

Rinforzo di solai in laterocemento con materiali compositi innovativi

Nel presentare i risultati sperimentali ed analitici di interventi di rinforzo di travi e pannelli di solaio laterocementizi con fogli di materiale composito fibroso, si evidenzia un sostanziale incremento di capacità portante e si mostrano i principali meccanismi di rottura che possono manifestarsi con l'impiego di questa metodologia di rinforzo

Introduzione

La necessità di eseguire interventi di rinforzo su elementi di solaio può originarsi per una gran quantità di ragioni: dagli errori di progetto o dalla non rispondenza dei requisiti richiesti, alle esigenze di modificare le destinazioni d'uso o di sostenere particolari carichi non previsti al momento della costruzione.

Un tipico intervento di rinforzo, poco invasivo, è quello di incollare sulla superficie esterna delle strutture interessate lamine di acciaio in zona tesa (*plate bonding*). Tale tecnica è molto versatile, relativamente semplice da realizzare, economica, veloce e richiede un aumento limitato dello spessore dell'elemento rinforzato e quindi salvaguarda le volumetrie degli ambienti. Tuttavia questo procedimento presenta alcuni inconvenienti: i piatti in acciaio sono molto pesanti e quindi difficili da maneggiare in opera, tanto da richiedere la costruzione di impalcature che incidono sia sui costi che sui tempi di lavoro; il materiale impiegato deve, inoltre, essere adeguatamente e costantemente protetto contro gli effetti della corrosione.

La recentissima disponibilità di prodotti fibrocompositi (conosciuti a livello internazionale con la sigla FRP o Fiber Reinforced Polymer) consente di superare tutti i predetti problemi in quanto il materiale risulta molto leggero, pur essendo molto più resistente a trazione dell'acciaio, ed, inoltre, non si corrode nel tempo.

Nel seguito vengono mostrati i risultati ottenuti da una campagna di esperienze condotte presso il Laboratorio Resistenza dei Materiali (LaRM) dell'Università degli Studi di Bologna operando test di flessione sia su singoli travetti laterocementizi che su pannelli di solaio rinforzati in zona tesa con fogli in fibra di carbonio e in fibra di vetro.

Modellazioni numeriche e considerazioni pratiche di seguito riportate consentono di stabilire le linee guida per un'adeguata progettazione.

I materiali compositi fibrosi

I materiali fibrocompositi sono costituiti da fibre continue parallele ed unidirezionali, per lo più di vetro, carbonio o aramide, immerse in una matrice prevalentemente di resine polimeriche.

Le matrici hanno principalmente il compito di legare tra loro le fibre, di proteggerle dai danneggiamenti accidentali e dall'aggressione chimica, di trasferire agli elementi di rinforzo gli sforzi sollecitanti e di renderle impegnate staticamente in modo uniforme.

Le fibre incidono sulle proprietà meccaniche in base al diametro, alla lunghezza e alla loro orditura; esse hanno elevatissima resistenza a trazione, anche per carichi prolungati nel tempo e ripetuti, e buona resistenza alle alte temperature ed agli agenti chimici.^[1]

Tabella 1 Caratteristiche meccaniche dei tessuti di carbonio e di vetro

Materiale	s mm	E GPa	f _t MPa	ε _{tu} %
Tessuto CFRP 20 (carbonio)	0,1	235	3430	1,3
Tessuto CFRP 30 (carbonio)	0,2	235	3430	1,3
Tessuto GFRP (vetro)	1,3	21	414	2,0

s = spessore, E= modulo di Young, f_t= resistenza a trazione, ε_{tu}= deformazione ultima a trazione

Si può notare come ad un minore valore del modulo di elasticità (E) delle fibre di vetro rispetto a quelle di carbonio corrisponda un maggior allungamento a rottura (ε_{tu}) e quindi una maggiore deformabilità.

Inoltre, mentre la resistenza a trazione del tessuto di vetro è paragonabile a quella dell'acciaio, quella del carbonio è di un ordine di grandezza più alta, presentando così elevati rapporti resistenza/peso.

Tutti i prodotti si presentano sotto forma di tessuto estremamente flessibile ed adattabile alla superficie su cui vengono applicati.

Prove di laboratorio

Prove di flessione eseguite sui travetti di solaio rinforzati con fogli di FRP

I travetti in laterocemento utilizzati sono di tipo tralicciato con fondello in laterizio e sono stati confezionati con calcestruzzo a base di cemento classe 325. L'armatura in zona tesa consiste in 1Ø10 (acciaio classe FeB44K) tale da generare la crisi dell'elemento non rinforzato per snervamento dell'acciaio.

I campioni sono stati sottoposti a prova di flessione su quattro punti secondo lo schema statico indicato; la freccia è stata rilevata da due LVDT, il carico da un trasduttore di pressione; è stata inoltre misurata la deformazione in mezzeria all'intradosso del foglio di FRP.

In tutti i test si riscontra un comportamento caratterizzato da una prima fase elastica-lineare (in cui il calcestruzzo teso è ancora in fase elastica) accompagnato da un aumento di rigidità dei campioni placcati, che risulta più marcato per quelli col rinforzo di carbonio; successivamente si sviluppa in zona tesa uno stato di microfessurazione del conglomerato che risulta evidenziato da un cambio di pendenza delle curve carico-freccia. Dopo un'ultima fase non lineare in cui le fessure si propagano dall'intradosso del calcestruzzo verso la zona compressa, si raggiunge la crisi per:

1) snervamento dell'acciaio e schiacciamento del calcestruzzo (TR);

faccia adesivo-laterizio; il fenomeno s'innesca in corrispondenza della fessura flessionale in zona tesa formata sotto uno dei pistoni di carico propagandosi fino all'estremità (TR\1G, TR\3C).

Si rivela un consistente aumento delle capacità portanti senza una sensibile riduzione della freccia al carico di crisi: il carico massimo aumenta infatti per i travetti rinforzati dal 60÷112% rispetto al campione non placcato.

Il confronto fra i provini TR\1C\SF e TR\1C mette in evidenza che l'aderenza calcestruzzo-laterizio è buona, non verificandosi problemi di distacco su questa superficie anche per carichi elevati.

L'utilizzo di due o tre fogli sovrapposti in composito risulta benefico in termini di riduzione delle frecce ai carichi di servizio e sull'incremento di carico ultimo ma infragilisce il meccanismo di rottura perché si instaurano crisi per distacco del piatto dall'estremità (*peeling*) che sono improvvise e non quantificabili attraverso normali verifiche nella sezione più sollecitata. I risultati della prova sono schematizzati nella tabella 2 dove sono riportati, oltre ai carichi limite, anche le modalità di rottura.

Prove di flessione eseguite su pannelli di solaio rinforzati con fogli di FRP

Sono stati realizzati sei pannelli di solaio ad armatura lenta con blocchi in laterizio le cui caratteristiche geometriche e le cui armature sono riportate in apposita figura, unitamente allo schema di prova.

Anche in questo caso l'andamento delle curve carico-freccia e carico-deformazione, mostra:

- un sensibile incremento di rigidità dei campioni rinforzati;

Tabella 2 Carichi massimi, variazioni relative dei carichi massimi rispetto al carico massimo del travetto non rinforzato, freccia ultima e modalità di rottura dei campioni testati

Travetto	Tipo di rinforzo	Carico max (daN)	Variazione carichi max	Freccia ultima (mm)	Modalità di rottura
TR		1693	1,00	34,3	
TR\1C	applicazione di 1 strato di CFRP 20	2706	1,60	47,7	rottura a trazione dell'FRP
TR\1C\SF	rimozione fondello ed applicazione di 1 strato di CFRP 20	2693	1,59	52,8	rottura a trazione dell'FRP
TR\1G	applicazione di 1 strato di GFRP 20	2874	1,70	53,9	peeling all'interfaccia
TR\2C	applicazione di 2 strati di CFRP 20	3342	1,97	35,1	rottura a trazione dell'FRP
TR\3C	applicazione di 3 strati di CFRP 20	3597	2,12	32,5	peeling all'interfaccia

2) formazione di fessure flessionali nel calcestruzzo in zona tesa con conseguente rottura a trazione del foglio di rinforzo (TR\1C\SF, TR\1C, TR\2C);

3) distacco del piatto (*peeling*) dovuto alla rottura dell'inter-

- una riduzione progressiva della freccia massima con l'aumentare del rinforzo impiegato;

- il manifestarsi di una crisi per taglio sul conglomerato in prossimità dell'appoggio, dipendente dalla scarsa resi-

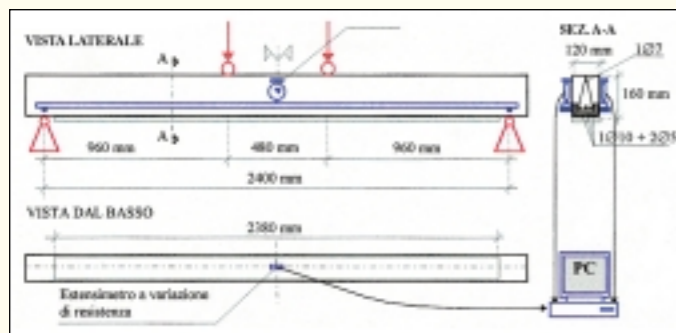


Figura 1: schematizzazione della prova di flessione sui travetti in laterocemento.

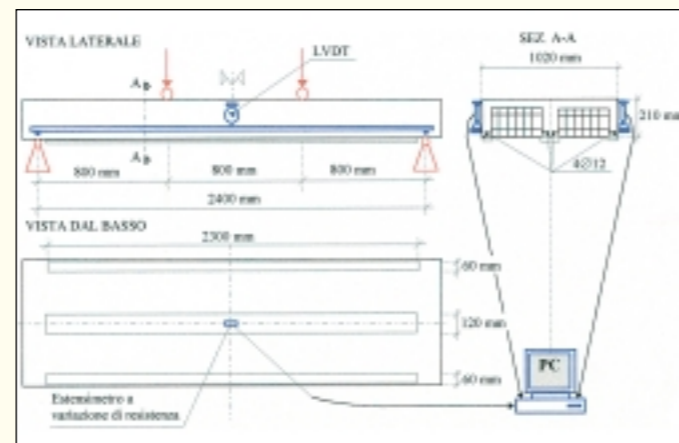


Figura 4: schematizzazione della prova di flessione sui pannelli di solaio in laterocemento.

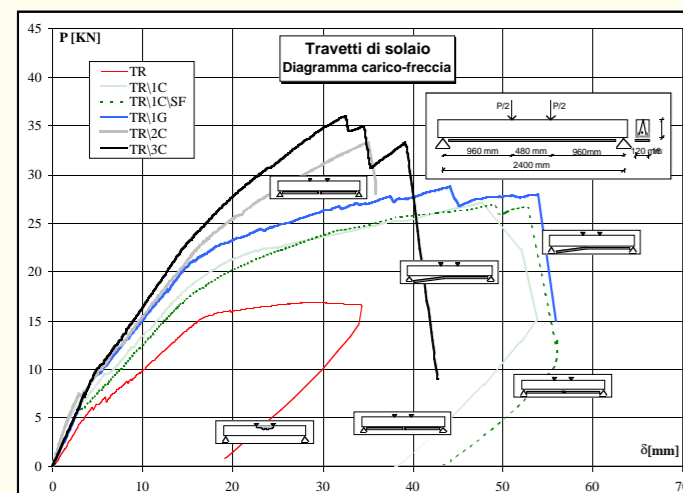


Figura 2: diagramma carico-freccia dei travetti saggiati - TR (non rinforzato), TR\1C (con 1 strato di CFRP 20 applicato), TR\1C\SF (senza fondello con 1 strato di CFRP 20 applicato), TR\1G (con 1 strato di GFRP applicato), TR\2C (con 2 strati di CFRP 20 applicati), TR\3C (con 3 strati di CFRP 20 applicati). CFRP = Carbon FRP, GFRP = Glass FRP.

Sono riportati inoltre i meccanismi di rottura riscontrati.

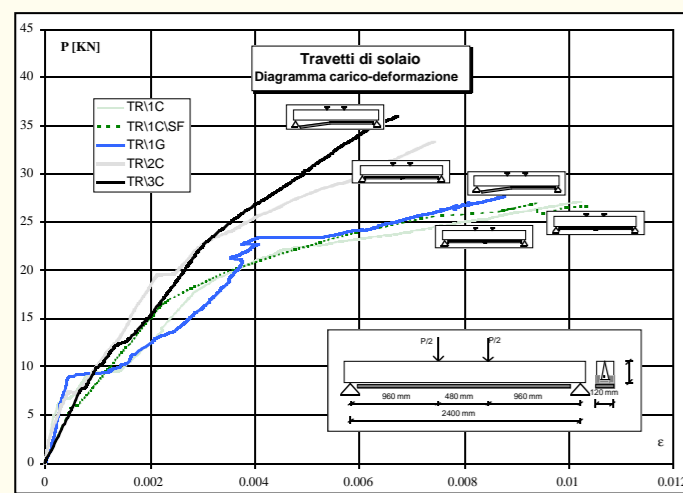


Fig. 3: Diagramma carico-deformazione dei travetti saggiati - TR (non rinforzato), TR\1C (con 1 strato di CFRP 20 applicato), TR\1G (con 1 strato di GFRP applicato), TR\2C (con 2 strati di CFRP 20 applicati), TR\3C (con 3 strati di CFRP 20 applicati). CFRP = Carbon FRP, GFRP = Glass FRP.

Sono riportati inoltre i meccanismi di rottura riscontrati.

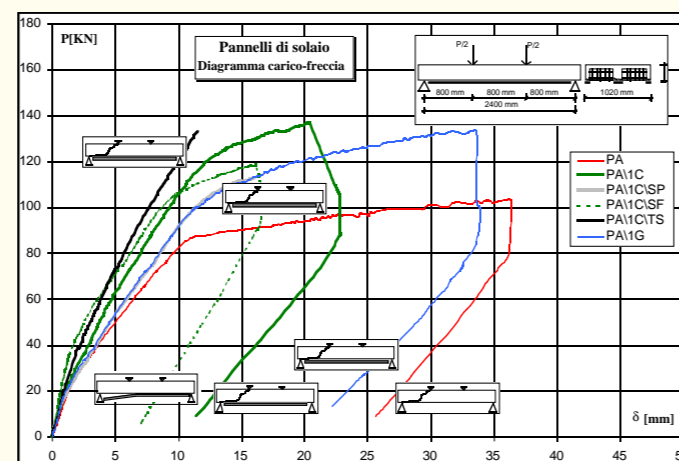


Figura 5: diagramma carico-freccia dei pannelli di solaio saggiati - PA (non rinforzato), PA\1C (con 1 strato di CFRP 30 applicato sotto ai travetti), PA\1C\SP (con 1 strato di CFRP 30 applicato sotto ai travetti senza primer), PA\1C\SF (senza le linguette delle pignatte sotto ai travetti con 1 strato di CFRP 30 applicato), PA\1C\TS (con 1 strato di CFRP 30 applicato sull'intero intradosso), PA\1G (con 1 strato di GFRP applicato sotto ai travetti). CFRP = Carbon FRP, GFRP = Glass FRP. Sono riportati inoltre i meccanismi di rottura riscontrati.

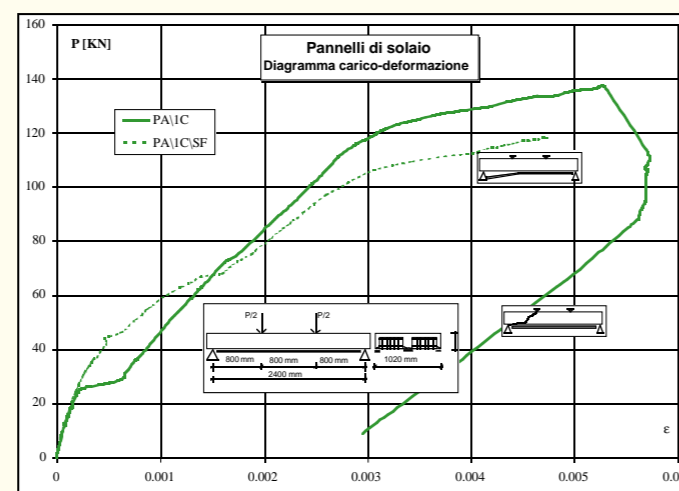


Figura 6: diagramma carico-deformazione dei pannelli di solaio saggiati - PA (non rinforzato), PA\1C (con 1 strato di CFRP 30 applicato sotto ai travetti), PA\1C\SP (con 1 strato di CFRP 30 applicato sotto ai travetti senza primer), PA\1C\SF (senza le linguette delle pignatte sotto ai travetti con 1 strato di CFRP 30 applicato), PA\1C\TS (con 1 strato di CFRP 30 applicato sull'intero intradosso), PA\1G (con 1 strato di GFRP applicato sotto ai travetti). CFRP = Carbon FRP, GFRP = Glass FRP. Sono riportati inoltre i meccanismi di rottura riscontrati.

Tabella 3 Carichi massimi, variazioni relative dei carichi massimi rispetto al carico massimo del pannello non rinforzato, freccia ultima e modalità di rottura dei campioni testati

Pannello	Tipo di rinforzo	carico max (daN)	Variazione carichi max	Freccia ultima (mm)	MODALITÀ DI ROTTURA
PA		10389	1,00	36,4	rottura a taglio
PA\1C	applicazione di 1 strato di CFRP 30 sotto ai travetti	13690	1,32	20,4	rottura a taglio
PA\1C\SP	applicazione senza primer di 1 strato di CFRP 30 sotto ai travetti	11410	1,10	16,6	rottura a taglio
PA\1C\SF	rimozione delle linguette delle pignatte sotto ai travetti ed applicazione di 1 strato di CFRP 30	11829	1,14	16,2	peeling all'interfaccia
PA\1C\TS	applicazione di 1 strato di CFRP 30 sull'intero intradosso	13299	1,28	11,5	rottura a taglio
PA\1G	applicazione di 1 strato di GFRP sotto ai travetti	13368	2,29	33,6	rottura a taglio

stenza intrinseca della struttura originaria e favorita dalla concentrazione tagliante dovuta in quella zona dalla parte terminale del piatto.

Simulazioni dei risultati sperimentali

Il programma semi-analitico presentato in^[2] è stato adattato alla simulazione del comportamento di sezioni laterocementizie.

Il funzionamento del programma è basato su una discretizzazione della trave in conci.

Ogni cono viene poi risolto con metodi incrementali applicando le equazioni di equilibrio e di congruenza in ogni sezione.

Nel modello elaborato si assumono le seguenti ipotesi:

- 1) le sezioni si conservano piane durante l'inflessione della trave, anche quando i materiali non sono più in campo elastico-lineare; ciò comporta la linearità del diagramma delle deformazioni;
- 2) perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- 3) perfetta aderenza tra calcestruzzo e laterizio;

4) le tensioni di aderenza tra adesivo-FRP sono maggiori di quelle adesivo-laterizio o adesivo-calcestruzzo (come mostrato anche sperimentalmente);

5) il foglio di FRP si considera come elemento sottile soggetto a soli sforzi assiali;

6) non esistono scorrimenti relativi tra il laterizio (o calcestruzzo) e le fibre di rinforzo

I comportamenti meccanici dei diversi materiali (calcestruzzo, acciaio, laterizio, FRP) presenti nei travetti e nei pannelli sono stati modellati utilizzando le leggi costitutive dei materiali impiegati nella realizzazione dei campioni di prova. Per ciascun materiale si sono, infatti, determinate le caratteristiche meccaniche di riferimento mediante test standard di laboratorio. La tabella 4 riporta i valori medi ottenuti.

Il confronto, in termini di carico-spostamento e carico-deformazione, dei dati sperimentali e dei risultati analitici ottenuti ha evidenziato un accordo in genere soddisfacente per quanto riguarda l'andamento della curva carico-freccia ed, in certa misura, anche per la determinazione del carico ultimo.



Rottura a trazione della fibra di carbonio per il travetto TR\1C.



Rottura per peeling del travetto TR\1G.

Tabella 4 Caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati

	Travetti			Pannelli		
	fondello	calcestruzzo	acciaio	pignatta	calcestruzzo	acciaio
Ed [MPa]	20000	23518	206000	21395	22622	206000
fc [MPa]	66,5	34,5		52,6	38,5	
ft [MPa]	5,3	2,4	605	6,7	3,1	555
fy [MPa]			473			481

Ed = modulo elastico dinamico, fc = resistenza a compressione, ft = resistenza a trazione, fy = tensione di snervamento

Per i travetti in laterocemento si osserva che:

- la soluzione analitica è leggermente più rigida della sperimentale; probabilmente questo è dovuto al fatto che l'elemento è già parzialmente prefessurato;
- la fase di sviluppo delle fessure nel conglomerato è ben colta dalla trattazione analitica;
- il meccanismo di rottura che viene identificato dal programma analitico risulta differente da quanto evidenziato sperimentalmente per i casi dei campioni: TR\1G, TR\2C e TR\3C. Tale discrepanza è probabilmente dovuta alla presenza di concentrazioni tensionali localizzate a cavallo delle fessure che non possono essere ben quantificate con il programma analitico e che richiedono un opportuno approfondimento scientifico.

Per i pannelli di solaio si osserva invece che il programma non individua, come primo meccanismo di crisi, la rottura per taglio del calcestruzzo, come avvenuto sperimentalmente, ma quelli per rottura a trazione della fibra o per *peeling* con carichi assai superiori a quelli sperimentali; analiticamente non è stata pronosticata la rottura per taglio perché il valore assunto per questo parametro è stato dedotto dal diagramma di Mohr-Coulomb del calcestruzzo e non determinato con prova diretta. Occorrerebbe quindi investigare più approfonditamente sulla resistenza a taglio del calcestruzzo utilizzato.

Conclusioni

I risultati della campagna sperimentale hanno permesso di mostrare che il placcaggio con fogli di materiale composito fibroso è una valida tecnica di ripristino, rinforzo e miglioramento di solai esistenti.

I risultati delle prove di flessione, sia sui travetti che sui pannelli, hanno infatti confermato che l'incollaggio di fogli in composito fibroso incrementa sostanzialmente sia la rigidità (maggiore pendenza delle curve carico-freccia), che risulta più marcata per quelli col rinforzo di carbonio, sia la resistenza ultima dei campioni.

Le prove sui pannelli di solaio sono state condizionate dalla resistenza a taglio delle zone di appoggio: infatti per 5 dei 6 campioni testati la rottura avviene proprio per taglio. Essa è dovuta alla combinazione di tensioni tangenziali e normali in prossimità della parte terminale del piatto, con di-

stacco del copriferro. Invece la notevole snellezza dei travetti ha consentito uno sfruttamento completo delle capacità di resistenza delle fibre, dove in tre casi la crisi avviene per superamento della resistenza a trazione del foglio di rinforzo con rottura dello stesso (TR\1C\SE, TR\1C, TR\2C).

Tutto ciò spiega anche il diverso incremento delle capacità portanti che si è ottenuto nelle due serie di test: per i travetti l'aumento del carico ultimo, rispetto al provino non rinforzato, varia dal 59 al 112 %, mentre per i pannelli è compreso tra 10÷32 %.

Si mette in rilievo la buona adesione della matrice del rinforzo al laterizio. Nei test svolti sui pannelli infatti l'unica rottura per *peeling* con distacco improvviso del rinforzo incollato al travetto centrale avviene proprio nel pannello in cui sono state scalpellate le linguette delle pignatte ed il foglio di CFRP è stato incollato direttamente al calcestruzzo.

L'analisi numerica parametrica presentata si dimostra in sufficiente accordo con i risultati sperimentali anche se si evidenzia la necessità di meglio definire le condizioni di distacco di interfaccia che possono portare ad una sovrastima della reale capacità portante del manufatto. ¶

Bibliografia

1. Arduini M., "Il rinforzo di strutture con fogli di materiale composito", L'Edilizia, aprile 1997.
2. Arduini M., Di Tommaso A., Nanni A., "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams", ACI Structural Journal, July-August 1997.

La ricerca è stata realizzata con il contributo del MURST. Gli Autori sentitamente ringraziano: il personale tecnico del Laboratorio Resistenza dei Materiali - Università di Bologna per l'aiuto fornito nell'esecuzione delle prove; la Mitsubishi Chemicals e la Sumitomo Corporation per la fornitura di fogli di tessuto unidirezionali in carbonio tipo Replark 20 e Replark 30; la Composite Retrofit International per la fornitura del tessuto in fibra di vetro Tyfo SEH51.

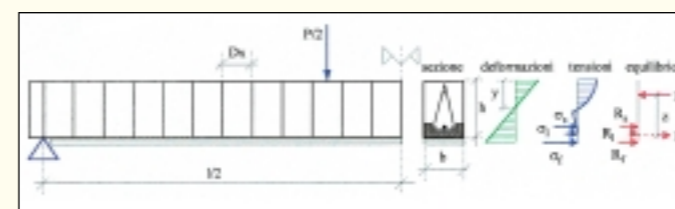


Figura 7: semi-trave discretizzata in conci; deformazioni, tensioni ed equilibrio della sezione rinforzata.

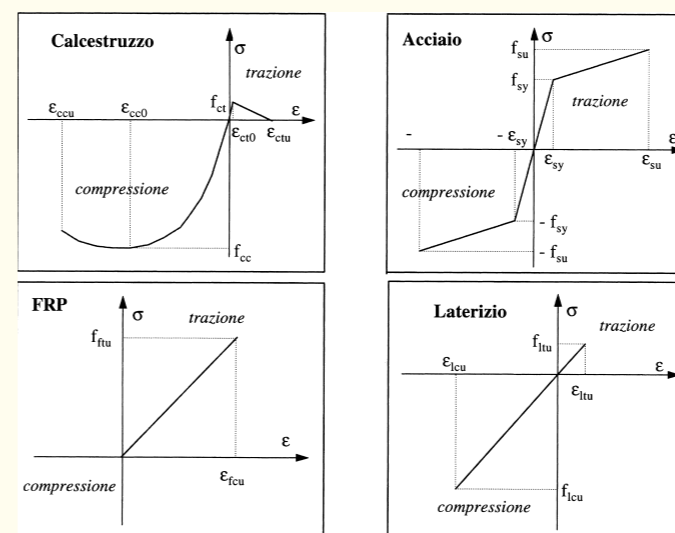


Figura 8: legami costitutivi dei materiali impiegati nella modellazione.

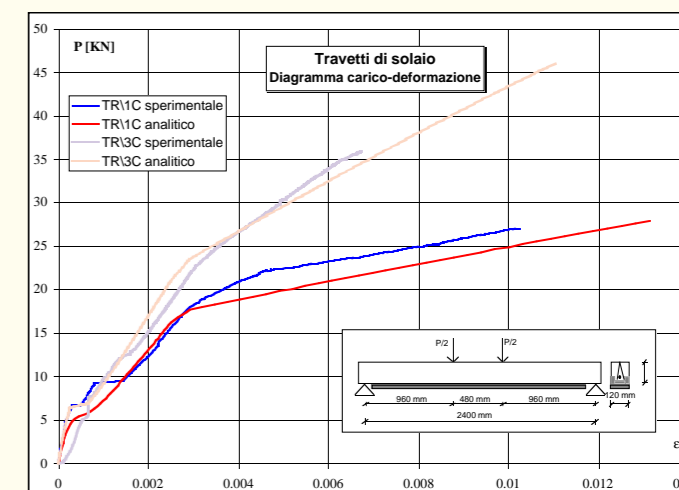


Figura 10: confronto tra i diagrammi carico-deformazione sperimentali ed analitici per i travetti.

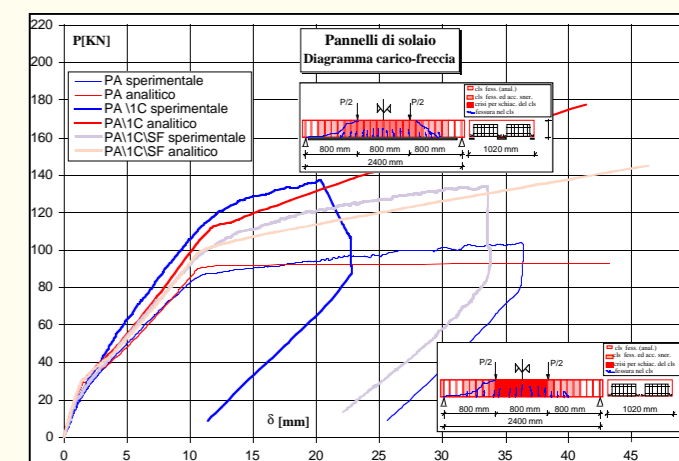


Figura 11: confronto tra i diagrammi carico-freccia sperimentali ed analitici per i pannelli; sono anche confrontate la distribuzione delle fessure rilevate sperimentalmente e le previsioni analitiche.

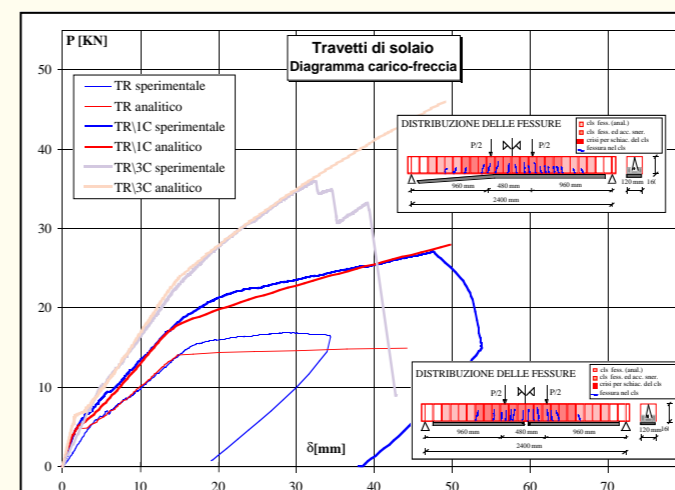


Figura 9: confronto tra i diagrammi carico-freccia sperimentali ed analitici per i travetti; sono anche confrontate la distribuzione delle fessure rilevate sperimentalmente e le previsioni analitiche.

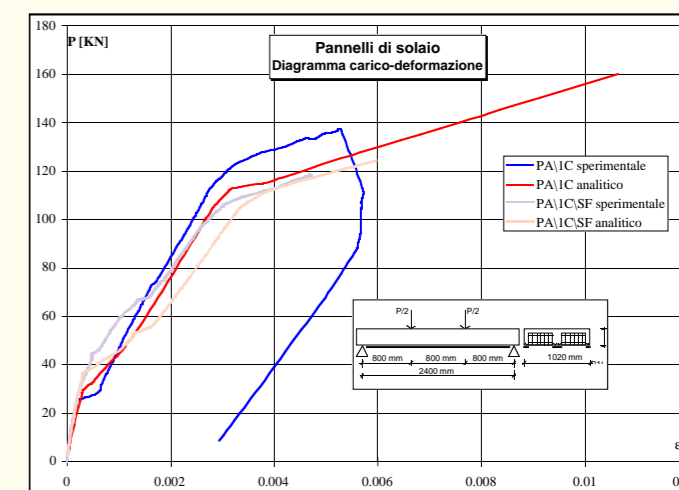


Figura 12: confronto tra i diagrammi carico-deformazione sperimentali ed analitici per i pannelli.