca quel particolare legame "τ-slip" per il quale il momento ultimo resistente della trave rinforzata (e conseguentemente la massima forza applicata alla trave) sia assimilabile al valore trovato in laboratorio.

Si è dunque fissato lo scorrimento e si è fatto variare, per tentativi, il carico sopportabile dalle molle fino a che il momento resistente trovato sia approssimativamente pari a quello dedotto per via sperimentale.

Dalla prova di laboratorio si è desunto:

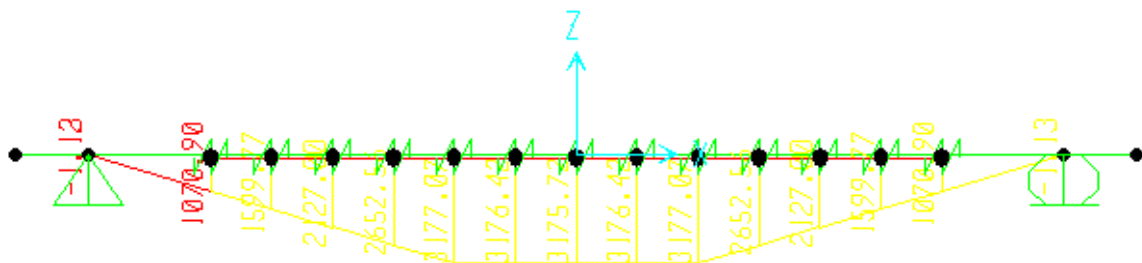
trave TF10 : " RINFORZO A FLESSIONE CON FIBRE DI CARBONIO + RESINA EPOSSIDICA"

TIPO DI ROTTURA: **Flessione**

CARICO DI ROTTURA:

2 P = 8400 kg (P = 4200 kg), raggiunto per step successivi, fino al carico di rottura.

Il modello numerico ha fornito i seguenti risultati:



Momento flettente massimo

Il momento ultimo risulta pari a 3175 kg m che corrisponde ad una forza applicata pari a $3175 / 0,75 = 4233$ Kg (= P).

Questo valore si è ottenuto per tentativi, partendo da un carico basso e aggiungendo step successivi di carico fino a raggiungere il carico di rottura ottenuto dalle prove.

La tensione massima che il rinforzo in FRP riesce a trasmettere prima di delaminare è pari a circa 7700 kg/cm² (valore superiore a quanto desunto per via analitica (CNR DT200), come descritto in precedenza si era ottenuto tensione max = 6740 kg/cm²).

Pertanto sulle molle maggiormente caricate si ha una forza pari a:

$$7700 / \text{nr. molle} = 7700/5 = 1540 \text{ kg molla}$$

Si è trovato che il carico massimo che la molla (e dunque l'adesivo) riesce a trasmettere è pari a circa 1540 kg.

L'area di influenza di ogni molla è pari a:

$$t_c \cdot b = 2 \text{ cm} \cdot 20 \text{ cm} = 40 \text{ cm}^2$$

essendo:

t_c = spessore di calcestruzzo che partecipa alla deformabilità di interfaccia

b = influenza della molla = 20 cm.

Si ha pertanto che la tensione massima " τ " che l'adesivo riesce a trasmettere è pari a $\sim 1540/40 \sim 39 \text{ kg/cm}^2$.

Tale valore di tensione tangenziale massima all'interfaccia calcestruzzo - adesivo/tessuto è in linea con quanto dedotto per via analitica.

Si ha infatti:

$$\tau \text{ massima} = \sim 28 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{secondo le CNR DT 200 del 2012})$$

τ massima = $\sim 37 \text{ kg/cm}^2$ (secondo le elaborazioni numeriche - rinforzo con FRP e resina a base acqua)

τ massima = $\sim 39 \text{ kg/cm}^2$ (secondo le elaborazioni numeriche - rinforzo con FRP e resina epossidica)

Si riportano in output delle analisi svolte i seguenti diagrammi:

- diagramma scorrimento delle molle a taglio non lineari in funzione degli step di carico incrementali
- diagramma della forza esplicata dalle molle taglio non lineari in funzione degli step di carico incrementali
- diagramma forza - scorrimento delle molle a taglio.

Tali diagrammi sono il risultato delle analisi svolte con il modello agli elementi finiti (SAP 2000):

si ricava per via numerica il DIAGRAMMA TENSIONE DI ADERENZA - SCORRIMENTO fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP.

Il primo diagramma descrive l'aumento dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in frp all'aumentare del carico applicato alla trave (dallo step 1 allo step 10).

In ascissa sono riportati gli step successivi di carico (dallo step 1 allo step 10).

In ordinata è descritto lo scorrimento (in cm): si può notare che lo scorrimento massimo, in corrispondenza del quale si ha un cambiamento di rigidezza del diagramma

(dove è presente il ginocchio), è pari a 0,003 cm = 0,03 mm.

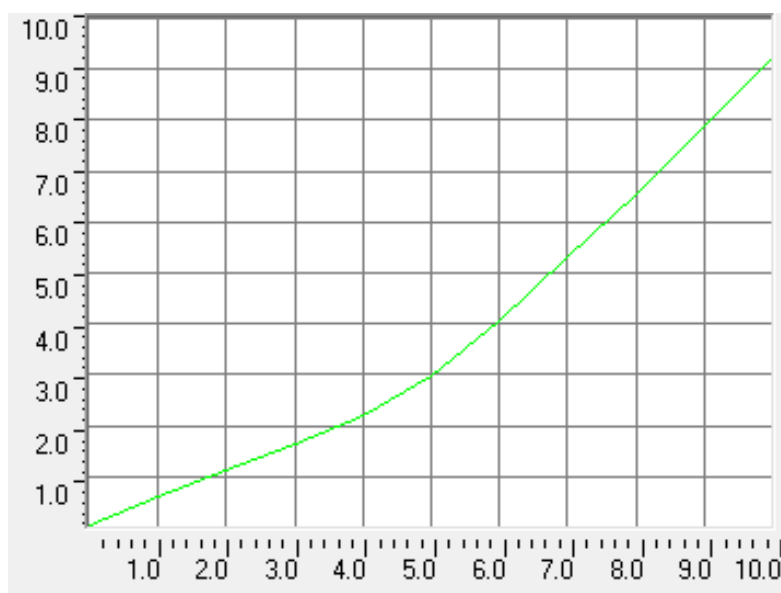


diagramma scorrimento ($\text{cm} \cdot 10^{-3}$) in funzione degli step di carico incrementali

Il secondo diagramma descrive l'andamento della tensione di aderenza fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP all'aumentare del carico applicato alla trave (dallo step 1 allo step 10).

In ascissa sono riportati gli step successivi di carico.

In ordinata è riportata la forza a taglio che è rappresentata nel modello numerico dalla forza esplicita dalla molla: essa si legge nel diagramma in corrispondenza del punto di flesso della curva, e risulta pari a 1540 kg. Si ricorda che l'area di influenza di ogni molla è pari a 40 cm² pertanto si può così ricavare la tensione tangenziale massima che risulta pari a: $\tau_{\max} = 1540 / 40 = 39 \text{ kg/cm}^2$.

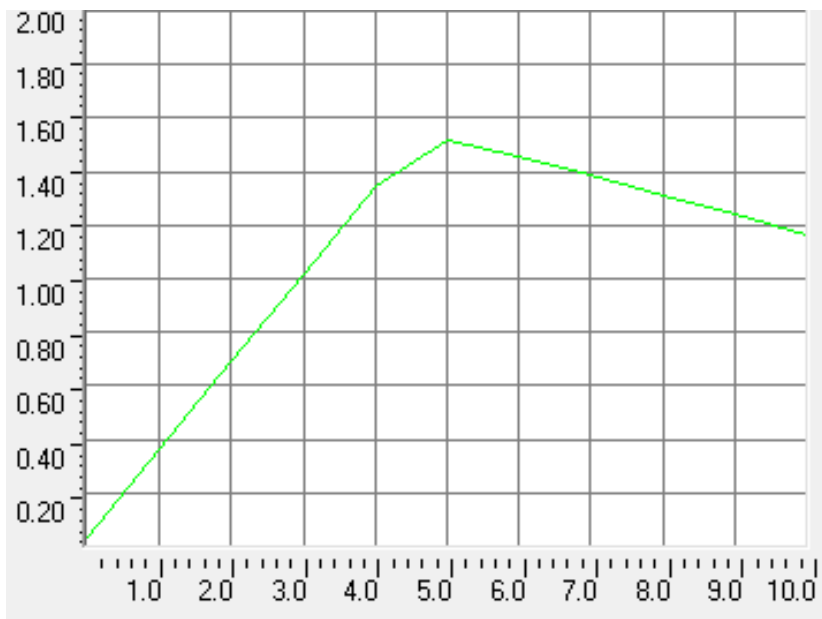


diagramma della forza esplicita (kg 10³) dalla molla in funzione degli step di carico incrementali

Il terzo e ultimo diagramma dei risultati numerici trovati non è altro che l'unione dei 2 diagrammi sopra descritti: è il

DIAGRAMMA TENSIONE DI ADERENZA - SCORRIMENTO.

Si descrive infatti l'andamento della tensione di aderenza in funzione dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP.

In ordinata è riportata la tensione di aderenza e in ascissa lo scorrimento.

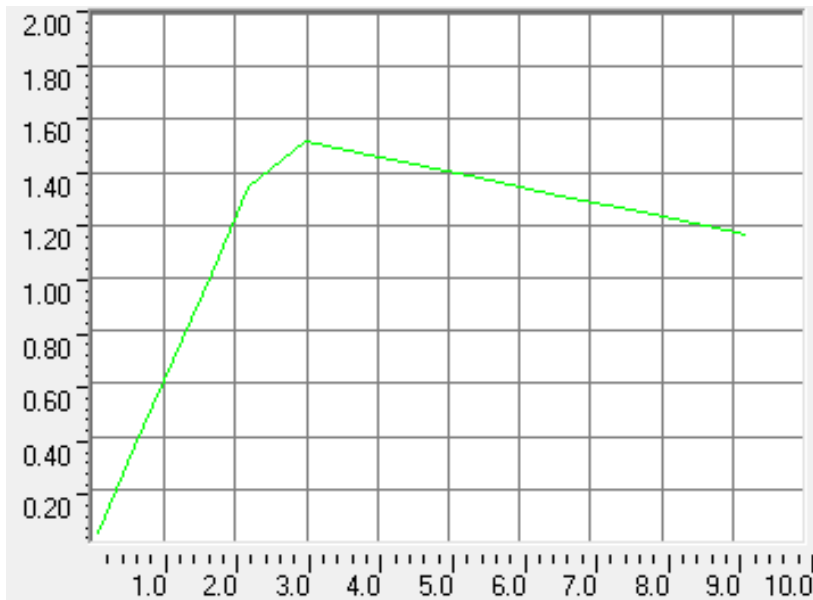
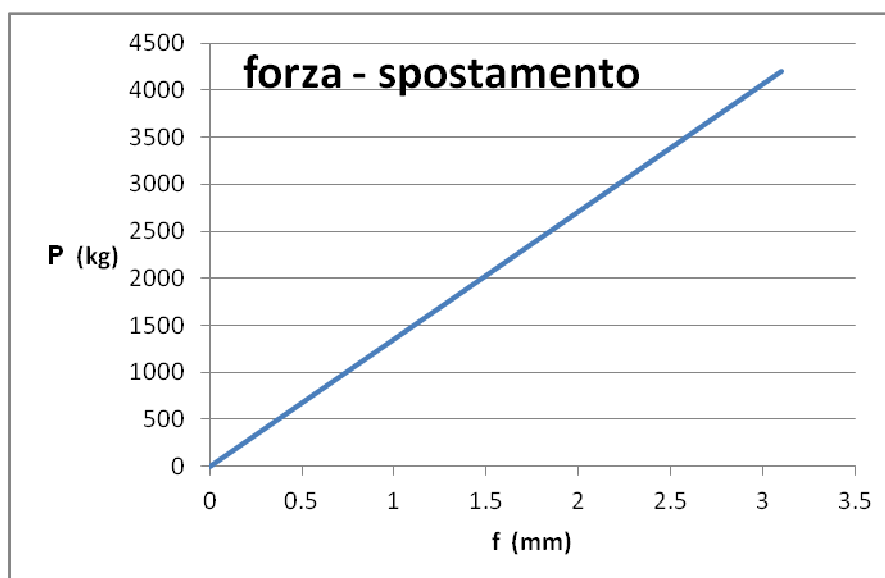


diagramma forza (kg 10³) - scorrimento (cm · 10⁻³)

Si riporta infine, come ulteriore controllo di uniformità fra il modello numerico e quello sperimentale, il diagramma carico - spostamento per la trave in oggetto.



In ascissa è riportata LA FRECCIA max (pari a 3,1 mm);
in ordinata è riportato il carico impresso alla trave nei
successivi step di carico (Pmax = 4218 kg)

Si ottengono risultati in linea con quelli sperimentali.

La modellazione numerica (f.e.m.) sviluppata introducendo un
legame di aderenza non lineare, a valere come la rigidezza
tangenziale delle molle che simulano l'adesivo, ha fornito
risultati interessanti.

In particolare per il tratto elastico lineare del legame i
risultati confermano che il legame di aderenza FRP-calcestruzzo è
ben definito dalle formulazioni esistenti (CNR DT 200 e FIB).

Per entrambi i casi esaminati (rinforzo a flessione in FRP con
resina a base acqua e rinforzo in FRP con resina epossidica) si
ottengono valori di tensioni tangenziali massime superiori a
quelle stimate per via analitica.

Nel seguito (**caso di studio 8**) verranno invece condotte analisi
numeriche per il caso di **rinforzo a taglio** con elementi in fasce
ad "U" in fibra di carbonio con resina a base acqua.

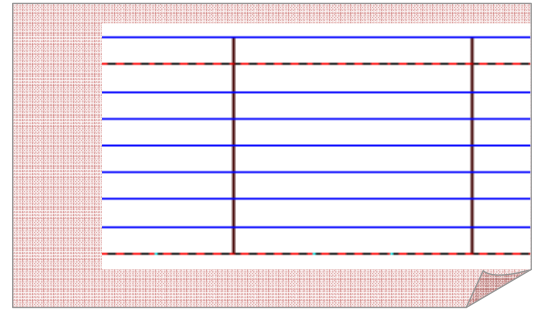
6. Caso di studio nr. 6- TRAVE ARMATA A FLESSIONE NON RINFORZATA : elementi biella e shell membranali

OBIETTIVI: ricavare nei due casi di modellazione, le tensioni max
dei materiali (cls e acciaio) e l'inclinazione delle bilelle
comprese di cls.

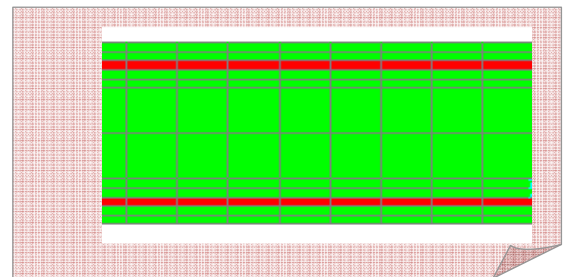
TRAVE NON RINFORZATA

- Vengono realizzati due diversi modelli agli elementi finiti,
nell'ambito dello studio a FLESSIONE, che vengono entrambi
utilizzati per ricavare le tensioni nei materiali della trave in
calcestruzzo non rinforzata a flessione.

- Il primo modello è realizzato con semplici elementi tipo biella
 (in blu gli "shell" che modellano il cls;
 (in rosso gli "shell" che modellano l'acciaio)



- Il secondo modello è realizzato con elementi "shell membranali"
 (in verde gli "shell" che modellano il cls;
 in rosso gli "shell" che modellano l'acciaio)


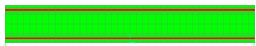


RISULTATI:

- Per entrambi i modelli (modello a bielle e modello a "shell membranali"), non rinforzati a flessione, si ricava la tensione nell'acciaio teso (che risulta pari a circa 4500 kg/cm^2) che si manifesta al raggiungimento del valore del carico ultimo pari rispettivamente a 1133 kg con il modello a bielle e 1138 kg con il modello a "shell" membranali.

Tali valori sono in linea con quanto ricavato per via sperimentale (per la trave non rinforzata a flessione): infatti il carico applicato risulta pari a 1100 kg.

In sintesi:

MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "BIELLA"					
Obiettivo del caso di studio nr.6.1: ricavare il carico e il momento di rottura per la trave in c.a. SENZA rinforzo a FLESSIONE					
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Carico di Rottura Analisi numerica 2P (kg)	Carico di Rottura Reale 2P (kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kg m)
Elementi biella Senza rinforzo a flessione	 SAP 2000	Analisi statica non lineare. (caso di studio 6.1)	2266	2200 (TF0 - flessione trave non rinforzata)	850
MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "SHELL MEMBRANALI"					
Obiettivo del caso di studio nr.6.2: ricavare il carico e il momento di rottura per la trave in c.a. SENZA rinforzo a FLESSIONE					
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Carico di Rottura Analisi numerica 2P (kg)	Carico di Rottura Reale 2P (kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kg m)
Elementi shell membranali Senza rinforzo a flessione	 SAP 2000	Analisi statica non lineare. (caso di studio 6.2)	2276	2200 (TF0 - flessione trave non rinforzata)	853

• Con il secondo modello analizzato (modello a "shell membranali") si può stimare in maniera indiretta l'angolo di inclinazione delle bielle compresse (angolo ϑ) rispetto all'orizzontale.

Il programma di calcolo SAP 2000 non fornisce infatti in maniera esplicita tale valore dell'angolo ϑ .

Si può però ricavare in modo approssimato per via indiretta, tramite proporzioni grafiche, tale angolo: si stima un angolo di inclinazione delle bielle compresse rispetto all'orizzontale pari a circa 23° .

Tale valore risulta in linea con quanto verrà ricavato in modo analitico nel caso di studio seguente (vedi caso 7): si troverà infatti che per la trave non rinforzata a taglio si ha un valore di $\vartheta = 21,8^\circ$.

SVOLGIMENTO DFETTAGLIATO ANALISI NUMERICHE

1) TRAVE TF0 MODELLATA CON ELEMENTI TIPO "BIELLA"

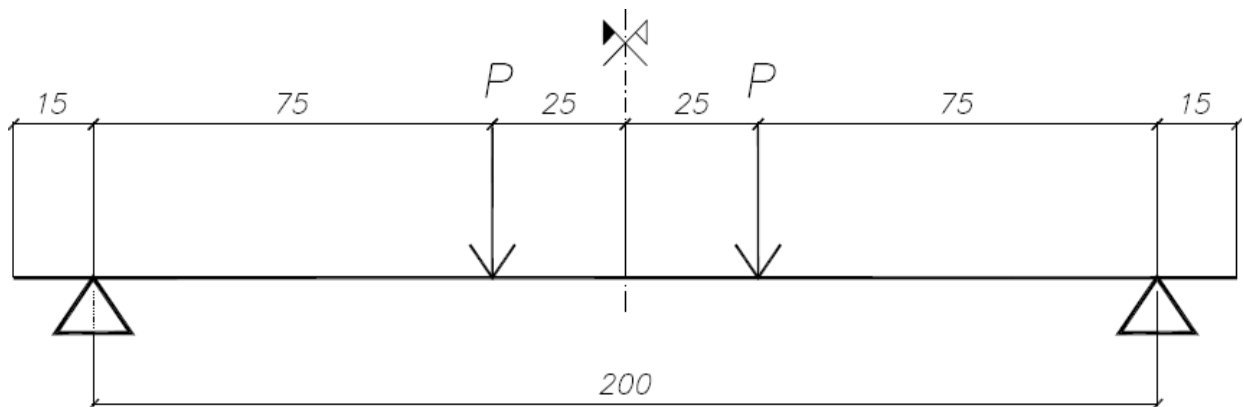
In questo **caso di studio** si conclude il percorso di studio numerico "flessionale" con un semplice ma significativo modello numerico con **elementi tipo "biella"**.

Vengono ricercati gli sforzi nei vari materiali (qui definiti come semplici bielle) e di nuovo effettuati i confronti in termini di carico ultimo con i risultati di laboratorio.

Lo schema statico è sempre quello di una trave in semplice appoggio soggetta a due carichi concentrati.

La trave è armata con soli 2Ø8 sup e 2Ø8 inf.

L'armatura a taglio è costituita da staffe Ø6 passo 15 cm.



schema statico e geometria (misure in cm)

Si riportano i principali risultati desunti dalle prove sperimentali di laboratorio sulla trave presa in esame.

La trave in questione è denominata trave tipo "TF0".

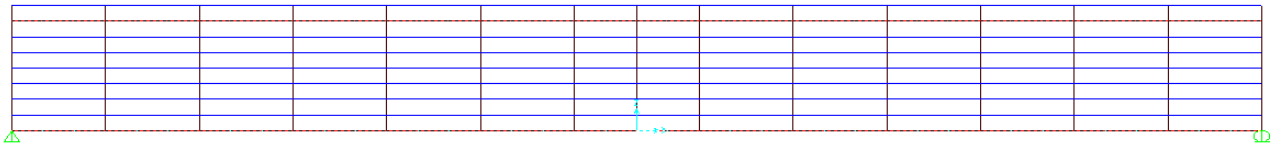
La rottura "reale" della trave che si è riscontrata durante le suddette prove si è manifestata a seguito dell'applicazione di un carico pari a 1100 Kg (= "P").

Il carico totale applicato sulla trave è dunque stato pari a " 2·P" (= 2200 Kg).

Il tipo di rottura che si è riscontrato è flessionale con formazione di lesioni nelle zone prossime alla mezzeria.

Si riportano nel seguito le principali caratteristiche del modello numerico realizzato con il programma agli elementi finiti "SAP 2000".

Come già anticipato in precedenza la trave è stata modellata con elementi di tipo "biella" e si è condotto lo studio numerico considerando uno stato piano di tensione.

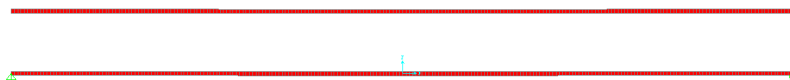


Vediamo nello specifico i singoli elementi inputati nel modello numerico e i parametri meccanici che li caratterizzano.

Armatura longitudinale:

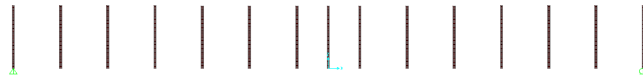
$A_{f,inf} = 2\varnothing8 \text{ inf.} = 2 \cdot 0,50 = 1,00 \text{ cm}^2$ (armatura inferiore)

$A_{f,sup} = 2\varnothing8 \text{ inf.} = 2 \cdot 0,50 = 1,00 \text{ cm}^2$ (armatura superiore)



Staffe:

$A_{staf} = 1\varnothing6 / 15 \text{ cm a } 2 \text{ braccia} = 2 \cdot 0,28 = 0,56 \text{ cm}^2$ (staffe)



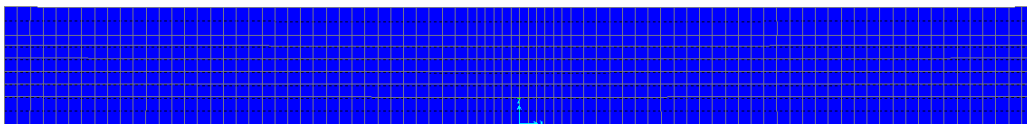
Bielle orizzontali di calcestruzzo:

peso proprio della trave = $2400 \cdot 0,20 \cdot 0,20 \cdot 2,00 = 192 \text{ kg}$

Il peso della parte retrostante gli appoggi pari a 15 cm è stato introdotto considerando in corrispondenza degli appoggi pari a una forza verticale e un momento flettente rispettivamente pari a:

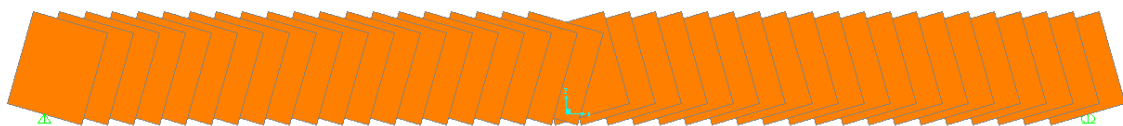
$$F = 2400 \cdot 0,20 \cdot 0,20 \cdot 0,15 = 14,4 \text{ kg} \quad (\text{su ogni appoggio})$$

$$M = 14,4 \cdot 0,15/2 = 1,08 \text{ kg m} \quad (\text{su ogni appoggio})$$



Puntoni inclinati di calcestruzzo:

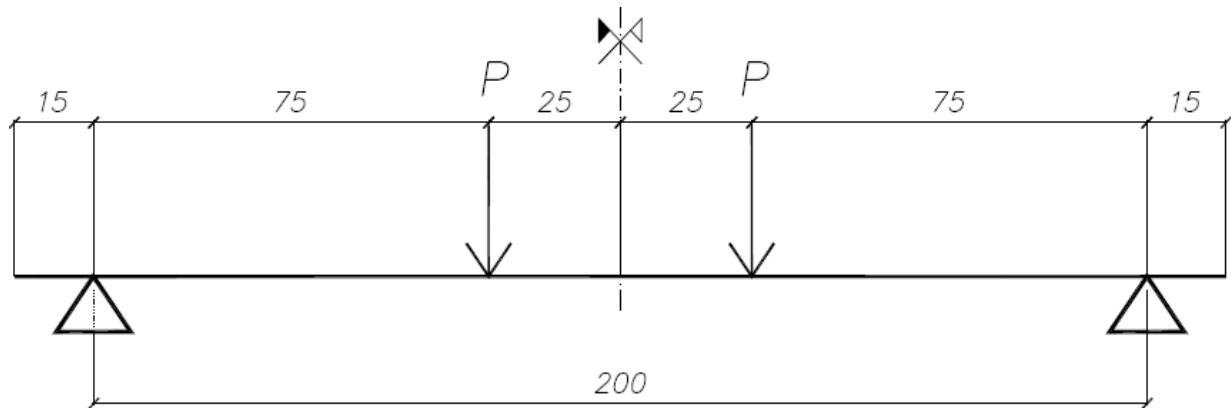
Vengono introdotti anche puntoni inclinati di calcestruzzo senza peso (per non computare due volte il peso della trave) che simulino il puntone compresso del traliccio di Ritter-Morsh, per chiudere il traliccio in cui sono già presenti le bielle di calcestruzzo orizzontali.



I carichi elementari implementati nel modello numerico sono i seguenti:

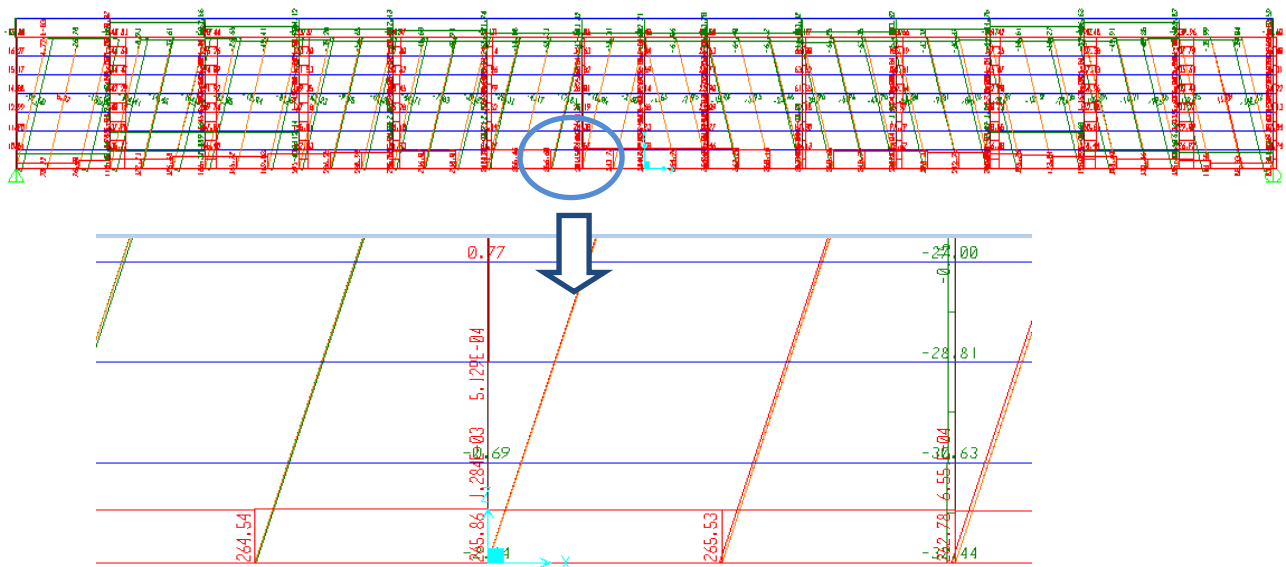
- peso proprio della trave
- carichi "P" (in totale 2 P) disposti come nella figura sotto riportata

I carichi "P" di partenza sono pari a 100 kg cadauno; si è poi incrementato tale valore fino a rottura attraverso una **analisi statica non lineare.**



Si riportano nel seguito i risultati maggiormente significativi in termini flessionali delle analisi condotte.

- peso proprio della trave



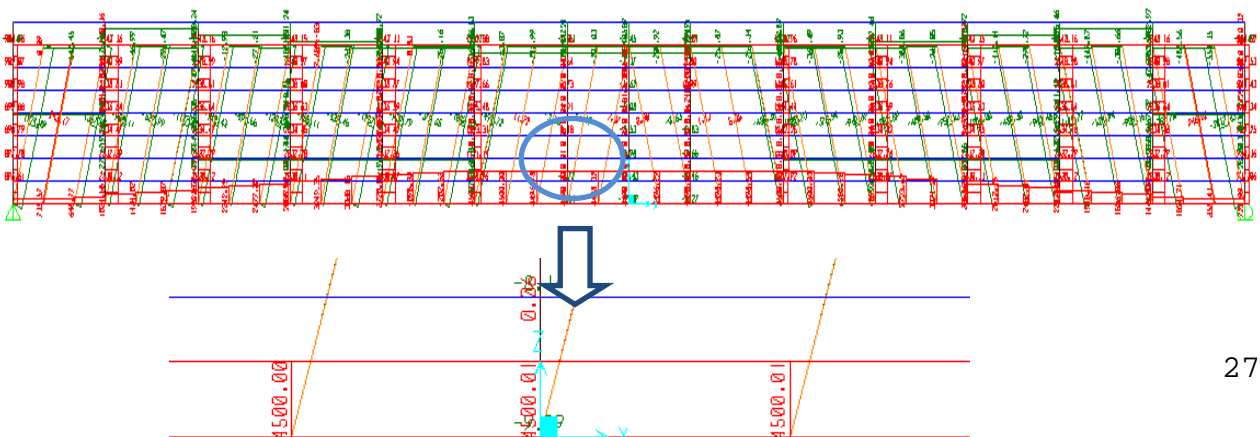
Lo sforzo assiale nell'armatura inferiore è pari a 265 kg.

Si sono considerate le seguenti combinazioni di carico.

La tensione nell'acciaio inferiore vale pertanto:

$$\sigma_s = N / A_{acc.} = 265 / (2 \cdot 0,50) = 265 \text{ kg/cm}^2$$

- peso proprio + carico "P" (in totale 2 P)



L'analisi statica non lineare viene interrotta al raggiungimento del carico massimo sopportabile dalla trave.

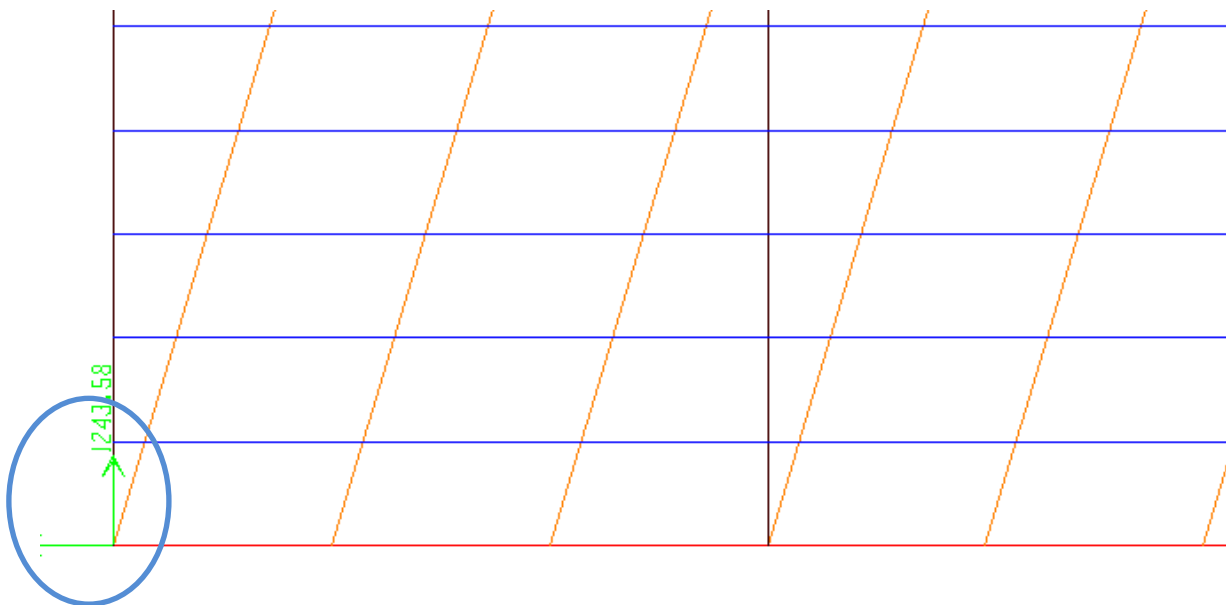
Lo sforzo assiale nell'armatura inferiore è pari a 4500 kg.

La tensione nell'acciaio inferiore vale pertanto:

$$\sigma_s = N / A_{acc.} = 4500 / (2 \cdot 0,50) = 4500 \text{ kg/cm}^2$$

Valutiamo ora qual'è il valore del carico "P" che provoca la rottura a flessione della trave in esame.

La reazione all'appoggio nello step di carico "ultimo", per il quale si raggiunge una tensione nell'acciaio pari a 4500 kg/cm², è pari a:



$$R1 = R2 = 1243 \text{ kg}$$

Da tale valore dobbiamo depurare il contributo fornito dal peso proprio della trave.

Ricordando che si ha:

$$\text{peso proprio della trave} = 2400 \cdot 0,20 \cdot 0,20 \cdot 2,00 = 192 \text{ kg}$$

Il peso della parte retrostante gli appoggi pari a 15 cm è stato introdotto considerando in corrispondenza degli appoggi pari a una forza verticale e un momento flettente rispettivamente :

$$F = 2400 \cdot 0,20 \cdot 0,20 \cdot 0,15 = 14,4 \text{ kg}$$

Si desume dunque un carico "P" pari a: (reazione globale all'appoggio - reazione di metà peso della trave - reazione della parte retrostante di trave)

$P = R1 - R_p.p.trave/2 - F = 1243 - 192/2 - 14,4 \sim 1133 \text{ Kg} \sim 11,11 \text{ KN}$

pertanto il carico globale è pari a:

$$2 P = 1133 \cdot 2 = 2266 \text{ Kg} \sim 22,22 \text{ KN} = 2222 \text{ Kg}$$

Con il modello a "bielle" si sono trovati risultati in linea con il modello sperimentale.

Infatti con la prova di carico si è trovato che la rottura "reale" della trave si è manifestata a seguito dell'applicazione di un carico pari a 1100 Kg (= "P").

Il carico totale applicato sulla trave è dunque stato pari a "2·P" (= 2200 Kg).

Il momento flettente agente sulla trave risulta pari a $1100 \cdot 0,75 = 825 \text{ Kg m}$

Con il modello numerico si è desunto un carico massimo sopportabile dalla trave prima di giungere al collasso per flessione pari a

$$P \sim 1133 \text{ Kg}$$

ed un carico globale pari a:

$$2 P \sim 2266 \text{ Kg}$$

Il momento flettente agente sulla trave risulta pari a $1133 \cdot 0,75 = 850 \text{ KN g}$

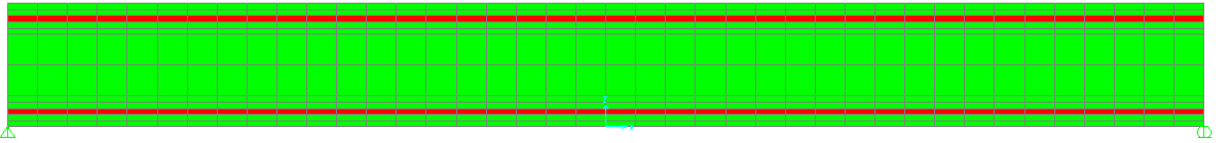
2) TRAVE TFO MODELLATA CON ELEMENTI TIPO "SHELL MEMBRANALI"-

Oltre al modello con elementi "beam" tipo biella viene realizzato anche un modello con elementi tipo "**shell membranali**".

Vengono ricercati gli sforzi nei vari strati di materiali (qui definiti "shell membranali") e di nuovo effettuati i confronti in termini di carico ultimo con i risultati di laboratorio.

Per la definizione dei parametri meccanici dei materiali, la geometria della trave e delle armature si fa riferimento al caso 1) precedentemente esposto.

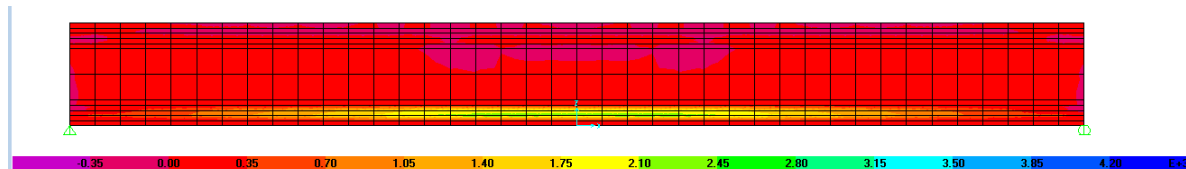
Si riportano nel seguito i risultati significativi del modello preso in esame.



modello con elemento "shell membranali"

L'analisi statica non lineare viene interrotta al raggiungimento della massima tensione sopportabile dall'armatura inferiore in acciaio.

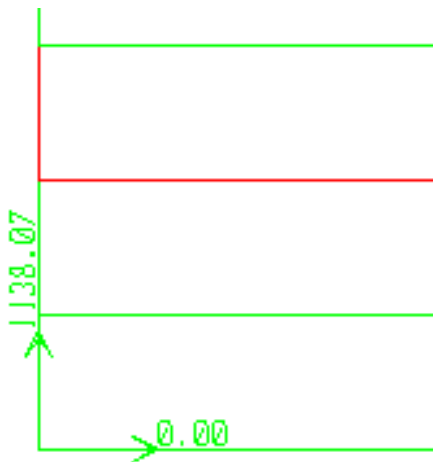
Si riportano le tensioni nei materiali a seguito dell'analisi svolta.



La tensione nell'armatura inferiore è pari a 4500 kg/cm^2 .

Valutiamo ora per quale valore del carico applicato si raggiunge il valore massimo di tensione nell'acciaio teso.

La reazione all'appoggio nello step di carico "ultimo", per il quale si raggiunge una tensione nell'acciaio pari a 4500 kg/cm^2 , è pari a:



$$R1 = R2 = P = 1138 \text{ kg}$$

pertanto il carico globale massimo, pari a:

$$2 P = 1138 \cdot 2 = 2276 \text{ kg}$$

Con il modello a "shell membranali" si sono trovati risultati in linea sia con il modello sperimentale che con il "modello a bielle" precedentemente esaminato.

modello "shell membranali":

$$P = 1138 \text{ kg} \quad (2P = 2276 \text{ kg})$$

modello sperimentale:

$$P = 1100 \text{ kg} \quad (2P = 2200 \text{ kg})$$

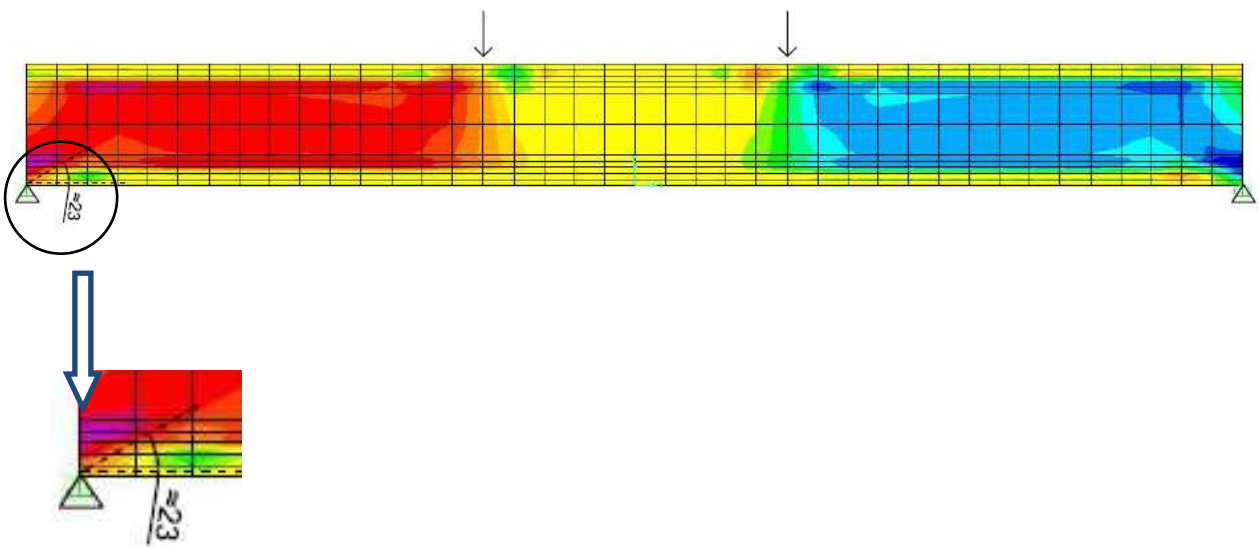
"modello a bielle":

$$P = 1133 \text{ kg} \quad (2P = 2266 \text{ kg})$$

Si vuole infine valutare l'inclinazione delle bielle compresse rispetto all'orizzontale.

Con il presente modello (si ricorda che si sono utilizzati "shell di tipo membranale") si può solo stimare in maniera indiretta l'angolo di inclinazione delle bielle compresse (angolo ϑ).

Il programma di calcolo SAP 2000 non fornisce infatti in maniera esplicita tale valore dell'angolo ϑ .



Per via indiretta, tramite proporzioni grafiche, si è stimato dunque un angolo di inclinazione delle bielle compresse rispetto all'orizzontale pari a circa 23 °.

Tale valore risulta in linea con quanto verrà ricavato in modo analitico nel capitolo seguente (vedi capitolo 7): si troverà infatti che per la trave non rinforzata a taglio si ha un valore di $\vartheta = 21,8^\circ$.

7. Caso di studio nr. 7 - TRAVI TT1 (senza rinforzo) e TT3(rinforzo con resine epoxy) ARMATE A TAGLIO: DETERMINAZIONE DEI VALORI DI Tult. E ANGOLI INCLINAZIONE BIELLE DI CLS

TAGLIO RESISTENTE DELLA TRAVE CON E SENZA RINFORZO A TAGLIO IN FRP.

IPOTESI:

- La trave viene modellata con elementi finiti tipo "beam".
 - Poichè si sta valutando il taglio resistente della trave, l'armatura a flessione è di area tale da evitare la rottura per flessione.
 - La trave viene rinforzata con fasce di tessuto larghe 10 cm poste a passo 20 cm tra di loro.
- Nel modello numerico vengono implementate cerniere plastiche a taglio aventi un valore massimo resistente del taglio pari al carico massimo applicato ottenuto nelle prove di laboratorio e che ha causato la rottura per taglio della trave.

Si ricorda che le cerniere plastiche sono zone plastiche concentrate disposte alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico.

- Per entrambi i casi esaminati, trave senza rinforzo e trave con rinforzo a taglio, si definisce l'angolo " ϑ " che le bielle compresse di calcestruzzo formano con l'asse della trave: tale

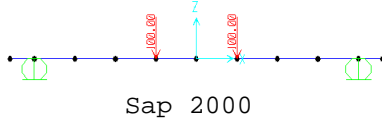
angolo vale rispettivamente per i 2 casi di studio $21,8^\circ$ (trave senza rinforzo a taglio) e $25,7^\circ$ (trave con rinforzo a taglio).

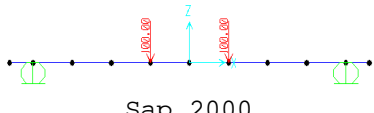
- Per entrambi i casi esaminati, trave senza rinforzo e trave con rinforzo a taglio, si definisce l'angolo " θ " che le bielle compresse di calcestruzzo formano con l'asse della trave: tale angolo vale rispettivamente per i 2 casi di studio $21,8^\circ$ (trave senza rinforzo a taglio) e $25,7^\circ$ (trave con rinforzo a taglio).

RISULTATI:

- In questo modello numerico la plasticizzazione è concentrata alle estremità, pertanto si riesce a ricavare solo lo scorrimento (la deformata a taglio) della sezione di estremità (che vale circa 1mm), dove è posta la cerniera plastica.
- Il limite di questo modello è di non riuscire a valutare la delaminazione del composito rispetto al supporto in quanto per definire il legame di aderenza calcestruzzo - composito occorre introdurre "molle a taglio non lineari" che simulino l'adesivo; questo verrà realizzato con un modellazione ad "hoc" (caso di studio n. 8).

SVOLGIMENTO DETTAGLIATO ANALISI NUMERICA

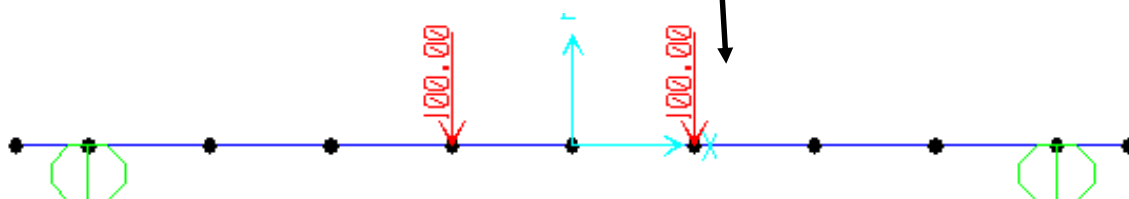
MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "BEAM CON CERNIERE PLASTICHE A TAGLIO"				
Obiettivo del caso di studio nr.7.1: ricavare il taglio resistente per la trave in c.a. SENZA rinforzo a <u>TAGLIO (TRAVE TT1)</u>				
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Taglio di rottura reale (Carico di Rottura Reale "2P") (kg)	Taglio resistente Analisi numerica (kg) 1) lato CLS 2) lato B450C + FRP
Elementi beam con cerniere plastiche localizzate a taglio senza rinforzo a taglio		<p>Analisi statica non lineare. Le cerniere plastiche a taglio sono zone plastiche concentrate disposte in SEZIONI alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico (caso di studio 7.1)</p>	<p>4500 (2P=9000)</p> <p>TT1 - TAGLIO- SENZA RINFORZO)</p>	<p>1) 4500 2) -</p>

MODELLO CON ELEMENTI "BEAM CON CERNIERE PLASTICHE A TAGLIO"				
Obiettivo del caso di studio nr.7.2: ricavare il taglio resistente per la trave in c.a. CON rinforzo a <u>TAGLIO (TRAVE TT3)</u>				
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Taglio di rottura reale (Carico di Rottura Reale "2P") (kg)	Taglio resistente Analisi numerica (kg) 1) lato CLS 2) lato B450C + FRP
Elementi beam con cerniere plastiche localizzate a taglio con rinforzo a taglio in fasce ad "U" in FRP	 Sap 2000	Analisi statica non lineare. Le cerniere plastiche a taglio sono zone plastiche concentrate disposte in SEZIONI alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico (caso di studio 7)	5600 2P=11200 TT3 - TAGLIO- CON FIBRA DI CARBONIO+ RESINE A BASE ACQUA IPN	1) 5600 2) -

IPOTESI:

• Nel presente caso viene analizzata sia la trave in c.a. senza rinforzo a taglio che la trave rinforzata a taglio con fasce di tessuto larghe 10 cm poste a passo 20 cm tra di loro.

La trave viene modellata con elementi finiti tipo "beam" (elementi trave). Il programma di calcolo utilizzato è il programma agli elementi finiti SAP 2000.



- Poichè stiamo valutando il taglio resistente della trave, l'armatura a flessione è tale da cercare di evitare la rottura per flessione.

- Nel modello numerico vengono implementate cerniere plastiche a taglio aventi come valore massimo resistente un valore del taglio pari a $V = 4500$ kg che è il carico massimo applicato alla trave nelle prove di laboratorio e che ha causato la rottura per taglio della trave.

Si ricorda che le cerniere plastiche sono zone plastiche concentrate disposte alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico.

- Per entrambi i casi esaminati, trave senza rinforzo e trave con rinforzo a taglio, si definisce l'angolo " θ " che le bielle compresse di calcestruzzo formano con l'asse della trave: tale angolo vale rispettivamente per i due casi di studio $21,8^\circ$ (trave senza rinforzo a taglio) e $25,7^\circ$ (trave con rinforzo a taglio).

RISULTATI:

- In questo **MODELLO NUMERICO** la plasticizzazione è concentrata alle estremità pertanto si riesce a ricavare solamente lo scorrimento (la deformata a taglio) della sezione di estremità (che vale circa 1mm) della trave dove è posta la cerniera plastica.

Il limite di questo modello è non riuscire a valutare la delaminazione del composito dal supporto in quanto per definire il legame di aderenza calcestruzzo - composito occorre introdurre "molle a taglio non lineari" che simulino l'adesivo; questo verrà realizzato con un modellazione ad "hoc" (caso di studio n. 8).

- In seguito, a completamento del presente caso di studio viene riportata la VERIFICA ANALITICA a taglio della sezione in c.a. rinforzata a taglio con FRP (calcolo secondo le CNR DT 200). Questo calcolo analitico è utile al fine di ottenere un confronto, in termini di taglio massimo resistente della trave rinforzata,

tra i risultati analitici e i risultati di laboratorio. Con il calcolo analitico effettuato si ottiene:

$V_{rd,f} = 2960 \text{ kg}$ (contributo alla resistenza a taglio delle fasce in FRP)
che sommato al contributo alla resistenza al taglio delle staffe $\varnothing 6/30$ presenti
 $V_{rsd} = 2416 \text{ kg}$ (contributo alla resistenza al taglio delle staffe $\varnothing 6/30$)
fornisce:

$V_R = 2960 + 2416 = 5376 \text{ kg}$ (massimo taglio resistente "staffe in acciaio" + "staffe in FRP")

Sempre con il calcolo analitico si ricava anche il contributo resistente " lato calcestruzzo " che vale: $V_{rcd} = 5786 \text{ kg}$. Tali valori sono in linea con i valori ricavati dalle prove di laboratorio:

la rottura per taglio si è avuta per valori del carico applicato pari a $P=5600$ ($2 \cdot P = 11200 \text{ kg}$).

TRAVI MODELLATE CON ELEMENTI TIPO "BEAM" E CERNIERE PLASTICHE A TAGLIO

(cerniere plastiche = zone plastiche concentrate disposte alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico)

In questo report di risultati si vuole ricavare il diagramma taglio / scorrimento delle cerniere plastiche del modello numerico che simuli il comportamento reale " a taglio" della trave.

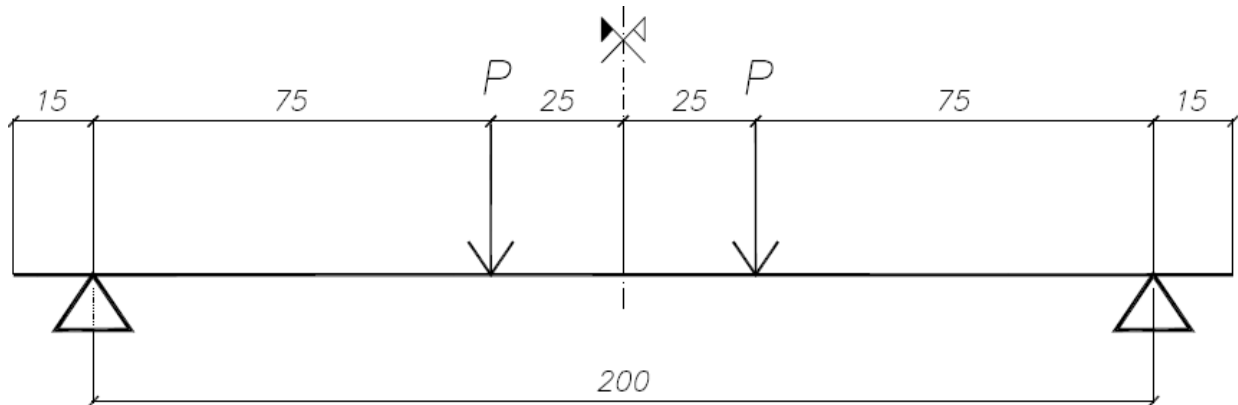
Il modello numerico (realizzato con il programma agli elementi finiti SAP 2000) verrà quindi tarato sulla base dei risultati delle evidenze sperimentali.

Lo schema statico è quello di una trave in semplice appoggio soggetta a 2 carichi concentrati.

caso 1) TRAVE NON RINFORZATA (trave sperimentale denominata **TT1**)

La trave è armata con 2Ø16 sup e 3Ø16 inf. (poichè stiamo indagando la rottura per taglio per cui occorre evitare la rottura per flessione).

L'armatura a taglio è costituita da staffe Ø6 passo 30 cm.



schema statico e geometria (misure in cm)

Si riportano i principali risultati desunti dalle prove sperimentali di laboratorio sulla trave presa in esame.

La trave in questione è denominata trave tipo "TT1".

La rottura "reale" della trave che si è riscontrata durante le suddette prove si è manifestata a seguito dell'applicazione di un carico pari a 4500 kg (= "P").

Il carico totale applicato sulla trave è dunque pari a "2·P" (= 9000 kg).

Il tipo di rottura che si è verificato è del tipo tagliante con formazione di lesioni in prossimità dell'appoggio.

Si riportano nel seguito le principali caratteristiche del modello numerico realizzato con il programma agli elementi finiti SAP 2000".

Come già anticipato in precedenza la trave è stata modellata con elementi di tipo "beam" e si è condotto lo studio numerico considerando uno stato piano di tensione.

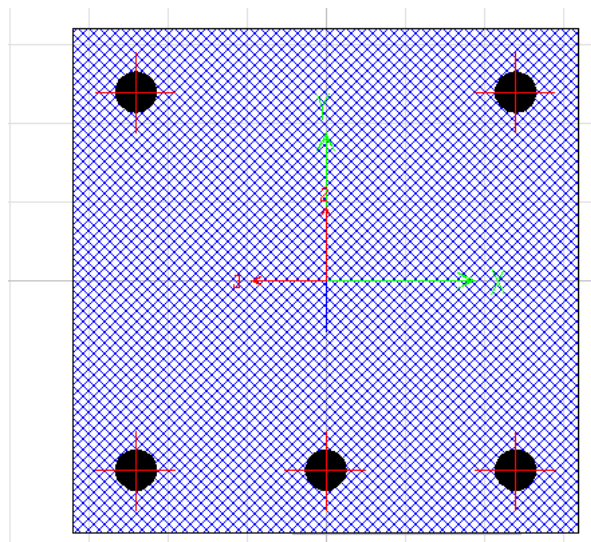
Vediamo nello specifico i singoli elementi inputati nel modello numerico e i loro parametri meccanici che li caratterizzano.

Armatura longitudinale:

$A_{f,inf} = 3\varnothing 16 \text{ inf.} = 3 \cdot 2,01 = 6,03 \text{ cm}^2$ (armatura inferiore)

$A_{f,sup} = 2\varnothing 16 \text{ sup.} = 2 \cdot 2,01 = 4,02 \text{ cm}^2$ (armatura superiore)

La sezione (o "frame") viene definita con la modalità "section designer" (maschera di SAP 2000 utilizzata per la definizione in input di sezioni generiche e con specificità definibili dall'utente) e viene di seguito riportata la schermata grafica:



sezione 20x20 cm

Staffe:

$A_{staf} = 1\varnothing 6 / 30 \text{ cm a } 2 \text{ braccia} = 2 \cdot 0,28 = 0,56 \text{ cm}^2$ (staffa)

Il contributo di resistenza al taglio fornito dalle staffe viene tenuto in conto attraverso la definizione della cerniera plastica a taglio (cerniere plastiche = zone plastiche concentrate disposte alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico).

Infatti per la sua definizione occorre specificare il valore del taglio massimo che la sezione riesce a sopportare; superato tale valore si ha infatti la rottura per taglio dell'elemento strutturale.

Nel modello numerico vengono implementate cerniere plastiche a taglio aventi come valore del taglio massimo resistente $V = 4500$ kg, che è il carico massimo applicato alla trave nelle prove di laboratorio e che ha causato la rottura per taglio della trave.

Ricaviamo anche, con semplici passaggi analitici, il valore del taglio massimo resistente della trave utilizzando per lo scopo le formule delle NTC'08.

Poichè dalla prova "reale" si è trovato un valore di "P"=4500 kg (in totale $2 \cdot P = 9000$ kg) e quindi di taglio ultimo pari a 4500 kg, si ricava a ritroso il valore della $\text{ctg}\vartheta$.

$V_{ED} = 4500$ kg (sollecitazione di calcolo = carico massimo da prove sperimentali)

poniamo uguali V_{ED} e V_{RCD} (taglio resistente lato acciaio).

$$V_{ED} = V_{RCD} \rightarrow 4500 =$$

$$d = 17,5 \text{ cm (altezza utile)}$$

$$b_w = 20 \text{ cm (larghezza sezione)}$$

$$\sigma_c = 1,00 \text{ (per membrature non precomprese)}$$

$$f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \sigma_c = 91 \text{ kg/cm}^2 \text{ (tensione di "design" a compressione del calcestruzzo)}$$

$$\rightarrow \text{ctg}\vartheta / (1 + \text{ctg}^2\vartheta) = 0,313 \rightarrow$$

$$\text{ctg}\vartheta = \{1/0,313 + [(1/0,313)^2 - 4]^{(1/2)}\} / 2 = 2,83$$

$$\text{essendo } 1,00 \leq \text{ctg}\vartheta \leq 2,5 \rightarrow \text{ctg}\vartheta = 2,5 \quad (\vartheta = 21,8^\circ)$$

Ciò significa che le bielle compresse di calcestruzzo formano un angolo di $21,8^\circ$ con l'asse della trave.

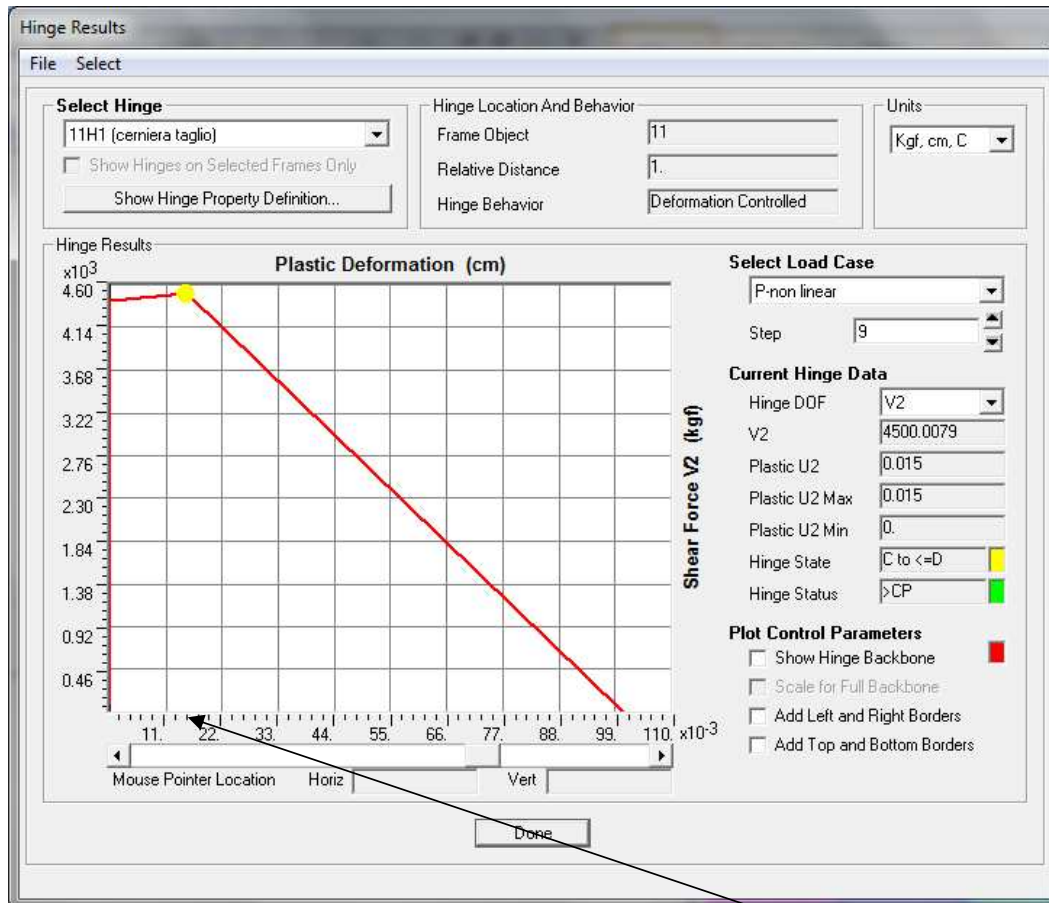
La cerniera a taglio, modellata come sopra, potrà dunque sopportare un carico massimo pari a 4500 kg prima di plasticizzarsi.

I carichi elementari implementati nel modello numerico sono i seguenti:

- peso proprio della trave
- carichi "P" (in totale 2 P) disposti come nella figura sotto riportata

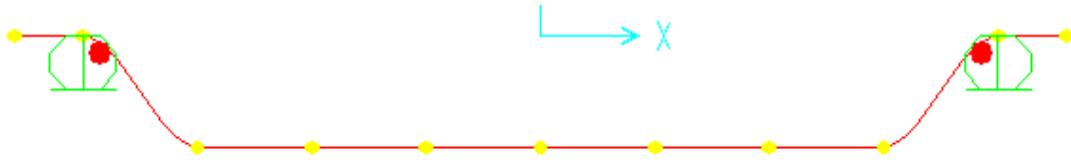
I carichi "P" di partenza sono pari a 100 kg cadauno; si è poi incrementato tale valore fino a rottura attraverso una **analisi statica non lineare**.

Si riportano i risultati in termini di taglio / scorrimento della cerniera plastica.



Si può notare che in corrispondenza del valore massimo del taglio sopportabile si ha uno scorrimento pari a 0,16 mm; da tale valore in poi il carico massimo sopportabile dalla trave decresce fino allo scorrimento massimo pari a 1 mm che si ha in corrispondenza del collasso della trave.

Si riporta inoltre il diagramma della deformata che evidenzia la formazione delle cerniere plastiche a taglio (step di carico che porta a collasso la trave per taglio).

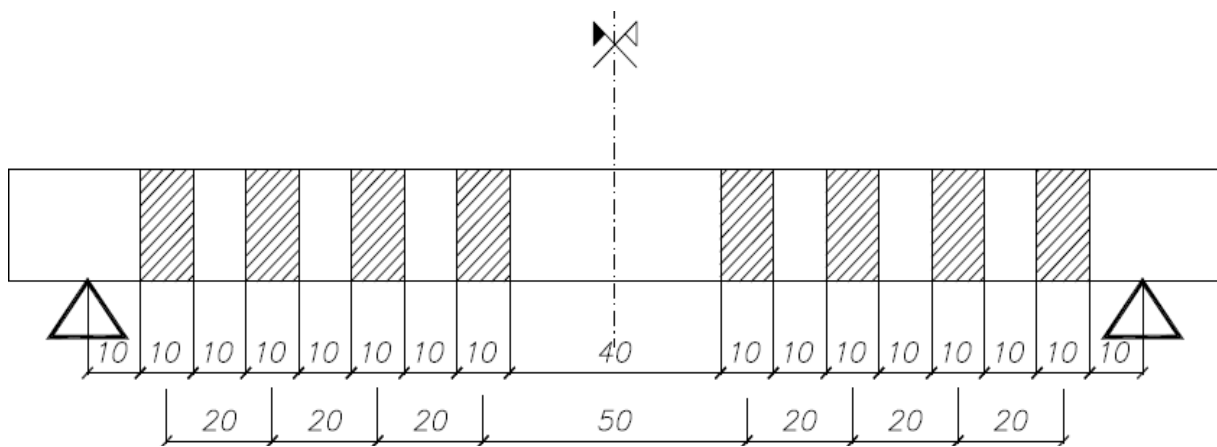


Si osserva che si è giunti a collasso per taglio (cerniere plastiche a taglio di colore rosso).

caso 2) TRAVE RINFORZATA A TAGLIO (trave sperimentale denominata **TT3**)

La trave è armata con 2Ø16 sup e 3Ø16 inf. (per cercare di scongiurare la rottura per flessione).

L'armatura a taglio è costituita da **fasce di tessuto larghe 10 cm a passo 20 cm** tra di loro oltre alle staffe di base pari a 106/30 cm.



schema "staffe" in FRP passo 20 cm

Si riportano i principali risultati desunti dalle prove sperimentali di laboratorio per la trave presa in esame.

La rottura "reale" della trave che si è riscontrata durante le suddette prove si è manifestata a seguito dell'applicazione di un carico pari a 5600 kg (= "P").

Il carico totale applicato sulla trave è dunque stato pari a

" 2·P" (= 11200 kg).

Il tipo di rottura che si è riscontrato è di tipo tagliante con formazione di lesioni in prossimità dell'appoggio.

Si riportano nel seguito le principali caratteristiche del modello numerico realizzato con il programma agli elementi finiti SAP 2000.

Come già anticipato in precedenza la trave è stata modellata con elementi di tipo "beam" e si è condotto lo studio numerico considerando uno stato piano di tensione.

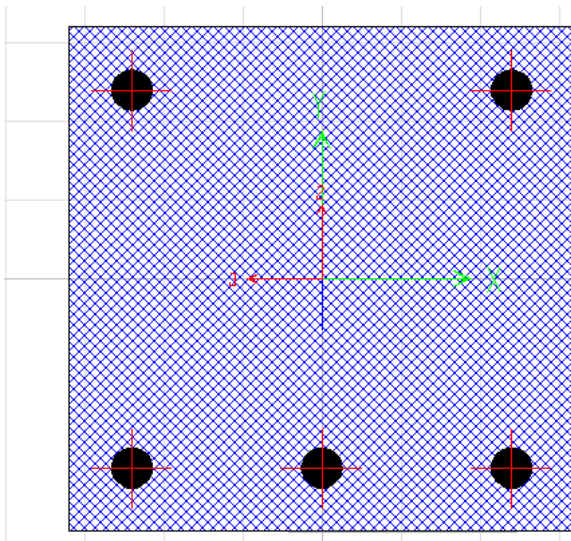
Vediamo nello specifico i singoli elementi inputati nel modello numerico e i loro parametri meccanici che li caratterizzano.

Armatura longitudinale:

$A_{f,inf} = 3\varnothing 16 \text{ inf.} = 3 \cdot 2,01 = 6,03 \text{ cm}^2$ (armatura inferiore)

$A_{f,sup} = 2\varnothing 16 \text{ sup.} = 2 \cdot 2,01 = 4,02 \text{ cm}^2$ (armatura superiore)

La sezione "frame" viene definita con la modalità "section designer" e viene di seguito riportata la schermata grafica:



sezione 20x20 cm

Staffe:

$A_{staf} = 1\varnothing 6 / 30 \text{ cm a } 2 \text{ braccia} = 2 \cdot 0,28 = 0,56 \text{ cm}^2$
(staffa)

staffe aggiuntive costituite da strisce di tessuto larghe 10cm interasse 20 cm tra di loro disposte a "U" che fasciano la trave in c.a.

A staffe in FRP = 10 x 2 lati x 0,05 = 1 cm² di tessuto a "staffa"

Nella presente analisi non si tiene conto della delaminazione in quanto per definire il legame di aderenza calcestruzzo - staffe in FRP occorre introdurre "molle a taglio non lineari" che simulino tale legame; questo verrà definito con un modellazione ad "hoc" (caso di studio n. 8).

In questo modello la plasticizzazione è concentrata alle estremità della trave e obiettivo della analisi è valutare lo scorrimento della sezione (la deformata a taglio) di estremità che si plasticizza via via che si incrementa il carico nella trave (carico precedentemente denominato carico "P").

Occorre anche per questo caso, specificare il valore del taglio massimo che la sezione riesce a sopportare; superato tale valore si ha infatti la rottura per taglio dell'elemento strutturale.

Nel presente modello numerico vengono implementate cerniere plastiche a taglio aventi come valore massimo resistente un valore del taglio pari a $V = 5600$ kg, che è il carico massimo applicato alla trave nelle prove di laboratorio e che ha causato la rottura per taglio della trave.

Ricaviamo anche per questo modello, con semplici passaggi analitici, il valore del taglio massimo resistente della trave **rinforzata a taglio con fasce di FRP**, utilizzando per lo scopo le formule delle NTC'08.

Poichè dalla prova "reale" si è trovato un valore di "P"=5600 kg (in totale 2·P=11200 kg) e quindi di tagliante ultimo pari a 5600 kg si ricava a ritroso il valore della $ctg\theta$.

$V_{ED} = 5600$ kg (sollecitazione di calcolo = carico massimo da prove sperimentali)

poniamo uguali V_{ED} e V_{RCD} (taglio resistente lato acciaio).

$$V_{ED} = V_{RCD} \rightarrow 5600 =$$

$$d = 17,5 \text{ cm (altezza utile)}$$

$$V_{rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot \frac{ctg\theta}{1+ctg^2\theta}$$

$b_w = 20 \text{ cm}$ (larghezza sezione)

$\alpha_c = 1,00$ (per membrature non precomprese)

$f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 91 \text{ kg/cm}^2$ (tensione di design a compressione del calcestruzzo)

$\rightarrow \text{ctg} \vartheta / (1 + \text{ctg}^2 \vartheta) = 0,391 \rightarrow$

$\text{ctg} \vartheta = \{1/0,391 + [(1/0,391)^2 - 4]^{(1/2)}\} / 2 = 2,08$

$\rightarrow \text{ctg} \vartheta = 2,08 \quad (\vartheta = 25,7^\circ)$

Ciò significa che le bielle compresse di calcestruzzo formano un angolo di $25,7^\circ$ con l'asse della trave.

In appendice viene riportato il calcolo e verifica del rinforzo a taglio in FRP condotto secondo le CNR DT 200 del 2012.

Nel modello numerico verrà dunque implementata una cerniera plastica avente come valore massimo del taglio sopportabile pari a 5600 kg.

Obiettivo dell'analisi è infatti ricavare il diagramma taglio / scorrimento della cerniera plastica.

I carichi elementari implementati nel modello numerico sono i seguenti:

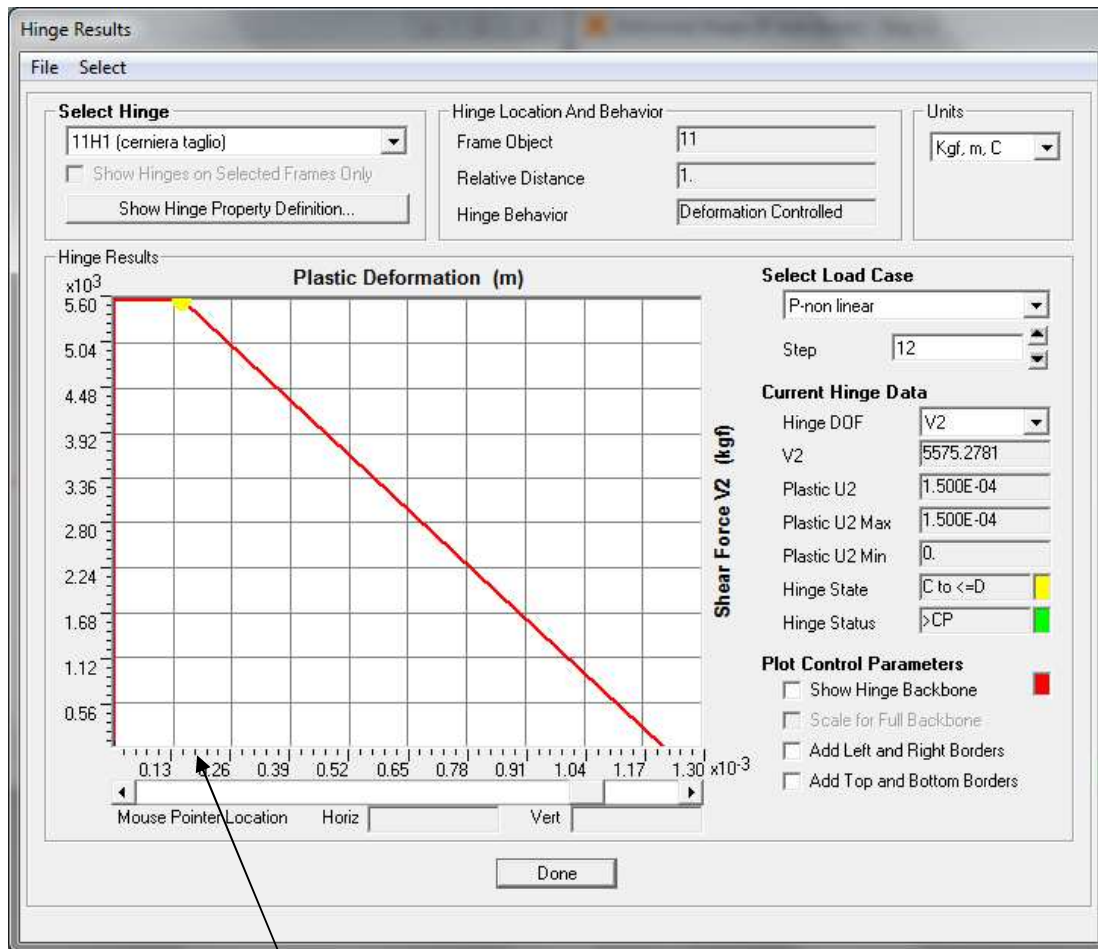
- peso proprio della trave

- carichi "P" (in totale 2 P) disposti come nella figura sotto riportata

I carichi "P" di partenza sono pari a 100 kg cadauno; si è poi incrementato tale valore fino a

rottura attraverso una **analisi statica non lineare.**

Si riportano i risultati in termini di taglio / scorrimento della cerniera plastica.



0,16 mm

Si può notare che in corrispondenza del valore massimo del taglio sopportabile si ha uno scorrimento pari a 0,16 mm; da tale valore in poi il carico massimo sopportabile dalla trave decresce fino allo scorrimento massimo pari a 1,2 mm che si ha in corrispondenza del collasso della trave.

Si riporta inoltre il diagramma della deformata che evidenzia la formazione delle cerniere plastiche a taglio (step di carico che porta a collasso la trave per taglio).



Si osserva che in questo caso la formazione delle cerniere a taglio avviene quasi contemporaneamente alla crisi per flessione

(formazione sia delle cerniere a taglio che delle cerniere flessionali). Ciò significa che oltre a rompersi a taglio, subito dopo, avviene la crisi per flessione.

Quello che si evidenzia dal presente caso di studio è che le "staffe" aggiuntive in FRP da 10 cm disposte a passo 20 cm (oltre alle staffe Ø6/30cm già presenti) in fibra di carbonio costituiscono una robusta staffatura che incrementa notevolmente la resistenza a taglio lato acciaio.

Si passa infatti da un carico "P" massimo sopportabile pari a 4500 kg (trave non rinforzata), ($2 \cdot P = 9000$ kg) ad un carico sopportabile pari a 5600 kg ($2 \cdot P = 11200$ kg); si ha un incremento di circa il 24 % ($5600/4500$).

Valutiamo ora come caso limite qual è il valore massimo di taglio sopportabile lato calcestruzzo.

Il valore massimo si ha per una configurazione (puntone compresso/staffe in FRP) tale per cui:

$$\text{ctg}\vartheta = 1,00 \quad (\vartheta = 45^\circ)$$

$$V_{rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot \frac{\text{ctg}\theta}{1 + \text{ctg}^2\theta}$$

$$\rightarrow V_{RCD} = 0,9 \cdot 17,5 \cdot 20 \cdot 1,00 \cdot 1/2 \cdot 91 \cdot 1/(1+1) = 7166 \text{ kg}$$

Questo valore di taglio "lato calcestruzzo" è il limite superiore di taglio che la sezione in c.a. può sopportare; infatti mentre lato FRP (e quindi nel presente caso con fasciatura ad "U" in FRP) si può incrementare la resistenza a taglio aumentando ad esempio gli strati di tessuto che costituiscono le fasciature stesse, lato calcestruzzo si è giunti al valore massimo di taglio resistente della sezione.

APPENDICE

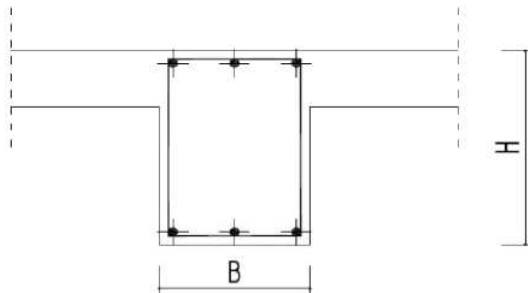
MODELLO ANALITICO: CNR (DT 200)				
Obiettivo del caso di studio nr.7.3: ricavare il taglio resistente della trave rinforzata con fasce di tessuto				
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Taglio di rottura reale (Carico di Rottura Reale "2P") (kg)	Taglio resistente Analisi numerica (kg) 1) lato CLS 2) lato lato B450C + FRP
CNR (DT 200 del 2012) Trave rinforzata a taglio con fasce ad "U" in FRP	excel	Calcolo del taglio resistente con fasce ad "U" in frp di rinforzo. Calcolo del diagramma τ -scorrimento	5600 (2P=11200) (TT3 - TAGLIO CON FIBRA DI CARBONIO+ RESINE A BASE ACQUA (IPN))	1) 5786 2) 5376

Calcolo del rinforzo a taglio in FRP secondo le CNR DT200 del 2012

(Le formule della CNR DT 200 impostate nelle unità di misura internazionali (mm, KN, MPa))

SEZIONE (ESISTENTE) DA VERIFICARE A TAGLIO

SENZA RINFORZO A TAGLIO IN FRC



B =	20	cm	
H =	20	cm	
c =	2.5	cm	
d =	17.5	cm	
ϕ =	6	mm	diametro staffe
nr. braccia =	2		
Asw =	0.57	cm ²	
s =	30	cm	passo staffe
Asw/mt =	1.88	cm ² /m	
f _{yd} =	391.30	N/mm ²	

$$V_{RD} (SLU) = \min (V_{RSD}; V_{RCD})$$

$$V_{rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot \frac{ctg \theta}{1 + ctg^2 \theta} \quad \text{NTC '08} \quad \text{Calc}$$

max per $ctg\theta = 1,00 \rightarrow \theta = 45^\circ$

d =	17.5	cm	
α_c =	1	per membrature non precomprese	$1 \leq ctg \theta \leq 2,5$
$ctg\theta$ =	2.08	V _{rcd} è minimo se $ctg\theta$ è massimo: valutare i 2 CASI LIMITE	
θ =	25.68	°	
f _{cd} =	9.4	N/mm ²	
V _{rcd} =	57.86	KN	

$$V_{rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot ctg \theta \quad \text{max per } ctg\theta = 2,50 \rightarrow \theta = 21,80^\circ \quad \text{A}$$

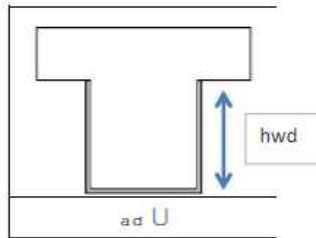
$$V_{rsd} = 24.16 \text{ KN}$$

$$V_{RD} (SLU) = \min (V_{RSD}; V_{RCD}) = 24.16 \text{ KN}$$

**TAGLIO RESISTENTE DI PROGETTO (ALLO SLU)
IN ASSENZA DI RINFORZO CON FRC**

RINFORZO ADOTTATO A TAGLIO

TIPO A "U" (VERTICALE O INCLINATO)



SCEGLIERE IL TIPO DI RINFORZO : CONTINUO "C", DISCONTINUO "D"
(INFLUENZA IL CALCOLO DI "b" LARGHEZZA DEL SUPPORTO)

D

Riepilogo FRC adottato

FC =	<input type="text" value="1.00"/>	(fattore di confidenza 1,35; 1,20 ; 1,00)
KG =	<input type="text" value="0.04"/> mm	da prove sperimentali; 0,023 per i compositi preformati; 0,037 per i compositi impregnati in situ
tf =	<input type="text" value="0.500"/> mm	(spessore rinforzo) VALORI TIPICI PER "E" (tessuti)
Ef =	<input type="text" value="215385"/> N/mm ²	(modulo elastico) 240 Gpa = 240000 N/mm ² 390 Gpa = 390000 N/mm ²
nr. =	<input type="text" value="1"/>	nr. strati di tessuto di tentativo <input type="text" value="Considerato"/>
tf,ris =	<input type="text" value="0.500"/> mm	(spessore rinforzo risultante = nr. strati x tf)
β =	<input type="text" value="90"/>	angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento
ctgθ =	<input type="text" value="2.08"/>	VRd,f è minimo se ctgθ è minimo = 1,00
θ =	<input type="text" value="25.68"/> °	valore utilizzato per calcolare il contributo resistente a taglio del rinforzo FRC
d =	<input type="text" value="17.5"/> cm	altezza utile sezione
hw =	<input type="text" value="20"/> cm	altezza dell'anima della trave che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U (può essere anche minore di Htrave - hsol,sup; ma deve essere maggiore della lunghezza di ancoraggio, min 20 cm)

hw,adottato = mm

digitare il valore se il rinforzo è DISCONTINUO altrimenti lasciare vuoto

bf = mm larghezza delle strisce

digitare il valore se il rinforzo è DISCONTINUO altrimenti lasciare vuoto

pf = mm passo delle strisce (verticali);

b = mm larghezza supporto

se il rinforzo è CONTINUO calcolo automatico di bf

bf = mm

se il rinforzo è CONTINUO calcolo automatico di pf

pf = mm

N.B. Se il rinforzo è continuo pf = bf

$b = p_f$ nel caso di sistemi di rinforzo discontinui sotto forma di strisce,

$b = b_f = \min\{0.9 \cdot d, h_w\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ nel caso di sistemi di rinforzi continui o di strisce adiacenti.

Kb =

$$k_s = \sqrt{\frac{2-b_f/b}{1+b_f/b}} \geq 1, \quad \text{Kb varia tra 1,00 (bf=b/2) e 1,18 (bf=b/4)}$$

VERIFICHE CNR DT 200-2012

TAGLIO PORTATO DAL RINFORZO IN FRC

$$V_{R_{s,r}} = \frac{1}{\gamma_{R_s}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{r,s} \cdot 2 \cdot t_r \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_s}{p_s}$$

dove:

- d = altezza utile della sezione
- f_{fed} = resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo
- tf = (spessore rinforzo risultante = nr. strati x tf)
- θ = inclinazione dei puntoni di cls rispetto all'asse della trave
- β = angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento
- bf = larghezza delle strisce
- pf = passo delle strisce

f_{fed} = resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo

$$f_{r,s} = f_{r,s} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{r,s} \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_s\}} \right]$$

dove:

- f_{fed} = Tensione di delaminazione di estremità
- hw = altezza dell'anima della trave
che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U

Energia Specifica di Frattura

$$\Gamma_{f,r} = \frac{k_s \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{r,s} \cdot f_{r,s}}$$

$$= 0.26 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}$$

Tensione di delaminazione di estremità

$$f_{r,s} = \frac{1}{\gamma_{r,s}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_r \cdot \Gamma_{f,r}}{t_r}}$$

$$= 392 \text{ Mpa}$$

γ_{r,d} = 1,20 ; 1,50

1.20

in funzione della maggiore o minore possibilità di prevedere, per la specifica applicazione, l'effettivo comportamento del composito nei riguardi del distacco dal supporto

deformazione nel rinforzo:

ε_{rdd} = f_{fed} / E_f = 1.8 ‰

Lunghezza ottimale di ancoraggio di progetto

$$l_{r,s} = \min \left\{ \frac{1}{\gamma_{R_s} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_r \cdot t_r \cdot \Gamma_{f,r}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\}$$

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{f,r}}{s_r} \quad \text{Su} = 0.25 \text{ valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto}$$

$$f_{bd} = 2.05 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}$$

γ_{R,d} = 1.25 fattore correttivo

→ lunghezza ottimale di ancoraggio

l_{ed,1} = 144 mm → l_{ed,assunto} = 200 mm

posso ora calcolare la **resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo "f_{fed}"**

$$f_{fed} = f_{res} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{res} \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d; h_w\}} \right]$$

essendo:

$\beta =$

angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento

$d =$ cm

altezza utile sezione

$h_w, \text{ assunto} =$ cm

altezza dell'anima della trave che deve essere interamente impegnata dal rinforzo ad U (può essere anche minore di $H_{trave} - h_{sol, sup}$; ma deve essere maggiore della lunghezza di ancoraggio)

$0.9 \times d =$ mm

$\rightarrow \min(0.9 \times d; h_w) =$ mm

$f_{fed} =$ Mpa

resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo

\rightarrow **contributo del rinforzo alla resistenza a taglio**

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b}{p}$$

dove:

$bf =$ mm

larghezza delle strisce

$pf =$ mm

passo delle strisce

$VR_{d,f} =$ kN

contributo del rinforzo alla resistenza a taglio

conseguente alle scelte adottate:

	E _f (N/mm ²)	t _f (mm)	nr. strati	tipo rinforzo
TESSUTO	215385	0.500	1	DISCONTINUO

pertanto essendo:

contributo del rinforzo alla resistenza a taglio del FRP

$VR_{d,f} =$ kN

Con il calcolo effettuato secondo le CNR DT200 si ottiene:
 $VR_{d,f} = 2960$ kg (contributo alla resistenza a taglio delle fasce in FRP)

che sommato al contributo alla resistenza al taglio delle staffe $\varnothing 6/30$ presenti

$V_{rsd} = 2416 \text{ kg}$ (contributo alla resistenza al taglio delle staffe $\varnothing 6/30$)

fornisce:

$V_R = 2960 + 2416 = 5376 \text{ kg}$ (massimo taglio resistente "staffe in acciaio" + "staffe in FRP")

Lato calcestruzzo come ricavato in precedenza (calcolo di pag.80) si è ottenuto:

$V_{rcd} = 5786 \text{ kg}$

Nelle prove condotte in laboratorio la rottura per taglio si è avuta per valori del carico applicato pari a $P=5600$ ($2 \cdot P = 11200$ kg) che comportano un valore del taglio massimo pari a 5600 kg.

Tale valore è in linea con i valori ricavati con le formulazioni delle CNR DT200

$V_{rcd} = 5786 \text{ kg}$ (taglio resistente lato cls);

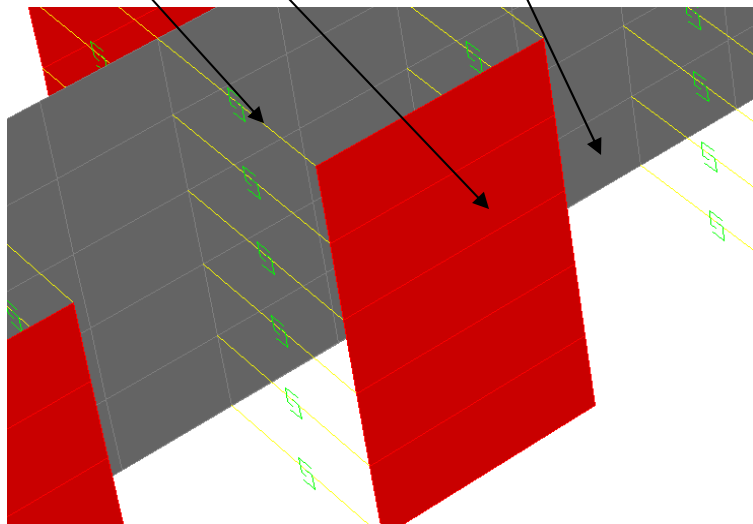
$V_R = 5376 \text{ kg}$ (taglio resistente lato staffe di acciaio + staffe in FRP).

8. Caso di studio nr. 8 - RINFORZO A TAGLIO TRAVE TT3: ricerca del legame di aderenza CLS - FRP

OBIETTIVO: trovare il legame di interfaccia FRP/CLS

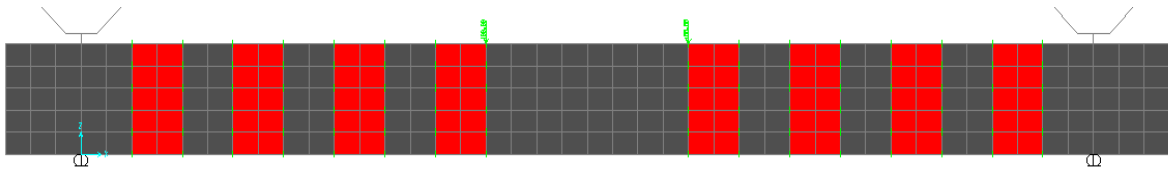
IPOTESI:

- Trave in c.a. modellata con elementi "shell membranali"
- fasce in FRP (fibre) modellate con elementi "shell membranali"
- Adesivo (resina a base acqua) modellato con "molle a taglio non lineari"



PROCEDIMENTO:

- Viene fissata la rigidezza iniziale dell'adesivo che è calcolata come rapporto fra il modulo elastico dell'adesivo e il suo spessore.
- Viene fissato il contributo di resistenza sezionale al taglio fornito dalle fasce ad "U" in FRP, (calcolato secondo le CNR DT 200). Tale valore viene ripartito sulle molle in ogni sezione in cui sono presenti le fasce.
- Si incrementa il carico applicato alla trave (carico P ovvero $2 \cdot P$) fino a raggiungere il valore del carico ultimo ricavato sperimentalmente in laboratorio.

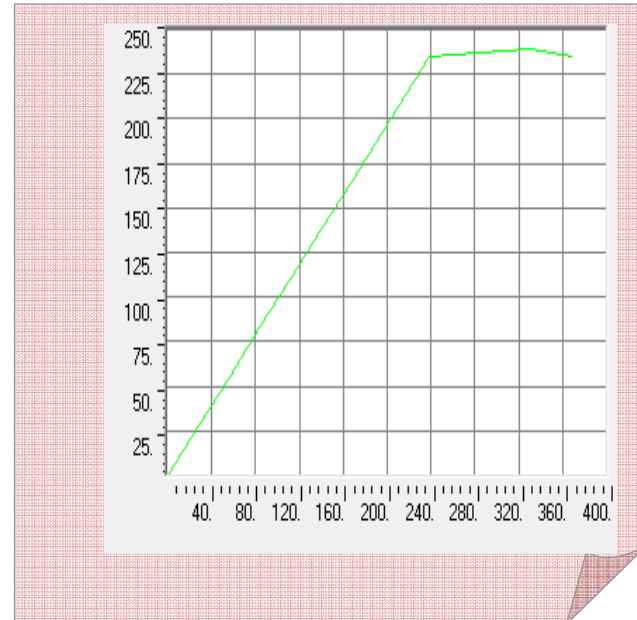


Modellazione rinforzo f.e.m. con
"shell di tipo membranali" (vista 2d)

RISULTATI:

- Si ricava il diagramma forza - scorrimento delle molle non lineari che simula il legame di aderenza fra il calcestruzzo e il rinforzo a taglio con fasce in FRP.

Diagramma forza tagliante (kg)(ordinata)
- scorrimento ($\text{cm} \cdot 10^{-5}$)(ascissa)



Il **diagramma forza - scorrimento** descrive l'andamento della forza tagliante della molla in funzione dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP.

La forza di aderenza è rappresentata nel modello numerico dalla forza esplicata dalla molla: la forza di aderenza massima che si legge nel diagramma in corrispondenza del punto di flesso della curva, va divisa per l'area di influenza delle molle. Pertanto si può ricavare la tensione tangenziale massima.

- Si confronta il legame τ -slip trovato con il legame forza - scorrimento teorico delle CNR DT 200 (con il modello numerico si ottiene un valore di tensione tangenziale massima (31 Kg/cm²) superiore rispetto a quella teorica calcolata con le CNR(27,8), con un aumento di ~ 9%).

- Essendo:

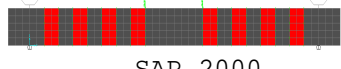
P_{numerico} = valore del carico ultimo numerico (SAP 2000) = 5525 kg

P_{CNR} = valore del carico ultimo analitico (CNR DT 200) = 5200 kg

$P_{\text{sperimentale}}$ = valore del carico ultimo sperimentale (prove di laboratorio) = 5600 kg

Si confronta il valore del carico ultimo ricavato per via numerica (P_{numerico}) con il valore del carico ultimo teorico P_{CNR} : nel modello numerico il valore del carico applicato P_{NUMERICO} che porta alla delaminazione è maggiore rispetto al calcolo teorico (CNR): $P_{\text{numerico}} / P_{\text{CNR}} = 5525 / 5200 \sim 6\%$ in più.

SVILUPPO DETTAGLIATO ANALISI NUMERICA:

MODELLO NUMERICO CON ELEMENTI "SHELL MEMBRANALI E MOLLE A TAGLIO NON LINEARI"				
Obiettivo del caso di studio nr.8: ricavare il diagramma forza-scorrimento con rinforzo a TAGLIO TRAVE TT3				
Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Taglio di rottura reale (Carico di Rottura Reale "2P") (kg)	Taglio resistente Analisi numerica (kg) 1) lato CLS 2) lato B450C + FRP
Elementi "shell" (lastre) membranali (sono elementi che lavorano solo per azioni nel loro piano)+ molle a taglio non lineari che simulano l'adesivo costituito da resina a base acqua	 <p>SAP 2000</p>	Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi shell membranali Adesivo = molle a taglio non lineariFRP = elementi shell membranali (caso di studio 8)	5600 2P=11200 (TT3- TAGLIO- CON FIBRA DI CARBONIO+ RESINE A BASE ACQUA IPN	-

Legame di aderenza	
τ_{max} (kg/cm ²)	Scorrimento (corrisp.) (mm)
31	0,026

N.B. Il **diagramma "τ" - "s"** (tensione tangenziale - scorrimento) è necessario per studiare la delaminazione del composito rispetto al rinforzo. Si utilizza per tale scopo un modello bilineare del legame di interfaccia definito sulla base delle formulazioni delle CNR.

Nel ramo crescente di tale diagramma le tensioni tangenziali (che si sviluppano tra supporto e composito) crescono in maniera direttamente proporzionale allo scorrimento tra i 2 materiali. Giunti al valore di "τ_{max}" si assiste alla delaminazione del composito: nel ramo decrescente del diagramma le tensioni tangenziali calano mentre lo scorrimento continua a crescere.

Nel **caso di studio** denominato **8** viene indagato il **legame di aderenza**, nell'ambito del **rinforzo a taglio**, che si sviluppa all'interfaccia rinforzo in FRP a taglio (realizzato con fasce ad "U") e supporto in calcestruzzo.

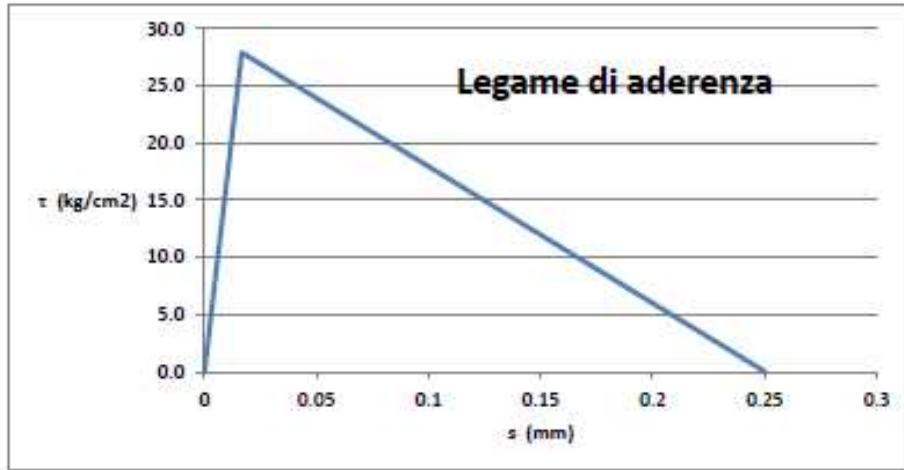
In particolare vengono svolte, per la trave rinforzata a taglio con fasce ad "U" in FRP e resina a base acqua, simulazioni numeriche di confronto con la prova di laboratorio.

La trave in c.a. e le fasce di tessuto in FRP vengono modellate con elementi **"shell di tipo "membranali"** (vedi figura precedente).

La legge di aderenza fra la trave in c.a. e il rinforzo in F.R.P. è simulata tramite l'ausilio di opportune molle **"molle a taglio non lineari"** (vedi figura precedente).

Il diagramma "τ" - "slip" è già stato ricavato analiticamente, secondo le DT 200 , nel caso di studio 5.

Si riporta nuovamente, per maggior chiarezza, detto diagramma che servirà, come nel caso flessionale, da termine di paragone con i risultati numerici forniti dal SAP 2000.



La modellazione consente di studiare le modalità di propagazione della massima tensione tangenziale all'interfaccia calcestruzzo - fasce di adesivo/tessuto.

La rigidezza dell'adesivo è calcolata come rapporto fra il modulo elastico dell'adesivo e lo spessore dell'adesivo.

$$E_{\text{adesivo}} = 100 \text{ MPa } (\sim 1000 \text{ kg/cm}^2) \quad (\text{modulo elastico adesivo})$$

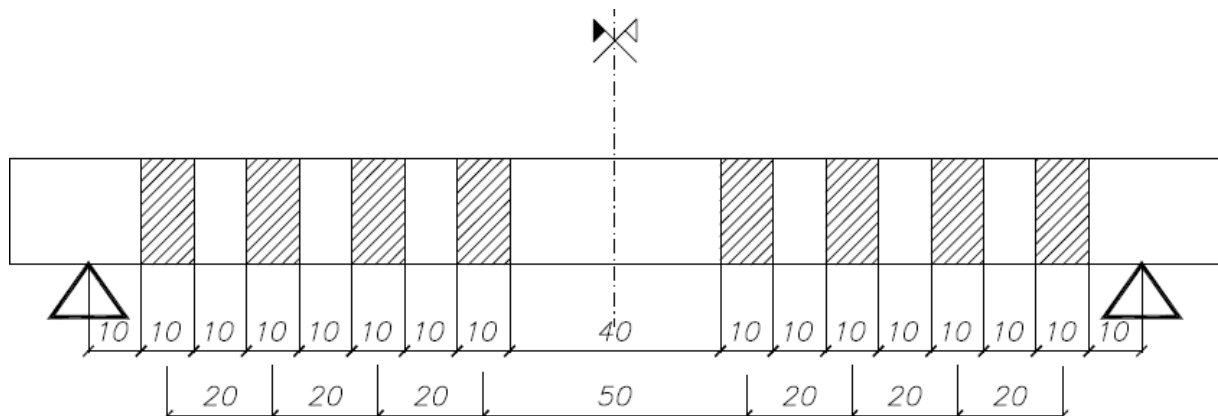
$$t_{\text{adesivo}} = 2 \text{ mm } (0,2 \text{ cm}) \quad (\text{spessore dell'adesivo})$$

$$\rightarrow \text{rigidezza dell'adesivo} = 1000/0,2 = 5000 \text{ kg/cm}$$

Si riportano nel seguito lo schema statico, la geometria del modello di calcolo realizzato e, in forma sintetica, i risultati della analisi non lineare.

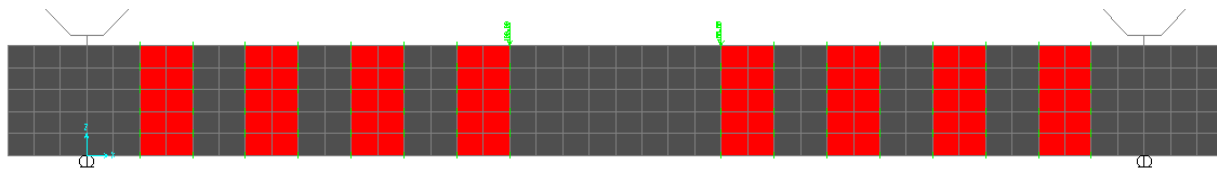
La trave è armata con 2Ø16 sup e 3Ø16 inf. (per cercare di scongiurare la rottura per flessione).

L'armatura a taglio è costituita da **strisce di tessuto larghe 10 cm a passo 20 cm (10 cm) tra di loro** oltre all'armatura di base pari a staffe 1Ø6/30 cm.

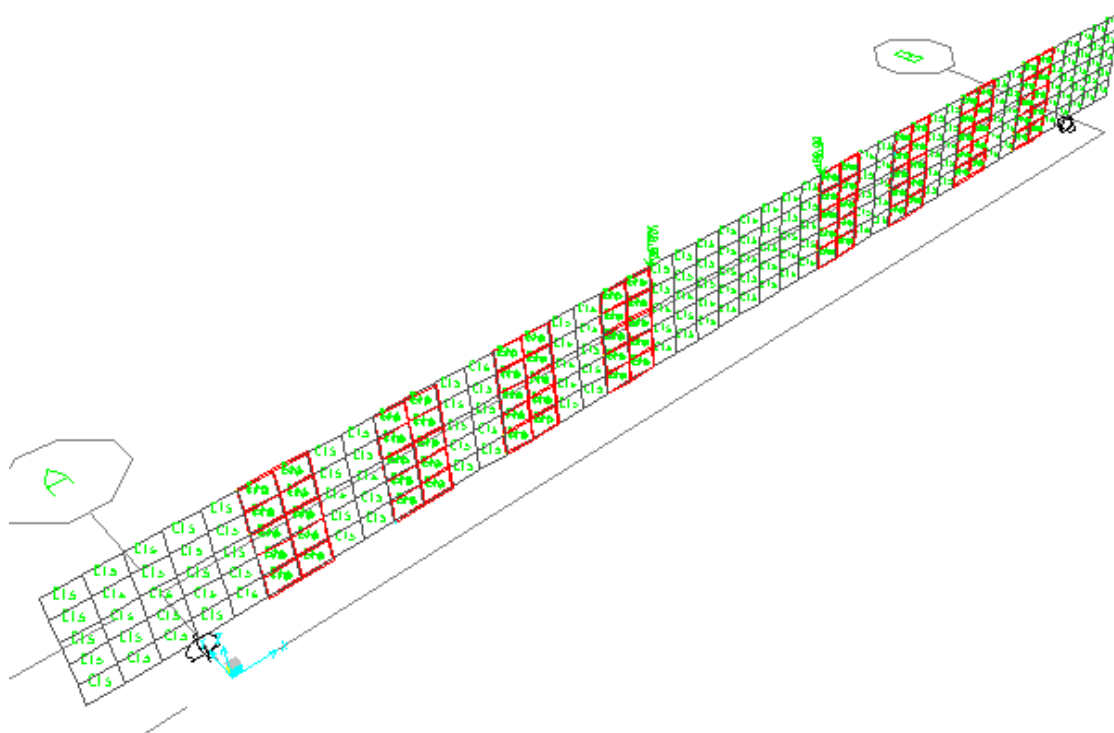


schema "staffe" in FRP passo 20 cm

Si parte dai dati di laboratorio della trave TT3 e cioè dal carico ultimo 2P, cioè dal Tu.

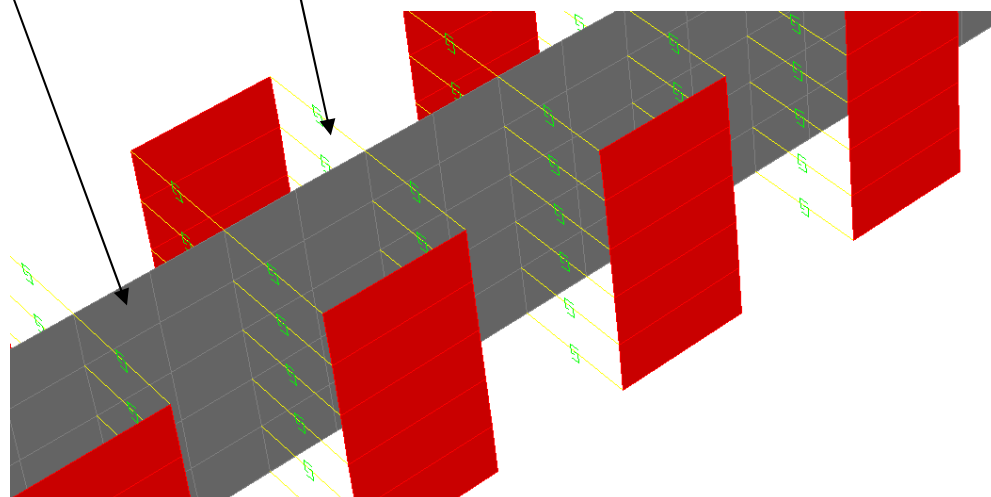


modello f.e.m. con "shell di tipo membranali" (vista 2d)



modello f.e.m. con "shell di tipo membranali" (vista 3d)

molla a taglio nei nodi degli "shell"(resine)
"shell membranale" che simula il cls



dettaglio degli elementi "shell" e "molle a taglio non lineari"

In colore rosso vengono rappresentate le fasce ad "U" in FRP larghe 10 cm con passo 20 cm (10 cm) tra di loro.

Ogni fascia ad "U" in FRP è articolata in 10 "shell" membranali larghi 5 cm ed alti 4 cm disposti su entrambe le facce della trave.

Il collegamento fra le "shell membranali" in calcestruzzo e le "shell membranali" che simulano le fasce ad "U" in FRP è rappresentato da "molle a taglio non lineari".

Le molle a taglio non lineari vengono, come per il caso di rinforzo a flessione, tarate sulle base delle evidenze sperimentali.

Si riportano i risultati delle prove sperimentali per la trave rinforzata con fasce in FRP e resina a base acqua.

La trave in questione è denominata trave tipo "TT3".

La rottura "reale" della trave che si è riscontrata durante le suddette prove si è manifestata a seguito dell'applicazione di un carico pari a 5600 kg (= "P").

Il carico totale applicato sulla trave è dunque stato pari a " 2·P" (= 11200 kg).

Il tipo di rottura che si è riscontrato è stato di tipo tagliente, con formazione di lesioni in prossimità dell'appoggio.

Nel caso di studio 7, e precisamente nella appendice, si è condotto il calcolo del rinforzo a taglio secondo le CNR DT 200.

Si riportano nuovamente i principali risultati:

Con il calcolo effettuato secondo le CNR DT200 si ottiene:

$V_{Rd,f} = 2960 \text{ kg}$ (contributo alla resistenza a taglio delle fasce in FRP)

che sommato al contributo alla resistenza al taglio delle staffe $\emptyset 6/30$ presenti

$V_{rsd} = 2416 \text{ kg}$ (contributo alla resistenza al taglio delle staffe $\emptyset 6/30$)

fornisce:

$V_R = 2960 + 2416 = 5376 \text{ kg}$ (massimo taglio resistente "staffe in acciaio" + "staffe in FRP")

Pertanto il contributo di resistenza al taglio fornito dalle fasce ad "U" in FRP è pari a 2960 kg.

Nel presente caso di studio vengono quindi implementate opportune molle a taglio non lineari definite in base al valore di taglio ultimo fornito dalla fasce pari a 2960 kg.

Assegnando le molle a taglio sugli elementi membranali in FRP il programma in automatico crea delle molle in corrispondenza dei nodi degli elementi stessi.

Essendo il nr. di molle per ogni sezione di trave in cui vi è una fascia di FRP pari a 12 (6+6 sui 2 lati della trave per ogni fila di nodi degli elementi in FRP - vedi figura riportata in precedenza)

ed essendo il taglio pari a 2960 kg si ha:

$2960 \text{ kg} / 12 \text{ molle} \sim 246 \text{ kg}$ (taglio su ogni molla)

L'area di influenza di ogni molla è pari a:

$$t_c \cdot h = 2 \text{ cm} \cdot 4 \text{ cm} = 8 \text{ cm}^2$$

essendo:

t_c = spessore di calcestruzzo che partecipa alla deformabilità di interfaccia

b = influenza della molla= 20 cm

Si riportano in output delle analisi svolte, i seguenti diagrammi:

- diagramma scorrimento delle molle a taglio non lineari in funzione degli step di carico incrementali

- diagramma della forza esplicata dalle molle a taglio non lineari in funzione degli step di carico incrementali

- diagramma forza - scorrimento delle molle a taglio

Tali diagrammi sono il risultato delle analisi svolte con il modello agli elementi finiti (SAP 2000):

si ricava per via numerica il DIAGRAMMA FORZA DI TAGLIO - SCORRIMENTO fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP.

Il primo diagramma descrive l'aumento dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP all'aumentare del carico applicato alla trave (dallo step 1 allo step 11).

In ascissa sono riportati gli step successivi di carico (dallo step 1 allo step 11).

In ordinata è descritto lo scorrimento (in cm): si può notare che lo scorrimento massimo, in corrispondenza del quale si ha un cambiamento di rigidità del diagramma (dove è presente il ginocchio), è pari a 0,0026 cm = 0,026 mm.

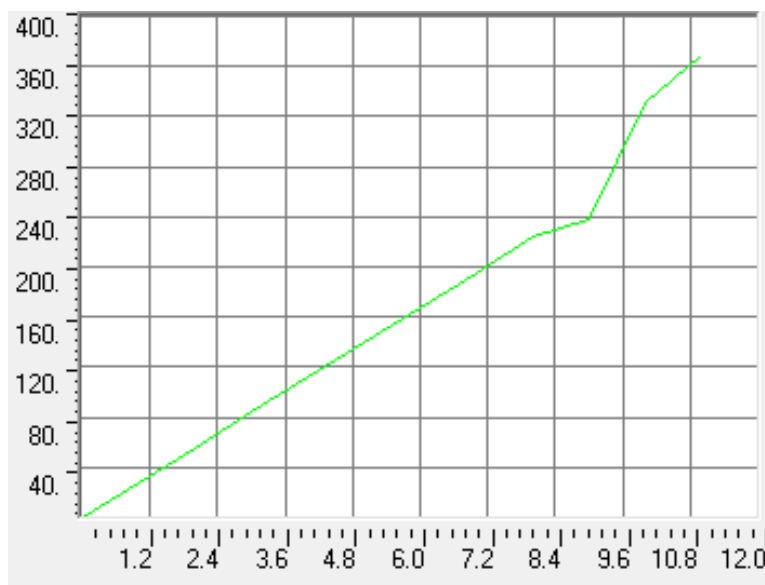


diagramma - scorrimento ($\text{cm} \cdot 10^{-5}$) in funzione degli step di carico incrementali

Il secondo diagramma descrive l'andamento della forza di taglio fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP all'aumentare del carico applicato alla trave (dallo step 1 allo step 11).

In ascissa sono riportati gli step successivi di carico.

In ordinata è riportata la della forza di aderenza che è rappresentata nel modello numerico dalla forza esplicata dalla molla: la forza di aderenza massima si legge nel diagramma in corrispondenza del punto di flesso della curva, e risulta pari a 246 kg. Si ricorda che l'area di influenza di ogni molla è pari a 8 cm² pertanto **si può così ricavare la tensione tangenziale massima che risulta pari a: $\tau_{\text{max}} = 246 / 8 = 31 \text{ kg/cm}^2$.**

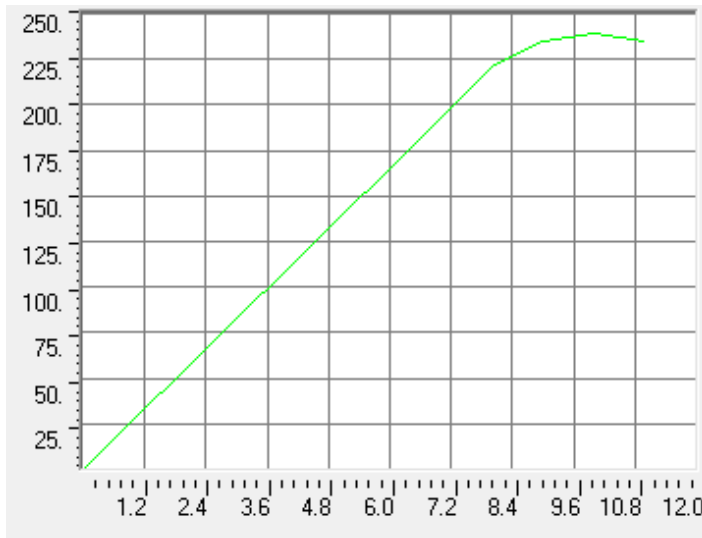
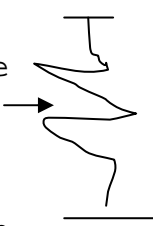


diagramma della forza esplicata (kg) dalla molla in funzione degli step di carico incrementali



Il terzo e ultimo diagramma dei risultati numerici trovati non è altro che l'unione dei 2 diagrammi sopra descritti: è il diagramma tensione tangenziale τ -s.

Si descrive infatti l'andamento della tensione di aderenza in funzione dello scorrimento fra supporto in calcestruzzo e rinforzo in FRP.

In ordinata è riportata la forza di aderenza e in ascissa lo scorrimento.

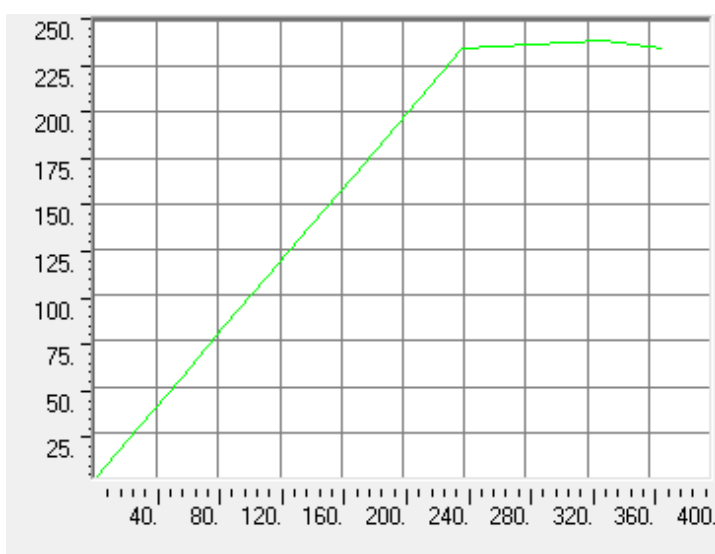
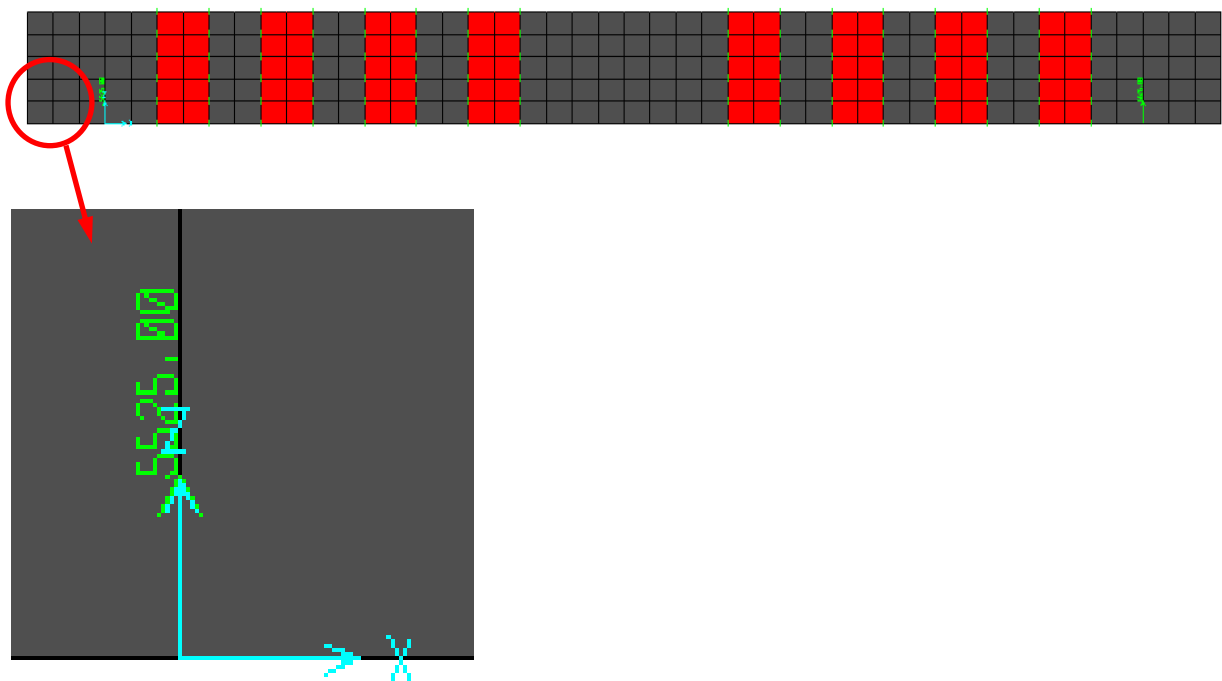


diagramma forza (kg) - scorrimento (cm · 10⁻⁵)

Valutiamo ora qual'è il valore del carico ultimo (carico P) che provoca la rottura a taglio della trave in esame, ricavato dall'analisi numerica.

La reazione all'appoggio nello step di carico "ultimo" che provoca la rottura a taglio della trave in esame e per il quale si ottiene anche il valore massimo di tensione tangenziale " τ_{max} " è pari a:

$$R1 = R2 = \underline{P} = 5525 \text{ kg} \quad (2P = 11050 \text{ kg})$$



Si ricorda che la rottura "reale", per la trave denominata tipo "TT3", che si è riscontrata durante le suddette prove, si è manifestata a seguito dell'applicazione di un carico pari a 5600 kg (= "P").

Il carico totale applicato sulla trave è dunque stato pari a $2 \cdot P$ (= 11200 kg).

CONFRONTO: $P_{\text{NUMERICO}} < P_{\text{SPERIMENTALE}}$

La differenza tra il risultato numerico e quello sperimentale è pari a circa l' 1% (= 11200/11050) in meno.

Questo risultato era prevedibile in quanto si è tarato il modello numerico su quello sperimentale. Valutiamo ora invece la

differenza tra il risultato numerico (~ risultato sperimentale) con quello teorico (CNR).

Determiniamo quindi per quale valore del carico ultimo (carico P) si raggiunge il valore massimo di tensione tangenziale " τ_{max} " ricavata con la formulazione delle CNR DT 200.

Si ricorda che con la formulazione delle CNR DT 200 si era ottenuto un valore di τ_{max} pari a 27,9 kg/cm² (con la simulazione numerica, tarata sulla base del carico applicato $P_{sperimentale}$ si è ottenuto $\tau_{max} = 31$ kg/cm²).

Il valore del carico "P" per il quale viene raggiunto tale valore di tensione tangenziale massima vale:



$$P_{CNR} = 5200 \text{ kg} \quad (2P = 10400 \text{ kg})$$

Tale valore, come era facilmente intuibile, è inferiore (circa il 6%) rispetto al carico ricavato per via numerica e per il quale si è ricavato il diagramma " τ - s (numerico) si ha:

$$P_{numerico} = 5525 \text{ kg}$$

$$P_{CNR} / P_{numerico} = 5200 / 5525 \sim 6\% \text{ in meno} \quad \text{CONFRONTO:}$$

$$P_{CNR} < P_{numerico}$$

La modellazione numerica (f.e.m.), sviluppata introducendo un legame di aderenza non lineare come rigidità tangenziale delle molle che simulano l'adesivo, ha fornito risultati interessanti.

In particolare per il tratto elastico lineare del legame i risultati confermano che il legame di aderenza FRP - calcestruzzo è ben definito dalle formulazioni esistenti (CNR DT 200 e FIB).

Per il caso esaminato (rinforzo a taglio in FRP con resina a base acqua) si ottengono valori di tensioni tangenziali massime superiori a quelle stimate per via analitica (31 Kg/cm²>28).

9. Conclusioni

L'obiettivo delle analisi numeriche svolte, oltre a determinare i carichi ultimi, è stato quello di **indagare le tensioni che si sviluppano all'interfaccia fra rinforzo in FRP e il supporto in CLS costituito da una trave in C.A.**

Sono stati condotti sia **studi a flessione** che a **taglio** su una trave rinforzata con FRP con resina a base acqua del tipo IPN con l'obiettivo di studiare diversi casi di studio, cercando, quando possibile, di tarare i risultati numerici su quelli di laboratorio.

Si possono brevemente illustrare i risultati più importanti che si sono ricavati tramite le suddette analisi.

Tutti i modelli "flessionali"trattati, (modelli con elementi "beam", modelli con elementi piastra "shell" a strati, modelli a biella o a "shell membranali", modelli con elementi "beam" e molle a taglio non lineari) forniscono sostanzialmente gli stessi valori di carico ultimo e momento ultimo forniti dalle prove di laboratorio.

I modelli con **elementi "beam" e molle a taglio non lineari** (molle che simulano l'adesivo) permettono di ricavare la legge di aderenza fra la trave in c.a. e il rinforzo in FRP. (diagramma "τ" - "slip"); tale diagramma ha fornito risultati interessanti.

In particolare per il tratto elastico lineare del legame i risultati confermano che il legame di aderenza FRP-calcestruzzo è ben definito dalle formulazioni correnti (CNR DT 200 e FIB).

Per entrambi i casi esaminati (**rinforzo a flessione in FRP con resina a base acqua e rinforzo in FRP con resina epossidica**) si ottengono valori di tensioni tangenziali massime superiori a quelle stimate per via analitica (circa il 25% in più).

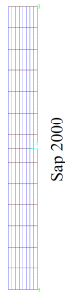
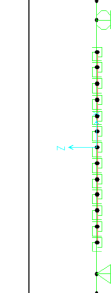
Nell'ambito del "**rinforzo a taglio**" il caso di studio (n. 8) che ha fornito i risultati più significativi è il modello con elementi "**shell di tipo membranali**" che lavorano solo nel piano dell'interfaccia.

La legge di aderenza fra la trave in c.a. e il rinforzo in FRP. è simulato tramite l'ausilio di opportune molle "**molle non lineari a taglio**".

Anche per il rinforzo a taglio, analogamente al rinforzo a flessione, si ottengono risultati in termini di **diagramma "τ" - "slip"** in linea con le formulazioni esistenti (CNR DT 200 e FIB). In particolare per quanto riguarda la tensione tangenziale massima si ottengono valori pari a circa il 10% in più di quanto stimato per via analitica.

Nel seguito sono riportate 2 significative tabelle che descrivono sinteticamente i modelli numerici e le principali risultanze delle analisi svolte.

TABELLA DELLE ANALISI NUMERICHE CONDOTTE SU TRAVI IN CEMENTO ARMATO RINFORZATE E NON RINFORZATE CON MATERIALI COMPOSITI
FLESSIONE

Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Carico di Rottura Analisi numerica 2P (kg)	Carico di Rottura Reale 2P (kg)	Momento di Rottura Analisi numerica (kg m)	Tensione di delaminazione (kg/cm ²)	Legame di aderenza tmax (kg/cm ²)	Scorrimento (corrisp.) (mm)
Calcolo analitico	excel	Calcolo del diagramma momento curvatura (FORMULE DEL FIB)	-	-	756	-	-	-
Elementi beam senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare (caso di studio 1)	2246	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	842	-	-	-
Elementi shell (piastre) a strati verticali di materiale senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. (caso di studio 3)	2532	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	950	-	-	-
Elementi biella Senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. (caso di studio 6.1)	2266	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	850	-	-	-
Elementi shell membranali Senza rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. (caso di studio 6.2)	2276	2200 (TFO - flessione trave non rinforzata)	853	-	-	-
Elementi beam con rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare FRP con modellato come tondino di area equivalente (caso di studio 2)	8120	7400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	3045	-	-	-
Elementi shell (piastre) a strati verticali di materiale con rinforzo a flessione		Analisi statica non lineare. FRP modellato come singolo strato della piastra. (caso di studio 4)	7540	7400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	2827	7640	-	-
CNR (DT 200 del 2012)	excel	Calcolo del diagramma "r-scorrimento"	-	-	-	6740	27,9	0,025
Elementi beam + molle a taglio non lineari che simulano l'adesivo costituito da resina a base acqua		Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi beam Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi beam (caso di studio 5)	7280	7400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))	2730	7500	37	0,030
Elementi beam + molle a taglio non lineari che simulano l'Adesivo costituito da resina epossidica		Analisi statica non lineare. Calcestruzzo= elementi beam Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi beam (caso di studio 5)	8466	8400 (TF1 - FLESSIONE- RINFORZATA CON FIBRE DI CARBONIO+RESINE EPOSSIDICHE)	3175	7500	39	0,033

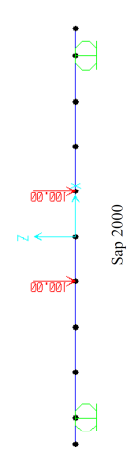
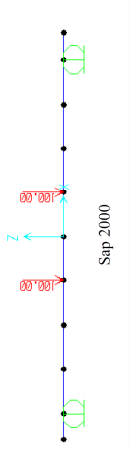
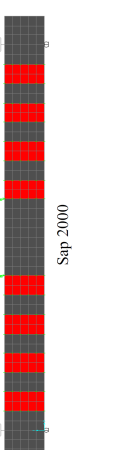
↑

Obiettivo delle analisi numeriche:
 Perla trave in c.a. con e senza rinforzo
FLESSIONE
 ricavare il carico e momento di rottura

→

Obiettivo delle analisi numeriche:
 (resina a base acqua e resina epossidica
FLESSIONE
 ricavare il diagramma forza-scorrimento

**TABELLA DELLE ANALISI NUMERICHE CONDOTTE SU TRAVI IN CEMENTO ARMATO
RINFORZATE E NON RINFORZATE CON MATERIALI COMPOSITI**
TAGLIO

	Modello di calcolo	Programma di calcolo	Descrizione analisi	Taglio di rottura reale (Carico di Rottura Reale "ZP") (kg)	Taglio resistente Analisi numerica (kg)	Legame di aderenza τ_{max} (kg/cm ²)	Scorrimento (corrisp.) (mm)
<p style="text-align: center;">TAGLIO</p> <p style="text-align: center;">Perla trave in c.a. con e senza rinforzo</p> <p style="text-align: center;">ricavare il taglio resistente</p> <p>← Obiettivo delle analisi numeriche: ↓</p>	Elementi beam con cerniere plastiche localizzate a taglio senza rinforzo a taglio	 <p style="text-align: center;">Sap 2000</p>	<p>Analisi statica non lineare.</p> <p>Le cerniere plastiche a taglio sono zone plastiche concentrate disposte in SEZIONI alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico (caso di studio 7)</p>	<p>4500 (ZP = 9000)</p> <p>(TT1 - TAGLIO-SENZA RINFORZO)</p>	<p>1) 4500 2) -</p>	-	-
	Elementi beam con cerniere plastiche localizzate a taglio con rinforzo a taglio in fasce ad "U" in FRP	 <p style="text-align: center;">Sap 2000</p>	<p>Analisi statica non lineare.</p> <p>Le cerniere plastiche a taglio sono zone plastiche concentrate disposte in SEZIONI alle estremità della trave per simulare la resistenza a taglio della trave oltre il limite elastico (caso di studio 7)</p>	<p>5600 (ZP = 11200)</p> <p>(TT3 - TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))</p>	<p>1) 5600 2) -</p>	-	-
<p style="text-align: center;">TAGLIO</p> <p style="text-align: center;">(resina a base acqua)</p> <p style="text-align: center;">ricavare il diagramma forza-scorrimento</p> <p>← Obiettivo delle analisi numeriche: ↓</p>	CNR (DT 200 del 2012) Trave rinforzata a taglio con fasce ad "U" in FRP	excel	<p>Calcolo del taglio resistente con fasce ad "U" in frp di rinforzo.</p> <p>Calcolo del diagramma "τ-scorrimento"</p>	<p>5600 (ZP = 11200)</p> <p>(TT3 - TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))</p>	<p>1) 5786 2) 5376</p>	27,9	0,025
	Elementi shell (lastre) membranali (sono elementi che lavorano solo per azioni nel loro piano) + molle a taglio non lineari che simulano l'adesivo costituito da resina a base acqua	 <p style="text-align: center;">Sap 2000</p>	<p>Analisi statica non lineare.</p> <p>Calcestruzzo= elementi shell membranali Adesivo = molle a taglio non lineari FRP = elementi shell membranali (caso di studio 8)</p>	<p>5600 (ZP = 11200)</p> <p>(TT3 - TAGLIO-CON FIBRA DI CARBONIO+RESINE A BASE ACQUA (IPN))</p>	-	31	0,026

LEGGE DI INTERFACCIA FRP - CALCESTRUZZO (Risultati ottenuti dalle prove di laboratorio)

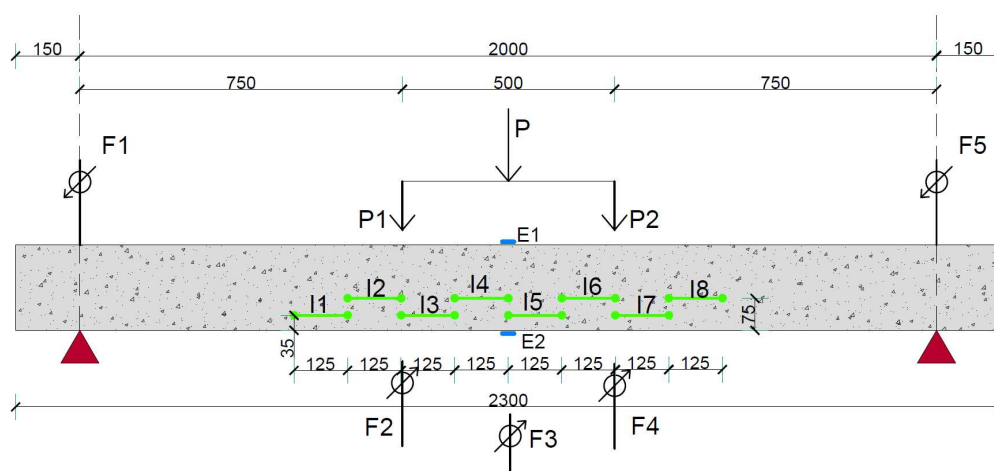
Si propone nel seguito una formulazione numerica che a partire dai risultati delle prove di laboratorio fornisca una prima valutazione del legame di interfaccia FRP calcestruzzo.

Si ricorda che tale legame descrive il problema della delaminazione che si manifesta fra FRP e supporto in calcestruzzo; tale meccanismo di crisi è particolarmente fragile.

La formulazione proposta ha come dati iniziali i valori degli allungamenti misurati dagli induttivi durante le prove di carico.

Si considera la **trave in calcestruzzo rinforzata a flessione con strati di tessuto in FRP denominata "prova TF1"**. Il rinforzo consiste in 4 strati di fibre di carbonio ($A=1\text{cm}^2$) e **resine a base acqua**).

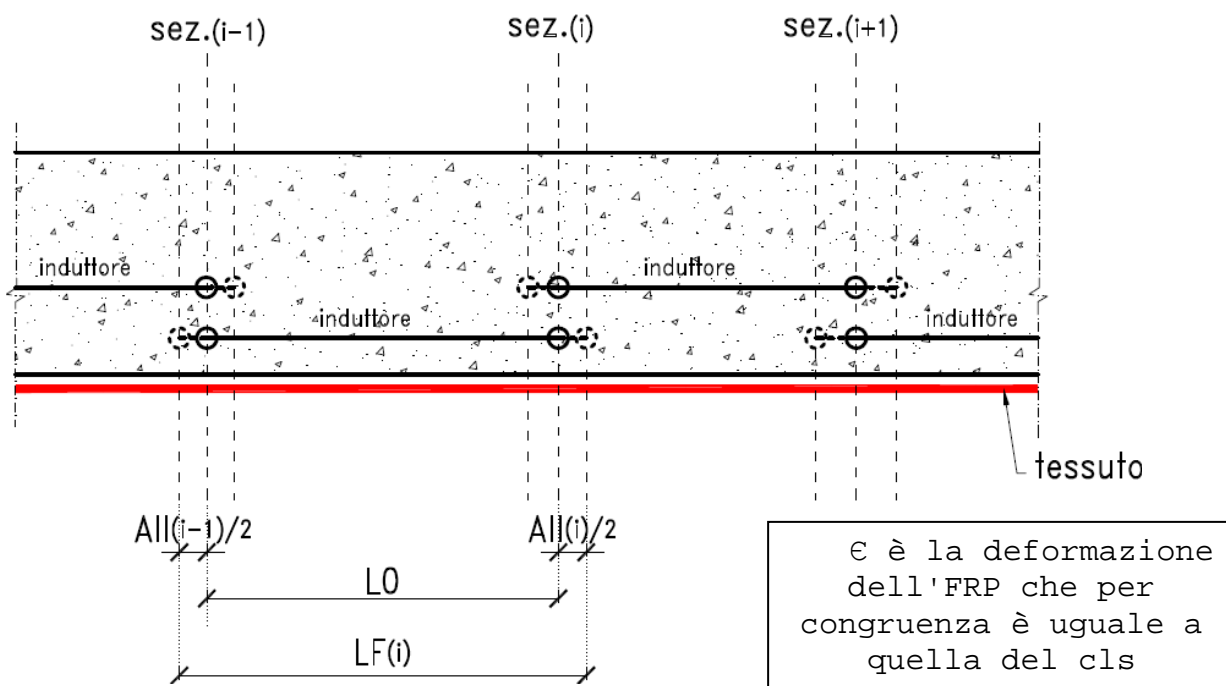
Si riporta lo schema geometrico della trave con evidenziata la posizione degli induttivi.



Si propone, come detto, una formulazione che fornisca, noti i valori di allungamento degli induttori nella sezione i -esima:

- 1) valori delle deformazioni
- 2) valori di scorrimento
- 3) valori di tensione tangenziale

Facendo riferimento alla simbologia presente nel seguente schema grafico si ha:



I valori di deformazione assumono le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= L_{F(i)} - L_{(0)} / L_{(0)} = [(L_{(0)} + All_{(i-1)}/2 + All_{(i)}/2) - L_{(0)}] / L_{(0)} = \\ &= (All_{(i-1)}/2 + All_{(i)}/2) / L_{(0)} = (All_{(i-1)} + All_{(i)}) / (2 \cdot L_{(0)}) \end{aligned}$$

Analogamente si ha:

$$\epsilon_{(i+1)} = (All_{(i)} + All_{(i+1)}) / (2 \cdot L_{(0)})$$

Noti i valori di deformazione si ricavano, per la sezione intermedia fra il punto iniziale e finale dell'induttivo, rispettivamente i valori di scorrimento "slip" e di tensione tangenziale "τ":

$$Slip_{(x)} = (\epsilon_{(i+1)} - \epsilon_{(i)}) \cdot (x_{(i+1)} - x_{(i)}) / 2$$

(x = distanza tra 2 sezioni successive = lunghezza induttore)

$$\tau_{(x)} = E_p \cdot A_p / b_p \cdot (\epsilon_{(i+1)} - \epsilon_{(i)}) / [(x_{(i+1)} - x_{(i)}) / 2]$$

$$\tau_x = \frac{E_p \cdot A_p}{b_p} \cdot \frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{(x_{i+1} - x_i) / 2} \quad \leftarrow$$

Tensioni tangenziali di interfaccia FRP-CLS

(vedasi "Sul problema della delaminazione di placche in FRP utilizzate per il rinforzo di elementi in calcestruzzo"-M. Savoia, B. Ferracuti, C. Mazzotti)

essendo:

$E_p = 215384 \text{ N/mm}^2$ (modulo elastico del rinforzo in FRP)

$A_p = 100 \text{ mm}^2$ (area del rinforzo in FRP)

$b_p = 200 \text{ mm}$ (larghezza del rinforzo in FRP)

$L_0 = 125 \text{ mm}$ (lunghezza induttore)

Dallo schema geometrico riportato nelle precedenti pagine si evince che sulla trave in oggetto sono stati applicati nr. 8 induttivi e quindi sono noti i valori del loro allungamento all'aumentare del carico.

Occorre notare che gli induttivi sono posti ad una certa distanza rispetto all'intradosso della trave: gli induttivi 1-3-5-7 sono posti a 3,5 cm dall'intradosso trave; gli induttivi 2-4-6 sono posti a 7,5 cm dall'intradosso trave.

Consideriamo 2 induttivi posti alla stessa distanza dall'intradosso trave. Di questi induttivi conosciamo il valore dell'allungamento in corrispondenza del punto di applicazione degli stessi induttivi.

Consideriamo ora un terzo induttivo intermedio rispetto ai 2 precedenti.

Anche di questo induttivo conosciamo il valore dell'allungamento in corrispondenza del suo punto di applicazione. Per questo induttivo vogliamo ricavare il valore dell'allungamento nella fibra di intradosso della trave.

Per ottenere ciò si esegue una interpolazione dei valori dell'allungamento lungo l'asse della trave e si considera lineare l'andamento dei valori dei loro allungamenti lungo la direzione verticale della sezione della trave.

Considerando ad esempio un induttivo posto a distanza di 7,5 cm dall'intradosso della trave si ha che il nuovo valore di allungamento vale:

$$\{[(All_{(i-1)} + All_{(i+1)})/2] - All_{(i)}\} / (7,5 - 3,5 \text{ cm}) \cdot 7,5 \text{ cm} + All_{(i)}$$

essendo:

$All_{(i-1)}$ = valore di allungamento dell'induttivo che precede quello considerato

$All_{(i+1)}$ = valore di allungamento dell'induttivo che segue quello considerato

$(7,5 - 3,5) \text{ cm} = \text{cm } 4$ = differenza di quota fra 2 induttivi successivi

$7,5 \text{ cm}$ = distanza dell'induttivo considerato dall' intradosso della trave

$All_{(i)}$ = valore di allungamento dell'induttivo considerato

Analogamente si esegue lo stesso procedimento per gli induttivi posti a $3,5 \text{ cm}$ dall' intradosso della trave.

La procedura sopra descritta consente di ricavare le deformazioni noti gli allungamenti a destra e a sinistra della sezione considerata, pertanto si ricaveranno i valori della deformazione solamente per gli induttivi nr. 2,3,4,5,6,7.

Si riportano, in forma tabellare, i valori degli allungamenti misurati, i valori di allungamento ricavati per interpolazione e i valori di deformazione.

step carico	P1=P2 = P/2 P1 (KN)	3,5 cm da intr					7,5 cm da intr					3,5 cm da intr					7,5 cm da intr										
		ALL (mm)		ALL.interp. (mm)		All.int/All	ALL (mm)		ALL.interp. (mm)		All.int/All	ALL (mm)		ALL.interp. (mm)		All.int/All	ALL (mm)		ALL.interp. (mm)		All.int/All	ALL (mm)		ALL.interp. (mm)		All.int/All	
		Ind 1		Ind 2			Ind 3		Ind 4			Ind 5		Ind 6			Ind 7		Ind 8			Ind 9		Ind 10			
1	5.01	0.0034	0.0020	0.0020	1.00	0.0000	0.0072	0.0077	1.07	0.0000	0.0112	0.0037	0.33	0.0000													
2	10.00	0.0086	0.0474	0.0382	0.81	0.0002	0.0764	0.1049	1.37	0.0006	0.0402	0.1081	2.69	0.0009													
3	15.03	0.0376	0.0988	0.0797	0.81	0.0005	0.1396	0.1847	1.32	0.0011	0.0774	0.1940	2.51	0.0015													
4	20.00	0.0656	0.1416	0.1405	0.99	0.0008	0.2164	0.2997	1.38	0.0018	0.1008	0.3176	3.15	0.0025													
5	25.02	0.0942	0.1894	0.1997	1.05	0.0012	0.2956	0.4152	1.40	0.0025	0.1284	0.4419	3.44	0.0034													
6	30.00	0.1324	0.2452	0.2675	1.09	0.0016	0.3818	0.5370	1.41	0.0032	0.1636	0.5727	3.50	0.0044													
7	35.02	0.2042	0.2834	0.4021	1.42	0.0024	0.4892	0.7002	1.43	0.0044	0.2128	0.7311	3.44	0.0057													
8	37.30	0.2582	0.3018	0.4942	1.64	0.0030	0.5506	0.7987	1.45	0.0052	0.2324	0.8290	3.57	0.0065													

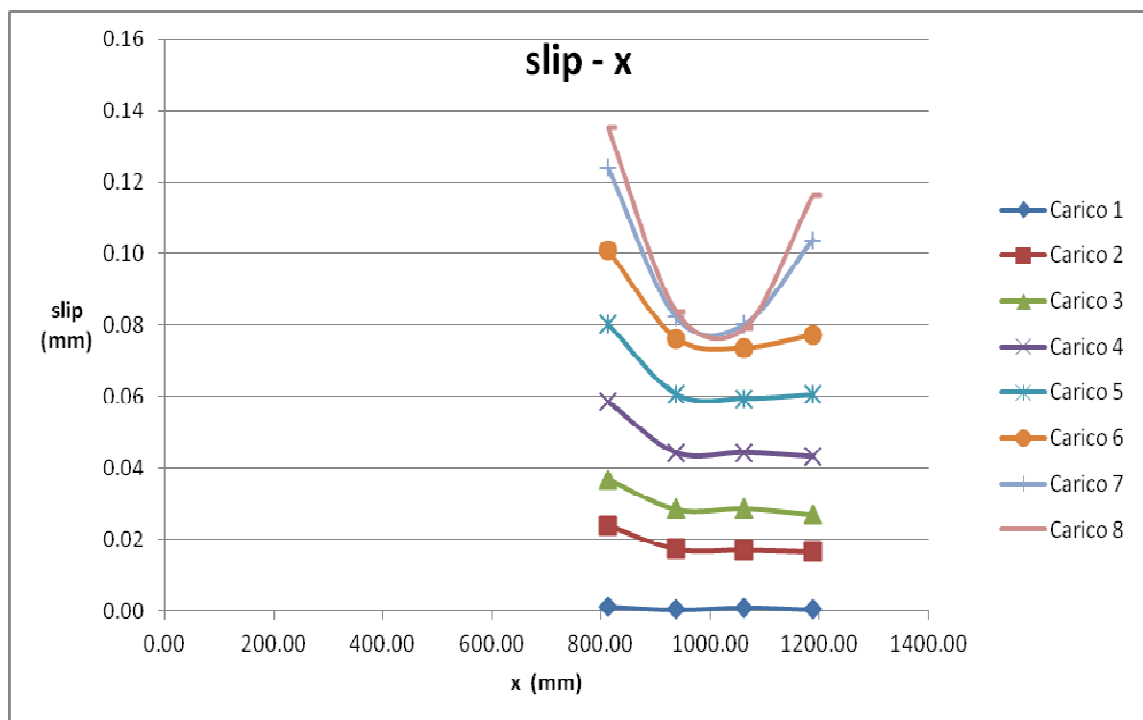
3,5 cm da intr				7,5 cm da intr				3,5 cm da intr				7,5 cm da intr			
ALL (mm)	ALL.interp. (mm)	All.int/All	ε5	ALL (mm)	ALL.interp. (mm)	All.int/All	ε6	ALL (mm)	ALL.interp. (mm)	All.int/All	ε7	ALL (mm)	ALL.interp. (mm)	All.int/All	ε8
Ind 5				Ind 6				Ind 7				Ind 8			
0.0150	0.0115	0.77	0.0001	0.0030	0.0038	1.28	0.0000	0.0050	0.0079	1.58	0.0000	0.0020	0.0020	0.0000	0.0020
0.0660	0.0977	1.48	0.0008	0.0620	0.1068	1.72	0.0005	0.0330	0.0287	0.87	0.0003	0.0400	0.0400	0.0003	0.0400
0.1220	0.1764	1.45	0.0014	0.1110	0.1818	1.64	0.0010	0.0700	0.0611	0.87	0.0005	0.0730	0.0730	0.0005	0.0730
0.1810	0.2822	1.56	0.0023	0.1530	0.2839	1.86	0.0016	0.1050	0.1045	1.00	0.0009	0.1110	0.1110	0.0009	0.1110
0.2490	0.3953	1.59	0.0031	0.1990	0.3870	1.94	0.0022	0.1530	0.1578	1.03	0.0012	0.1450	0.1450	0.0012	0.1450
0.3220	0.5129	1.59	0.0040	0.2480	0.4919	1.98	0.0028	0.2080	0.2184	1.05	0.0016	0.1830	0.1830	0.0016	0.1830
0.4140	0.6559	1.58	0.0052	0.3090	0.6405	2.07	0.0039	0.2790	0.3344	1.20	0.0022	0.2250	0.2250	0.0022	0.2250
0.4630	0.7414	1.60	0.0059	0.3410	0.7308	2.14	0.0046	0.3350	0.4248	1.27	0.0028	0.2660	0.2660	0.0028	0.2660

Analogamente i valori di "slip" e di " τ " sono ricavati a partire dai valori di deformazione a destra e a sinistra della sezione considerata, pertanto si ricaveranno le entità di "slip" e di " τ " solamente per gli induttivi nr. 3,4,5,6.

Si riportano i valori di "slip" e di " τ " per i 4 induttivi sopra citati (ovvero nella sezione intermedia fra il punto iniziale e finale dell'induttivo).

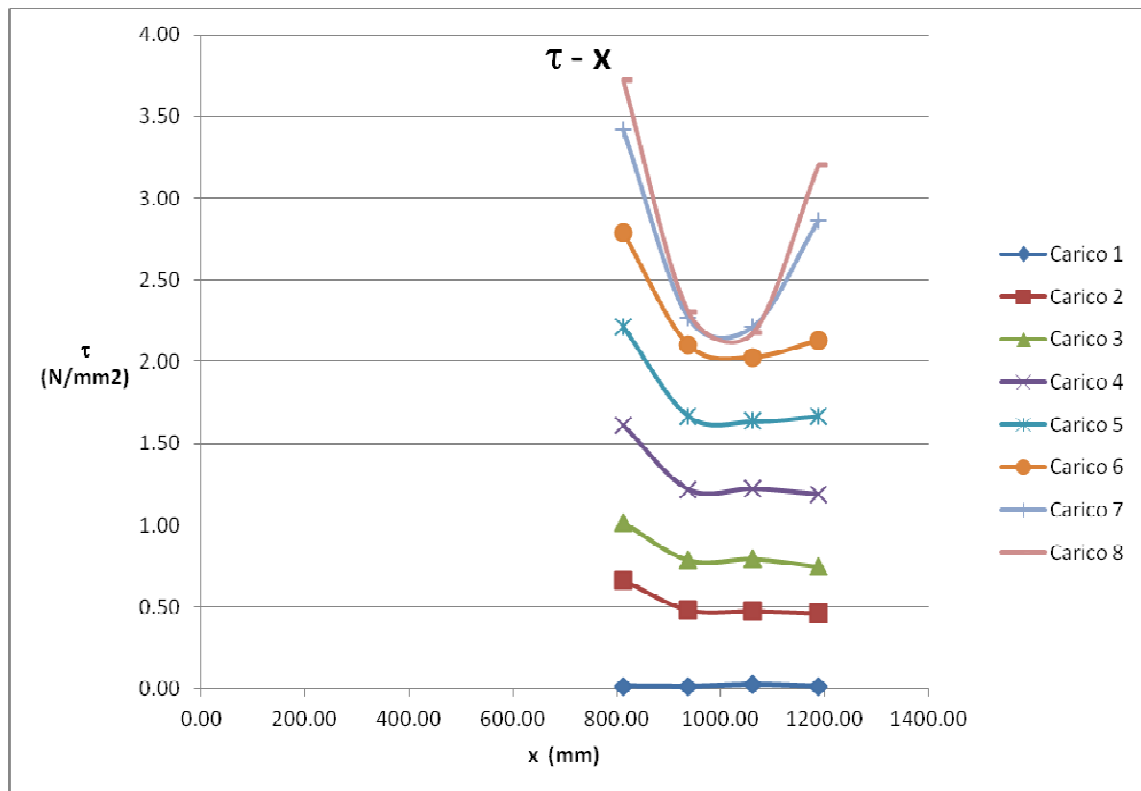
Si è ritenuto significativo riportare tali grandezze per 8 diversi step di carico crescenti successivi da 5 KN a 37,30 KN (carico per il quale si è verificata la delaminazione).

step carico	P1=P2 = P/2 P1 (KN)	slip (mm)		τ (N/mm ²)		slip (mm)		τ (N/mm ²)		slip (mm)		τ (N/mm ²)	
		Ind 3		Ind 4		Ind 5		Ind 6					
1	5.01	0.0011	0.01	0.0004	0.01	0.0009	0.02	0.0005	0.01				
2	10.00	0.0241	0.66	0.0175	0.48	0.0172	0.48	0.0167	0.46				
3	15.03	0.0368	1.01	0.0286	0.79	0.0288	0.80	0.0272	0.75				
4	20.00	0.0585	1.61	0.0443	1.22	0.0444	1.22	0.0432	1.19				
5	25.02	0.0803	2.21	0.0605	1.67	0.0594	1.64	0.0605	1.67				
6	30.00	0.1012	2.79	0.0763	2.10	0.0736	2.03	0.0772	2.13				
7	35.02	0.1240	3.42	0.0822	2.27	0.0804	2.22	0.1039	2.86				
8	37.30	0.1351	3.73	0.0837	2.31	0.0792	2.18	0.1162	3.20				



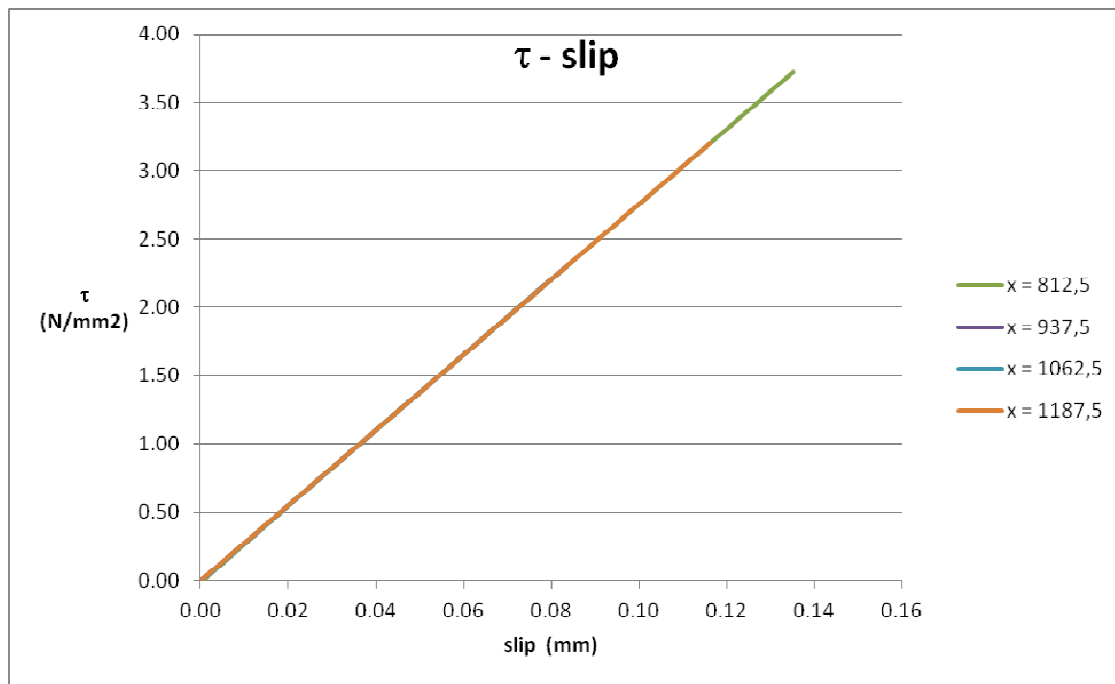
Andamento dello "slip" lungo le 4 sezioni considerate per vari step di carico applicato.

Le deformazioni (slip) crescono andando dalla mezzeria verso gli appoggi perchè la delaminazione è avvenuta per taglio e flessione e il taglio è massimo andando negli appoggi



Andamento delle " τ " lungo le 4 sezioni considerate per vari step di carico applicato.

Si nota, dai grafici, che i massimi valori di " τ " e di slip non sono perfettamente simmetrici rispetto alla mezzeria della trave; questo può essere spiegato con il fatto che la delaminazione non è avvenuta contemporaneamente da entrambi i lati, come in effetti rilevato su alcune travi provate.



Grafici "τ - slip" per le 4 sezioni considerate.

Con questa formulazione si è analizzato il ramo ascendente della curva "τ-slip".

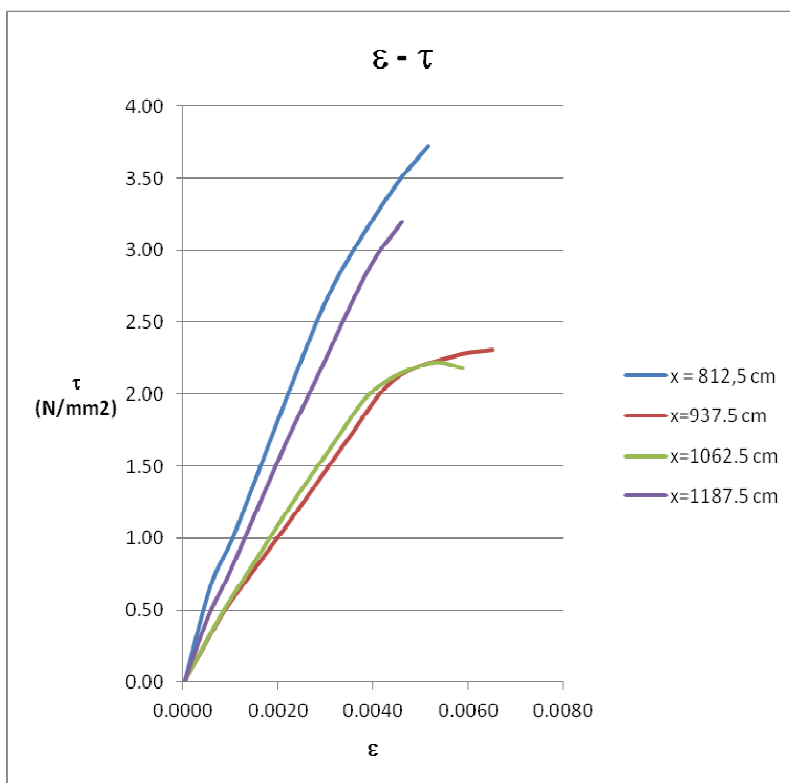
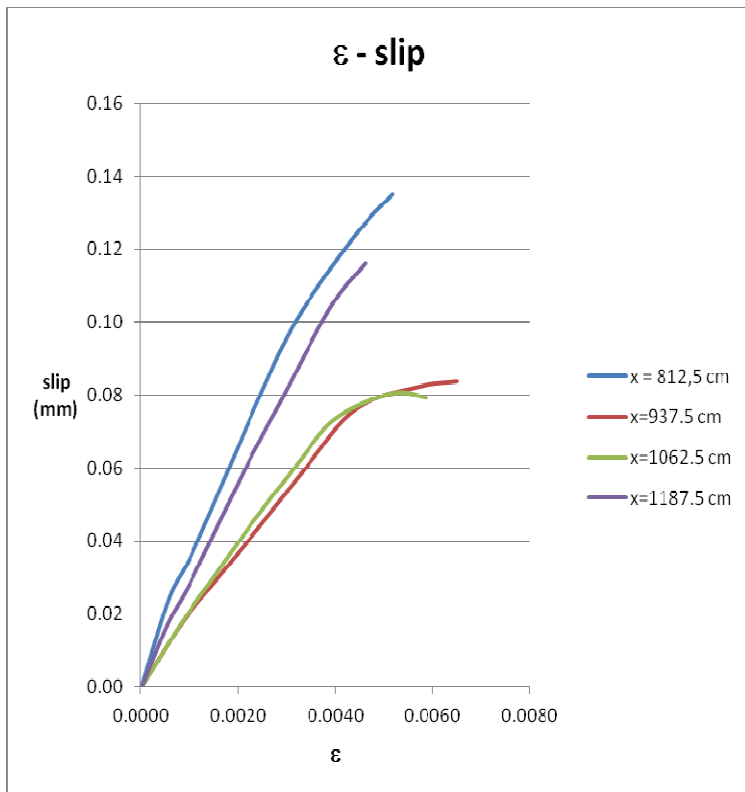
Dal grafico si desumono i seguenti valori massimi di "τ - slip":

$$\tau = 3,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{slip} = 0,13 \text{ mm}$$

Tali valori sono in linea con quanto ricavato per via numerica con le modellazioni agli elementi finiti.

Si riportano anche i grafici **slip-ε** e **τ-ε** per le 4 sezioni considerate.



I grafici evidenziano che in corrispondenza della sezione a 812,5 cm da appoggio sinistro (colore azzurro), si ha il max valore di τ e di slip. Analogamente la sezione a destra della mezzeria (colore viola), simmetrica rispetto alla mezzeria a quella precedentemente descritta, presenta valori molto alti di τ e slip ma, come già detto, leggermente inferiori ai precedenti poiché la delaminazione non avviene in modo simmetrico. Un ulteriore dato fornito dai presenti grafici riguarda il valore massimo di deformazione dell'FRP che risulta pari a circa 0,005.

Si può notare che il valore massimo di deformazione risulta pari a circa $\epsilon=0,005$.

Confronto del valore di calcolo della deformazione ϵ_{max} dell'FRP, rispetto ai valori ottenuti dai grafici precedenti

FORMULAZIONI NUMERICHE

Il collasso della trave rinforzata con FRP è avvenuto per delaminazione concomitante per fessure da taglio e per fessure da flessione.



Analiticamente il fenomeno può essere descritto a partire dalla definizione di tensione massima per delaminazione intermedia come proposto dalle CNR DT 2004.

$$f_{fdd} = \frac{K_{cr}}{1.2 \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{fk}}{t_f}} \quad (\text{tensione di delaminazione intermedia})$$

essendo:

$K_{cr} =$	3	
$t_f =$	0,5 mm	(spessore rinforzo)
$E_f =$	215384 N/mm ²	(modulo elastico)
$\gamma_c =$	1,5	(coeff. Sicurezza calcestruzzo)

$$\Gamma_{fk} = c \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{tk}} \cong 0.03 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (\text{energia specifica di frattura})$$

$$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} = 16,6 \quad \text{N/mm}^2$$

($R_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$)

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 1,95 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\rightarrow \Gamma_{fk} = 0,17 \quad \text{N/mm}^2 \cdot \text{mm} \quad (\text{energia specifica di frattura})$$

$$\rightarrow f_{fdd,2} = 783,0 \quad \text{N/mm}^2 \quad (\text{tensione di delaminazione intermedia})$$

$$\rightarrow sf_{dd,2} = f_{fdd} / E_f = 0,004 \quad (\text{deformazione MASSIMA di delaminazione intermedia})$$

Questo valore di deformazione massima trovato per via analitica è confermato anche dai risultati sperimentali

ϵ

Conclusioni generali:

Le analisi numeriche condotte nei primi 8 casi di studio sono state svolte allo scopo di **validare i risultati ottenuti dalle sperimentazioni condotte, rispetto ai dettami normativi e alle risultanze teoriche stesse.**

In tutti i casi si sono ottenuti risultati teorico/sperimentali in linea fra loro e agevolmente confrontabili e, in genere, con valori cautelativi rispetto ai disposti di normative più o meno cogenti. In particolare si sono riscontrati valori dei carichi ultimi teorici in linea con quelli ricavati dalle prove di laboratorio.

Inoltre si sono voluti sondare, con i casi di studio n. 5 e n. 8, i valori delle tensioni **tangenziali di interfaccia fra FRP e Calcestruzzo**: in generale i valori delle tensioni di delaminazione teorici/sperimentali sono risultati sempre maggiori dei valori delle tensioni di delaminazione, calcolati ai sensi delle CNR-DT200, sia con resine e epossidiche che con resine a base acqua del tipo IPN.

$\tau_{delam.teor.} > \tau_{delam.sperim.} > \tau_{delam.cnr}$

Il successo del confronto fra i risultati sperimentali e quelli numerici porta a concludere che l'utilizzo di resine a base acqua del tipo IPN, quali matrici di compositi FRP, ha il vantaggio della maggiore resistenza al fuoco rispetto al caso di impiego di resine epossidiche. Se si tiene conto poi che, dal punto di vista dei costi, l'impatto delle due tecnologie a confronto è all'incirca alla pari, il loro impiego appare ancora più giustificato.

BIBLIOGRAFIA

- Fib/Ceb n. 14/2001 "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures"
-
- DT 203/2006 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture in calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato"
-
- ACI 440.2R-02 sull'impiego di materiali FRP di rinforzo delle strutture in c.a.
- "Experimentals performance of RC beams strengthened with FRP materials"-F. Ceroni-Construction and Building Materials
- "Cracking behaviour of RC beams externally strengthened with emerging materials"-F.Ceroni,M.Pecce-Construction and Building Materials
- "Flexural Strengthening of RC Beams with Externally Bonded CFRP System"- Renata Kotynia e altri
- "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets and Epoxy Mortar"-Byong Y. Bahn e altri
- Raffaele Poluzzi- Università di Bologna: INARCOS (1) 63-67 Gennaio 2003
- Gianni Bartoli-Università di Firenze, Giornata di presentazione del documento
- CNR DT 200/2004'' "Comportamento a rottura di travi rinforzate in CFRP e ancoraggio "Ardfix" del 16 gennaio 2006
- EUROPEAN PATENT N° EP0994223 B1- Priority :13 .10. 1998 IT
- Scheda Tecnica Betontex: Resine Betontex IPN n° 7Bis

- IT PATENT : N° ITR0001338380- Priority 22.01.2002
- Le Guide Betontex : "I Connettori Ardfix per il rinforzo di Strutture Edili "
- Le Guide Betontex : "Guida ai Prodotti Betontex IPN" edizione settembre 2012
- "Cracking behaviour of RC beams externally strengthened with emerging materials"-F.Ceroni,M.Pecce-Construction and building Materials
- "Flexural Strengthening of RC Beams with Externally Bonded CFRP System"- Renata Kotynia e altri
- "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets and Epoxy Mortar"-Byong Y. Bahn e altri
- "Sul problema della delaminazione di placche in FRP utilizzate per il rinforzo di elementi in calcestruzzo"-M. Savoia, B. Ferracuti, C. Mazzotti)