

Solai in laterocemento rinforzati trasversalmente mediante tessuto in FRP

Si presentano i risultati di una ricerca teorico-sperimentale eseguita su modelli parziali di solai laterocementizi rinforzati trasversalmente con fogli di materiale composito (FRP). Scopo dell'indagine è quello di verificare l'efficacia di rinforzi trasversali applicati all'intradosso del solaio miranti ad esaltare, ove possibile, il comportamento a piastra

I solai sono elementi strutturali bidimensionali che trasmettono i carichi ad essi applicati in due direzioni, principalmente nella direzione di tessitura ma anche, secondariamente, in direzione trasversale al senso di tessitura. Quindi, in un intervento di recupero strutturale, è opportuno rinforzare il solaio sia in senso longitudinale che in senso trasversale, esaltando così un comportamento statico bidirezionale, a *pietra*.

Inoltre, nei solai è possibile talvolta osservare delle lesioni dirette nel senso di tessitura dei travetti, dovute all'insorgenza di sollecitazioni trasversali non adeguatamente considerate in fase di progetto.

Queste lesioni non sono quasi mai preoccupanti dal punto di vista statico ma rappresentano un difetto costruttivo che può comunque richiedere un intervento di tipo strutturale. In queste condizioni può essere utile rinforzare i solai con fogli di tessuto in FRP, applicando le fibre sia nel senso della loro tessitura che in senso ortogonale.

La disponibilità di prodotti fibrocompositi (conosciuti a livello internazionale con la sigla FRP o *Fiber Reinforced Plastic*) è molto recente: il materiale risulta estremamente leggero, pur essendo molto più resistente a trazione dell'acciaio, non si corrode nel tempo e non presenta particolari difficoltà di posa in opera.

Mentre il rinforzo in senso longitudinale di elementi inflessi è stato ampiamente studiato^{(1) (2)}, non sembra invece che siano stati eseguiti studi approfonditi sui rinforzi in senso trasversale di elementi di solaio in laterocemento.

Quindi, per indagare sulla capacità portante trasversale dei solai è stata eseguita una campagna sperimentale presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiali M. Salvati del Poli-

tecnico di Bari. Nel seguito si riportano i risultati ottenuti dalle prove effettuate e si propone un modello di calcolo in grado di prevedere le modalità di rottura dei campioni testati.

Nel corso delle prove è stata determinata la portanza di modelli parziali di solaio costituiti da strisce trasversali, della larghezza di 50 cm, rinforzate con fogli di fibra di carbonio.

Sono stati previsti due diversi modelli di solaio in laterocemento, del tipo realizzato in opera, per ognuno dei quali sono stati costruiti quattro campioni, successivamente sottoposti ad un carico crescente fino al raggiungimento della rottura.

La sperimentazione ha consentito di verificare la validità della tecnica di rinforzo proposta, individuando i possibili meccanismi di rottura che possono manifestarsi con l'impiego di questa metodologia. Entrambi i modelli testati sono stati appoggiati su rulli cilindrici ed è stato loro applicato un carico verticale in mezzera. Le prove sono state eseguite prima in assenza del rinforzo e, successivamente, in presenza di rinforzo.

Le prove sui modelli non rinforzati hanno evidenziato una quasi totale mancanza di capacità portante trasversale dei campioni.

I materiali utilizzati e la loro posa in opera I provini sono stati realizzati con blocchi di laterizio da getto in opera e calcestruzzo di resistenza caratteristica $R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$, con un'armatura di ripartizione trasversale costituita da 2 $\Phi 8$, posta nella soletta.

I blocchi utilizzati per la realizzazione dei campioni sono



Modello di solaio n. 1.



Modello di solaio n. 2.

dotati di due alette sagomate che consentono, accostando i blocchi stessi, di costruire la cassaforma della nervatura, ottenendo così un intradosso di solaio uniforme, completamente in laterizio.

Il tessuto utilizzato per il rinforzo, estremamente flessibile ed adattabile alla superficie su cui viene applicato, è in fogli di fibre di carbonio (*MBrace C1-30*) unidirezionali, immerse in una matrice costituita prevalentemente di resine polimeriche. Una volta costruiti i modelli, sono stati applicati i rinforzi; l'incollaggio del materiale fibroso è stato effettuato mediante un sistema multistrato che ha richiesto le seguenti operazioni:

- applicazione del *primer*, steso a rullo;
- rasatura, per l'eliminazione di eventuali imperfezioni del

supporto (vaiolature, macroruvidità, ecc.);

- applicazione dell'adesivo, steso a rullo;
- applicazione del rinforzo fibroso (*MBrace FRP C1-30*), utilizzando l'appropriato rullino per l'eliminazione delle bolle d'aria;
- dopo un attesa di circa 30 minuti, applicazione del secondo strato di adesivo;
- applicazione del secondo strato di rinforzo fibroso;
- applicazione del terzo strato di adesivo.

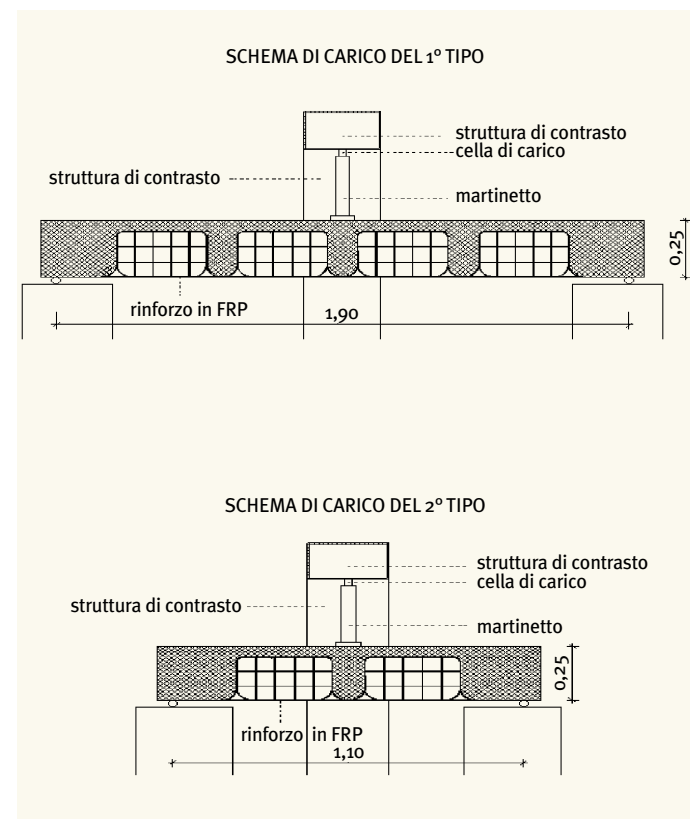
Il materiale è stato posto in opera dal personale del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Bari, per cui l'applicazione del rinforzo può essere eseguita anche da persone non specializzate, purché adeguatamente istruite.

1 Caratteristiche tecniche dei blocchi da solaio

Percentuale di foratura	$\phi < 0.6 + 0.625 h$ $\phi < 75 \%$
Pareti esterne del blocco	spessore $S_e > 8 \text{ mm}$
Setti interni	spessore $S_i > 7 \text{ mm}$
Resistenza nella direzione parallela ai fori	$R_{1k} > 15 \text{ N/mm}^2$ ($> 150 \text{ kg/cm}^2$)
Resistenza nella direzione perpendicolare ai fori	$R_{2k} > 5 \text{ N/mm}^2$ ($> 50 \text{ kg/cm}^2$)
Resistenza a punzonamento	$R_3 > 1,5 \text{ KN}$ ($> 150 \text{ kg}$)
Modulo di elasticità	$E_L < 25 \text{ KN/mm}^2$ ($< 250000 \text{ kg/cm}^2$)

2 Caratteristiche fisico-meccaniche di MBrace C1-30

Deformazione ultima a trazione	$\epsilon_u = 1,5 \%$
Spessore di tessuto secco	$S = 0,165 \text{ mm}$
Area resistente per unità di larghezza	$A_{eff} = 1,65 \text{ mm}^2/\text{cm}$
Modulo elastico caratteristico a trazione	$E_{tk} = 230000 \text{ Mpa}$
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{tk} = 3430 \text{ Mpa}$
Tensione di trazione di calcolo	$f_d = 1750 \text{ Mpa}$
Tensione ammissibile di trazione	$\bar{\sigma} = 1500 \text{ Mpa}$
Aderenza al cls: prova En 1542 (trazione)	rottura del cls
prova En 12615 (taglio)	rottura del cls



Schema di carico dei campioni di solaio testati in laboratorio.



Alcune fasi dell'applicazione ai modelli dei fogli fibrorinforzati.

Comportamento sperimentale

Campioni di tipo 1

Nella prima fase della prova, durante la quale i blocchi sono rimasti integri, il comportamento sotto carico dei campioni rinforzati di tipo 1 è risultato pressoché lineare. Successivamente, per valori del carico intorno ai 900–1000 daN, si sono verificate le prime lesioni nei setti dei blocchi e contemporaneamente si sono sviluppate delle microfessurazioni in alcune zone critiche del conglomerato.

Incrementando ulteriormente il carico, si è osservata la rottura progressiva dei setti dei blocchi e la propagazione delle fessure. Il collasso, con conseguente perdita parziale di capacità portante, è sempre stato causato dallo scorrimento fra il tessuto di rinforzo e uno dei travetti laterali con conseguente tranciamento del laterizio.

Lo scorrimento non si è verificato per scollamento del tessuto, ma per la rottura dei blocchi e della parte terminale del travetto.

Come sarà esposto in seguito, mentre lo sforzo di scorri-

mento trasversale che ha prodotto la rottura può essere stimato in modo semplice, risulta difficile prevedere per via teorica la resistenza dei blocchi nei confronti di questo tipo di rottura.

Il quadro fessurativo evidenzia che le deformazioni di scorrimento sono predominanti e che perciò la crisi può essere associata alla sollecitazione di taglio (le linee in rosso riportate nelle immagini evidenziano le lesioni più importanti; le zone critiche dove queste lesioni si manifestano possono prevedersi attraverso un modello di calcolo a trave *Vierendeel*).

Campioni di tipo 2

I campioni rinforzati 2/A, 2/B e 2/C presentano una capacità portante superiore a quella dei campioni rinforzati di tipo 1.

Anche in questo caso, il comportamento dei modelli, sotto carico, è risultato pressoché lineare sino alla rottura dei blocchi in laterizio, a seguito della quale si è attivato il meccanismo di collasso del provino.



Campione tipo 1: fessurazione dei blocchi di laterizio sotto carico.



Campione tipo 1: collasso del provino con rottura dei blocchi e della parte terminale dalla nervatura.

Per il campione di tipo 2A è stato effettuato anche un ciclo di carico-scarico fino ad una sollecitazione di circa 1700 daN, che ha evidenziato un buon comportamento elastico.

Poiché l'unico travetto presente nei modelli di tipo 2 è posto in posizione centrale, non si può realizzare il tipo di rottura che ha causato il collasso dei campioni di tipo 1, dovuta allo scorrimento fra lo strato di rinforzo e i travetti laterali. Il meccanismo di collasso si attiva invece a causa della formazione di due cerniere plastiche nella soletta, che nelle immagini a corredo sono evidenziate con delle linee verdi.

Poiché l'armatura trasversale (di ripartizione) è appoggiata sui blocchi, la cerniera posta all'attacco della soletta con il cordolo laterale non trasmette alcun momento flettente, mentre il momento plastico della cerniera a ridosso del travetto centrale può essere calcolato con le classiche formule della teoria del cemento armato.

Sia per i modelli di tipo 1 che per i modelli di tipo 2 il diagramma sperimentale carico-freccia evidenzia in fase post-collasso un comportamento apparentemente duttile. Si ritiene che tale circostanza sia dovuta a una parziale trasmissione della sollecitazione di taglio attraverso il tessuto in FRP che, a causa delle grandi deformazioni, in fase post-collasso presenta una inclinazione non trascurabile rispetto all'orizzontale.

Tale comportamento statico a *tensostruttura* è stato reso possibile dall'ottima adesione dei fogli dello strato di rinforzo ai cordoli di estremità.

Modellazione teorica I risultati della sperimentazione eseguita possono essere interpretati attraverso un modello di calcolo in cui il campione di tipo 1 è schematizzato come una trave *Vierendeel*.

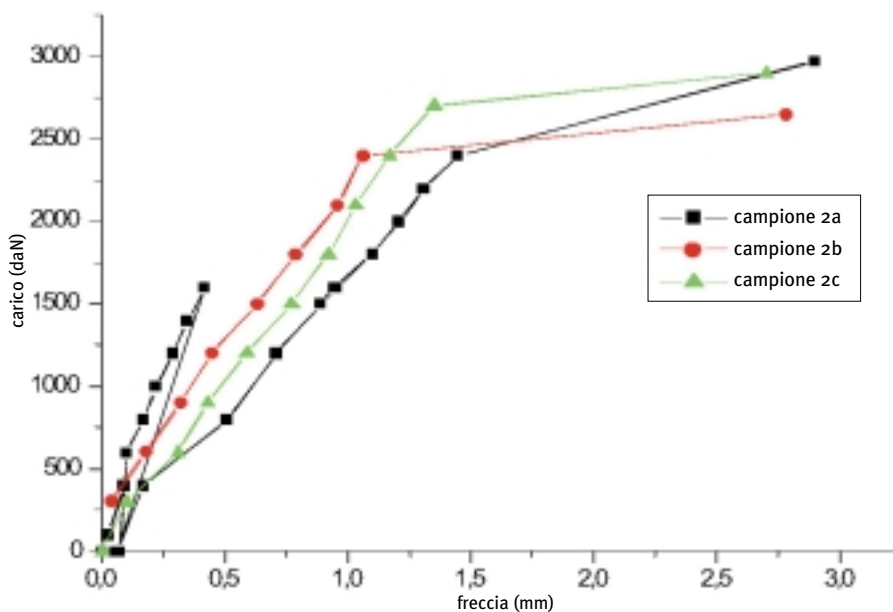
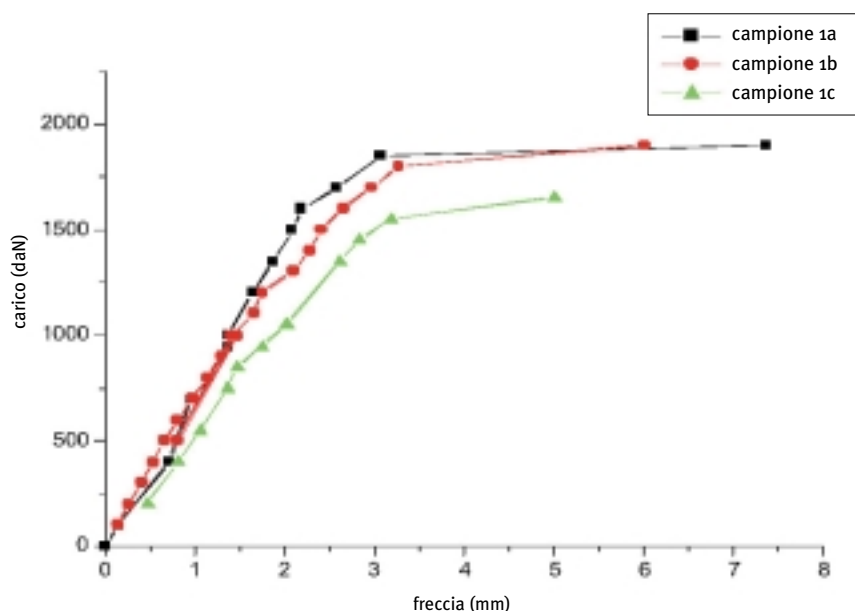
In tale modellazione si è ignorato, volutamente, la resistenza offerta dai blocchi.

Si è assunto che in condizioni di incipiente collasso, in corri-

spondenza delle lesioni osservate nelle prove sperimentali, nella soletta armata si formino delle cerniere, la cui posizione è determinata dalla disposizione dell'armatura di ripartizione trasversale all'interno della soletta, poggiante direttamente sui bordi di laterizio.

La lamina in fibra di carbonio è rappresentata da un tirante e i due cordoli laterali mediante dei puntoni inclinati.

Nel modello di calcolo adottato, il taglio si trasmette esclusivamente attraverso la soletta: la porzione di soletta fra due travetti può quindi essere rappresentata come una mensola compresa tra la lesione longitudinale e la sezione della soletta all'attacco con il travetto. Nei campioni in esame la luce di tale mensola è pari a $b = 23$ cm.



Diagrammi carico-freccia dei campioni rinforzati.



Campione tipo 2: collasso del provino.

Lo schema statico individua quindi tre tipi di sezioni critiche:
 1 - sezione della soletta all'attacco con il travetto;
 2 - sezione del travetto all'attacco con la soletta;
 3 - sezione di connessione fra travetto e tessuto.

La sezione 1 della soletta è soggetta ad uno sforzo normale di compressione e ad un momento flettente pari rispettivamente a:

$$N^{(1)} = \frac{1 Pr}{2 h^*} \quad M^{(1)} = \frac{Pb}{2} \quad (1)$$

dove r è la distanza orizzontale tra l'appoggio e la sezione 1; h^* è la distanza verticale fra la lamina e la superficie media della soletta. La sezione 1, all'attacco fra la soletta e il travetto centrale, è sottoposta ad uno sforzo normale maggiore ed è quindi soggetta a condizioni meno gravose (come ha confermato la sperimentazione).

Le equazioni di equilibrio della sezione 1 in condizioni di rottura sono:

$$\frac{1}{2} \frac{P_{ult}^{(1)} r}{h^*} = 0.8 f_{cm} b x - f_{ym} A_f \quad (2)$$

$$\frac{P_{ult}^{(1)} b}{2} - \frac{P_{ult}^{(1)} r}{2h^*} \left(\frac{h_s}{2} - 0.4 x \right) = f_{ym} A_f (h_s - 0.4 x) \quad (3)$$

dove: $P_{ult}^{(1)}$ è il carico che produce la rottura della sezione 1; $f_{ym} = 500 \text{ N/mm}^2$ (per acciaio Feb 44k) è la tensione di snervamento media dell'acciaio; $f_{cm} = 23 \text{ N/mm}^2$ è la tensione di rottura media del calcestruzzo; $A_f = 1 \text{ cm}^2$ ($2 \phi 8$) è l'area dell'armatura presente nella soletta; h_s è l'altezza utile della soletta, pari a 4,6 cm. Dalla (2) e dalla (3) si ottiene quindi:

$$P_{ult}^{(1)} = 1878 \text{ daN.}$$

Il carico $P_{ult}^{(2)}$ che provoca la rottura della sezione critica 2 può essere stimato tramite la relazione:

$$M^{(2)} = \frac{P_{ult}^{(2)} i}{2} \frac{t}{h^*} = f_{ctm} W \quad (4)$$

dove $f_{ctm} W$ è il momento resistente medio della sezione critica 2. Posto il valore medio della resistenza a trazione per flessione del calcestruzzo pari a $f_{ctm} = 1,2 \times 2,24 = 2,71 \text{ N/mm}^2$, si ottiene:

$$P_{ult}^{(2)} = 1412 \text{ daN}$$

Sebbene la verifica della sezione critica 2 indichi, nel caso in esame, una resistenza minore della sezione critica 1, in realtà la crisi di questa sezione si è verificata solo nella fase terminale post-collasso poiché l'inflessione trasversale della nervatura è stata efficacemente contrastata dai blocchi in laterizio.

Come già anticipato, la crisi dei campioni di tipo 1 è sempre avvenuta per scorrimento della lamina rispetto al travetto in corrispondenza della sezione critica 3 e, come è stato già osservato, la rottura per scorrimento non ha mai coinvolto lo strato adesivo fra lamina e blocco, ma ha riguardato quest'ultimo e la parte terminale del travetto. Mentre è facile, sulla base dello schema statico proposto, valutare lo sforzo di scorrimento S fra lamina e travetto, risulta estremamente complessa una previsione teorica della resistenza dei blocchi a questo tipo di rottura. Si può comunque osservare che, noto il carico di rottura sperimentale medio P_{ult} , che per i travetti di tipo 1 è stato di circa 1800 daN, dallo schema statico proposto si ricava il seguente valore dello sforzo di scorrimento.

$$S = \frac{P_{ult} i}{2h^*} = 1600 \text{ daN} \quad (5)$$

a cui si può far corrispondere una tensione tangenziale "convenzionale" di rottura pari a:

$$\tau = \frac{S}{A} = \frac{1600}{10 \times 50} = 3 \text{ daN/cm}^2 \quad (6)$$

dove l'area A della sezione 3 è stata posta pari al prodotto della larghezza del travetto per la profondità del campione.

Come già osservato, nei campioni di tipo 1 si individua un solo tipo di sezione critica poiché, per simmetria, sono nulli sia lo scorrimento nella sezione di attacco fra travetto centrale e lamina, sia il momento flettente nella sezione del travetto all'attacco con la soletta. Il carico di rottura previsto mediante lo schema statico adattato è pari a $P_{ult}^{(1)} = 1878 \text{ daN}$, ed è sensibilmente inferiore a quello osservato sperimentalmente. Si attribuisce alla capacità di resistere a taglio dei laterizi la discrepanza osservata fra dati sperimentali e previsione teorica.



Campione tipo 1 portato al collasso.

Conclusioni L'indagine sperimentale ha mostrato l'efficacia dell'intervento proposto e ha permesso le seguenti osservazioni:

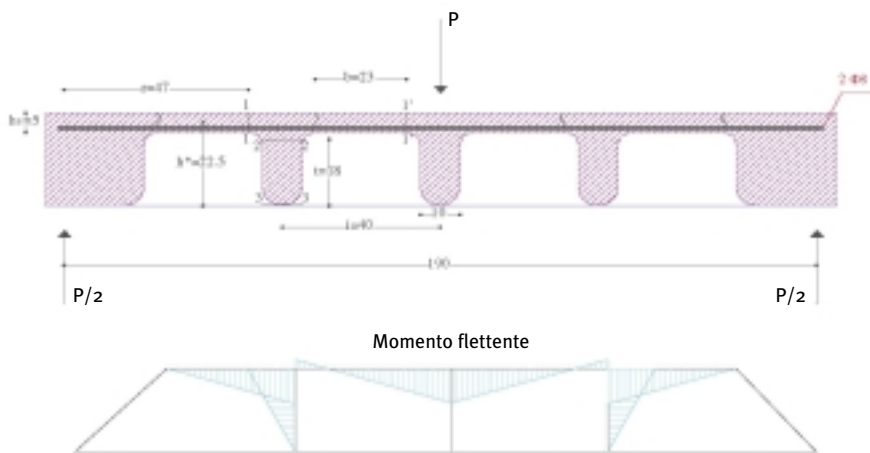
- le sollecitazioni prodotte dai carichi applicati non hanno in alcun modo messo in crisi il rinforzo in tessuto di fibra di carbonio, né lo strato di incollaggio, anche in fase post-collasso;
- la crisi dei campioni è sempre stata determinata dalla rottura dei laterizi, causata dallo scorrimento fra lamina e travetti nei campioni di tipo 1, e da compressione diagonale nei campioni di tipo 2. I blocchi in laterizio hanno contribuito in modo essenziale alla capacità portante dei campioni, in quanto il carico di rottura osservato è sempre risultato sensibilmente su-

periore al carico stimato con un modello semplificato che ignora la presenza dei laterizi;

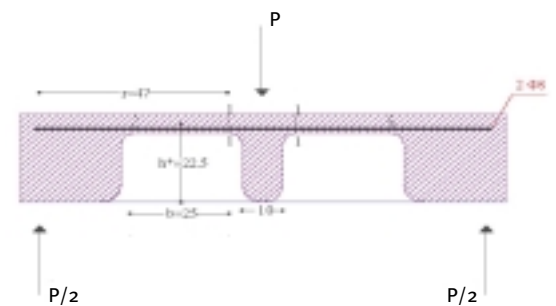
- il modello di calcolo adottato ha fornito sempre risultati a vantaggio di sicurezza ed è perciò proponibile per stimare l'efficacia dell'intervento. ¶

Bibliografia

1. ACI Committe 440, *State of the Art Report on FRP for Concrete Structures*, ACI 440R-96, 1996.
2. M. Arduini, *Il rinforzo di strutture con fogli di materiale composito*, L'Edilizia, n.3-4, marzo-aprile 1997, pp. 32-42.



Campione tipo 1: modello di calcolo interpretativo dei risultati della sperimentazione eseguita e diagramma del momento flettente dello schema statico adottato.



Campione tipo 2: modello di calcolo e schema statico adottato.