

# USO DEL SCC CON FIBRE SINTETICHE PER LA REALIZZAZIONE DI PANNELLI PREFABBRICATI: CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE E STUDIO SPERIMENTALE

*LUCA COMINOLI, Università degli Studi di Bergamo*

*PIETRO MASSINARI, Chryso Italia S.p.a, Lallio (BG)*

*GIOVANNI A. PLIZZARI, Università degli Studi di Brescia*

## SUMMARY

*The present paper describes an experimental research on precast panels. The main objective of the investigation concerns the possibility of replacing the traditional reinforcement with synthetic fibres incorporated into the concrete matrix. This substitution would bring to practical advantages concerning not only the panel design specifically, but also the whole production process.*

*The introduction of fibres into concrete matrices imparts ductility to an otherwise brittle material and improves its durability. The application of FRC to the production of precast panels is a promising technique since it brings to several advantages. First of all it replaces the conventional transverse reinforcement, bringing to time and cost-savings, contributing to a major industrialization degree of the production process and avoiding the areas used for the storage of the welded mesh; secondly it allows the design of wall panels to be dependent only on static requisites and not on cover limitations; finally it improves the thermal insulation properties of the panel and reduces its weight, decreasing the transportation costs. For these reasons FRC panels represent a competitive and cost-effective solution.*

## 1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo rinforzato con fibre (*Fiber Reinforced Concrete, FRC*) sta suscitando notevole interesse nel campo delle applicazioni strutturali in quanto il suo impiego riduce i fenomeni di fessu-

razione, migliora la durabilità delle strutture ed in molti casi permette di sostituire l'armatura secondaria tradizionale [1, 2].

L'utilizzo del rinforzo fibroso è infatti economicamente conveniente rispetto all'armatura ordinaria grazie all'eliminazione dei tempi di posa e per la garanzia di avere un rinforzo anche in quei punti dove la rete elettrosaldata difficilmente può rimanere nella corretta posizione durante le operazioni di getto.

Le fibre sono particolarmente indicate per integrare o sostituire l'armatura diffusa (es. staffe o armatura di parete) in quanto l'armatura convenzionale si presta meglio a funzionare come armatura concentrata (es. armatura flessionale nelle travi). Il fibrorinforzo consente anche di evitare l'utilizzo dell'armatura di pelle quando esigenze di durabilità o di resistenza al fuoco richiedono l'impiego di un notevole copriferro.

I numerosi lavori disponibili in letteratura [3, 4] evidenziano il grande interesse rivolto allo studio delle proprietà meccaniche delle fibre metalliche, sintetiche o di vetro ed alla formulazione di nuovi materiali ad alte prestazioni [5, 6].

Il calcestruzzo rinforzato con fibre è ormai da tempo diffusamente impiegato nelle pavimentazioni industriali [7], come calcestruzzo proiettato per il rivestimento di gallerie [8] o per la realizzazione di conci prefabbricati [9, 10]. Altri settori hanno mostrato notevole interesse verso questo materiale innovativo: tra questi va citata sicuramente la cosiddetta "prefabbricazione leggera" in cui le fibre sono utilizzate per la realizzazione di tubature, di bocche di lupo, di piastre di chiusura di tombature [11] o di garages.

L'industria della prefabbricazione è particolarmente interessata allo sviluppo di applicazioni che impieghino la tecnologia del fibrorinforzato in quanto vengono ottimizzate sia l'industrializzazione del processo produttivo che le prestazioni dei manufatti realizzati [12]. Quando l'impiego delle fibre permette di sostituire l'armatura superficiale, lo spessore degli elementi può essere ridotto in quanto non è più necessario garantire il copriferro minimo delle armature tradizionali. Infine, proprio negli elementi sottili, le tolleranze di posizionamento delle armature tradizionali influenzano fortemente la capacità portante delle strutture, problema assente nelle sezioni realizzate in calcestruzzo fibrorinforzato.

Attualmente, un'applicazione di particolare interesse nel campo della prefabbricazione riguarda i pannelli di tamponamento fibrorinforzati [13].

Dal punto di vista statico i pannelli sono soggetti ad azioni legate al peso proprio, nonché a sollecitazioni dovute alla loro movimentazione nel

transitorio, alle variazioni termiche, alla spinta del vento ed alle sollecitazioni sismiche. In tali strutture l'adozione di un rinforzo fibroso porta sia a vantaggi costruttivi, tra cui la possibilità di sostituire l'armatura tradizionale, da posizionare manualmente sulle facce esterne del manufatto, con fibre che, essendo presenti nell'impasto della matrice, favoriscono l'industrializzazione del processo produttivo, sia a vantaggi economici legati alla possibilità di diminuire gli spessori strutturali, grazie all'assenza dell'armatura tradizionale, in modo da rendere più leggeri i manufatti e di ridurre così i costi di trasporto [14].

Nel presente lavoro sono riportati i risultati di una campagna sperimentale relativa alla caratterizzazione del calcestruzzo autocompattante (SCC) fibrorinforzato e finalizzata al suo utilizzo nella realizzazione di pannelli di tamponamento prefabbricati.

## 2. CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE

La caratterizzazione del materiale è stata condotta su provini confezionati con due differenti matrici di calcestruzzo autocompattante di normale resistenza (C30/37; Tab. 1).

I calcestruzzi sono stati rinforzati con fibre sintetiche derivate da una miscela di materie prime ad elevata resistenza meccanica, prodotte dalla Chryso Italia S.p.a.

Le principali proprietà geometriche e meccaniche delle fibre utilizzate sono mostrate in Tabella 2, mentre le combinazioni adottate per il rinforzo del materiale SCC sono riportate in Tabella 3.

<i>Mix-design calcestruzzo SCC</i>		
Cemento Portland 42.5R II A-LL	320	[kg/m <sup>3</sup> ]
Additivo Superfluidificante PCP	3.3	[l/m <sup>3</sup> ]
Rapporto acqua/cemento	0.56	[-]
Massa calcestruzzo fresco	2364	[kg/m <sup>3</sup> ]
Slump Flow	700	[mm]
<i>Mix-design calcestruzzo SCC alleggerito</i>		
Cemento Portland 42.5R II A-LL	400	[kg/m <sup>3</sup> ]
Additivo Superfluidificante PCP	4.3	[l/m <sup>3</sup> ]
Rapporto acqua/cemento	0.56	[-]
Massa calcestruzzo fresco	1835	[kg/m <sup>3</sup> ]
Slump Flow	650	[mm]

**Tabella 1.** Composizione del calcestruzzo SCC ed SCC alleggerito.

<i>Fibra</i>	<i>S40</i>	<i>S25</i>
Lunghezza ( $L_f$ )	40 mm	25 mm
Diametro equivalente ( $\phi_f$ )	1.0 mm	1.0 mm
Rapporto d'aspetto ( $L_f/\phi_f$ )	40	25
Resistenza trazione [MPa]	650	650
Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	920	920
Punto di fusione [°C]	160	160
Modulo elastico [GPa]	5.0	5.0

**Tabella 2.** Proprietà geometriche e meccaniche delle fibre sintetiche adottate nella ricerca.

<i>Mix</i>	<i>Miscela</i>	<i>Fibre sintetiche [kg/m<sup>3</sup>]</i>	
		<i>S40</i>	<i>S25</i>
Mix-1	SCC	-	-
Mix-2	SCC	3.0	-
Mix-3	SCC	4.0	-
Mix-4	SCC	5.0	-
Mix-5	SCC	-	4.0
Mix-6	SCC alleggerito	3.0	-
Mix-7	SCC alleggerito	4.0	-

**Tabella 3.** Composizione dei differenti mix-design impiegati.

La Tabella 4 sintetizza infine le principali caratteristiche meccaniche delle matrici adottate, in termini di modulo elastico ( $E_c$ ), di resistenza a trazione ( $f_{ct}$ ) ed a compressione ( $f_{c,cube}$ ).

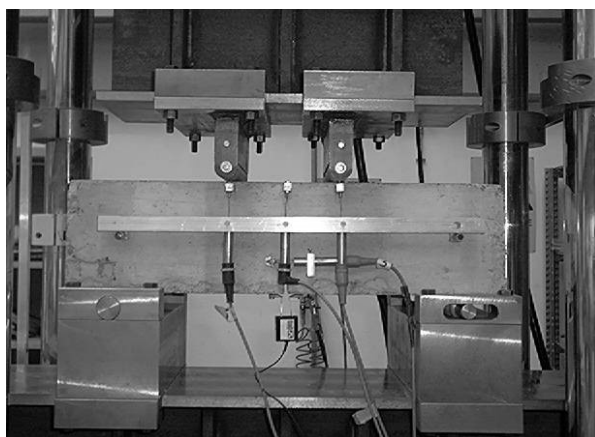
<i>Mix</i>	<i>Modulo elastico</i>	<i>Resistenza trazione</i>	<i>Resistenza compressione</i>
	$E_c$ [GPa]	$f_{ct}$ [MPa]	$f_{c,cube}$ [MPa]
Mix-1	27.7	3.20	42.5
Mix-2	26.5	3.71	39.7
Mix-3	26.2	3.57	39.5
Mix-4	29.5	3.46	43.2
Mix-5	23.6	3.31	44.5
Mix-6	-	-	29.5
Mix-7	-	-	29.7

**Tabella 4.** Principali caratteristiche meccaniche delle miscele impiegate.

Per verificare le reali possibilità derivanti dall'utilizzo del fibrorinforzo nelle applicazioni strutturali, è necessario effettuare prove di tenacità seguendo le indicazioni riportate nella norma UNI 11039 [15] che prevede l'esecuzione di prove di flessione (su 4 punti) su provini intagliati con sezione di 150x150 mm e lunghezza di 600 mm (Fig. 1). Le prove di flessione sono state eseguite

mediante una macchina elettromeccanica (INSTRON 1274), utilizzando come parametro di controllo l'apertura di fessura alla base dell'intaglio (*CMOD, Crack Mouth Opening Displacement*).

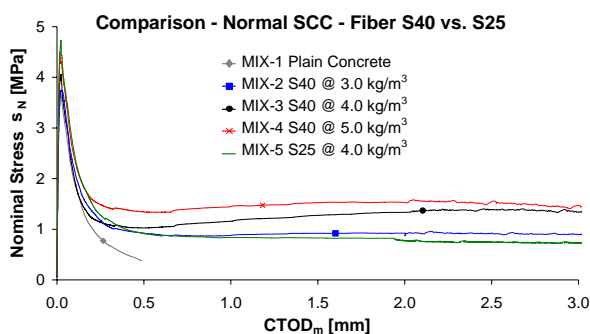
In aggiunta, sono state rilevate le aperture di fessura sulle due facce del provino, all'apice dell'intaglio (*CTOD, Crack Tip Opening Displacement*), come mostrato in Figura 1.



**Figura 1.** Geometria di un provino di trave in calcestruzzo fibrorinforzato: particolare della strumentazione.

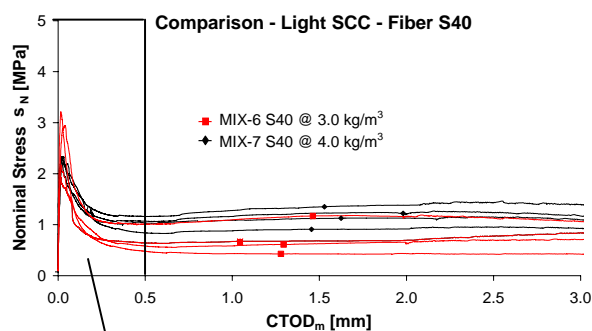
I risultati sperimentali relativi alle prove di flessione sono riportati, in termini di curve sforzo nominale-apertura di fessura in Figura 2, relativamente al SCC tradizionale, ed in Figura 3 per quello alleggerito.

Si può notare che, dopo il primo tratto elastico-lineare, si raggiunge il picco di carico che tende ad aumentare leggermente con il contenuto di fibre (Fig. 3b; in particolare si osservi la differenza tra la curva relativa al provino senza fibre e la curva relativa al calcestruzzo con il contenuto maggiore di fibre).

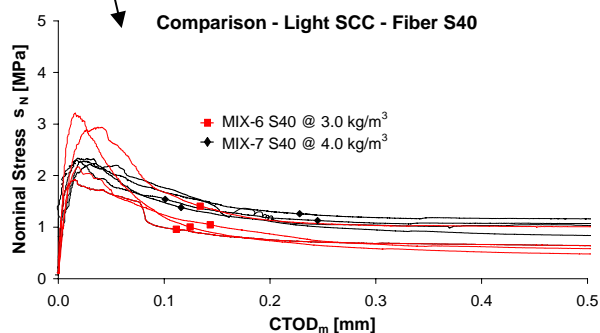


**Figura 2.** Curve sforzo nominale-apertura di fessura (valori medi) ricavate da prove di flessione su calcestruzzi autocompattanti di normale resistenza.

Tuttavia, tale aumento non è l'effetto principalmente voluto, per lo meno nell'ambito dei dosaggi di fibra utilizzati. Le fibre sintetiche, infatti, esercitano il loro contributo nella fase seguente la fessurazione. Dopo il raggiungimento del carico di prima fessurazione, il materiale presenta ancora delle risorse di resistenza, a differenza di quanto si osserva nelle stesse prove su calcestruzzo di riferimento.



(a)



(b)

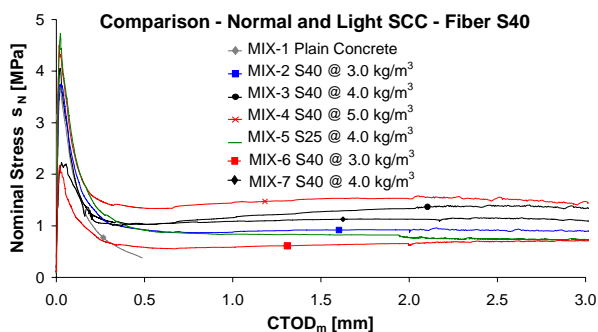
**Figura 3.** Curve sforzo nominale-apertura di fessura ricavate da prove di flessione su calcestruzzi alleggeriti (a) ed ingrandimento delle curve in corrispondenza del carico di picco (b).

Si osservi inoltre come il ramo degradante (softening) post-picco del calcestruzzo fibrorinforzato sia governato principalmente dalla fibra sintetica che conferisce tenacità al calcestruzzo. La resistenza residua si mantiene fino a grandi valori di apertura di fessura, superiori a quelli che normalmente si accettano nelle costruzioni in calcestruzzo (maggiori di 3.0 mm).

Per quanto riguarda il confronto tra SCC alleggerito ed ordinario, si può notare in Figura 4 come il primo abbia fornito valori di resistenze post-fessurazione paragonabili a quelli del SCC tradizionale, sebbene il picco di carico sia risultato inferiore (2.5 MPa contro 4 MPa).

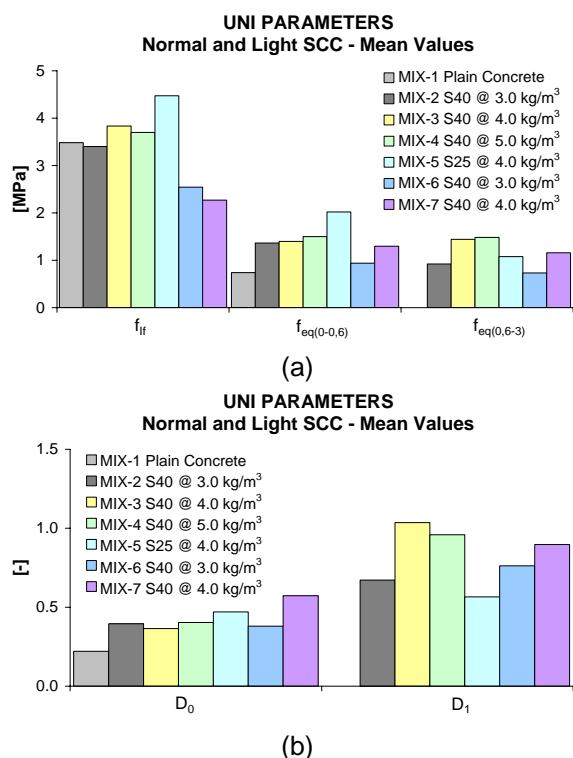
Ciò lascia intravedere le reali potenzialità del materiale alleggerito, il quale potrebbe essere utilizzato in maniera efficace nell'ambito della pre-

fabbricazione, con notevoli vantaggi dal punto di vista strutturale ed economico.



**Figura 4.** Curve medie sforzo nominale-apertura di fessura ricavate da prove di flessione su calcestruzzi autocompattanti ordinari ed alleggeriti.

In Figura 5 sono riportati i valori medi dei parametri calcolati seguendo le prescrizioni della UNI 11039 [15] in termini di resistenza di prima fessurazione ( $f_{fi}$ ), delle resistenze equivalenti ( $f_{eq(0,0,6)}$  e  $f_{eq(0,6-3)}$ ), associate rispettivamente ad aperture di fessura comprese tra 0 e 0,6 mm e tra 0,6 mm e 3,0 mm, e degli indici di duttilità  $D_0$  e  $D_1$ .



**Figura 5.** Valori medi delle resistenze equivalenti e di prima fessurazione (a) e degli indici di duttilità (b) calcolati, a partire dalle prove di flessione, secondo la UNI 11039.

Come si può osservare (Fig. 5a), la resistenza di prima fessurazione non è particolarmente influenzata dal contenuto di fibre; tale grandezza, infatti, per i contenuti di fibre utilizzati nella presente ricerca, è governata essenzialmente dalla matrice cementizia. In tal senso si osservi la differenza tra calcestruzzo alleggerito e tradizionale. Al contrario, le resistenze equivalenti tendono ad aumentare passando da un dosaggio di fibre pari a  $3 \text{ kg/m}^3$  a  $5 \text{ kg/m}^3$ .

Per quanto riguarda la variazione degli indici di duttilità (Fig. 5b) si può osservare come il valore dell'indice  $D_0$  tenda ad aumentare, anche se non in maniera significativa, con il dosaggio delle fibre, mentre il valore dell'indice  $D_1$  (rapporto tra le due resistenze equivalenti post-picco) non sia particolarmente influenzato dal contenuto fibroso.

Utilizzando tali parametri è quindi possibile quantificare l'efficacia di un calcestruzzo fibrorinforzato in termini di resistenza e di tenacità.

Sulla base dei risultati delle prove sul materiale, si è pensato di realizzare un pannello in calcestruzzo fibrorinforzato utilizzando la matrice cementizia rinforzata con  $3 \text{ kg/m}^3$  di fibre S40.

La ricerca è quindi continuata verificando la possibilità di sostituire la rete d'armatura tradizionale, normalmente posizionata sulle due facce (interna ed esterna) del pannello, con fibre sintetiche.

Al fine di valutare al meglio il contributo offerto dal rinforzo fibroso, la sperimentazione è stata effettuata anche su un pannello realizzato secondo tecnologia tradizionale.

### 3. GEOMETRIA DEI PANNELLI

Rispetto alla loro composizione stratigrafica, i pannelli di tamponamento alleggeriti sono costituiti da due lastre esterne in calcestruzzo, collegate fra loro da nervature o connessioni puntuali con interposti strati di materiale coibente a basso peso specifico, avente preminente funzione di alleggerimento ed isolamento termico.

La densità di questo interposto ( $10 \div 30 \text{ kg/m}^3$ ) e l'estensione delle nervature determinano la capacità termica del pannello nonché la sua predisposizione alla formazione di ponti termici (Fig. 6).



**Figura 6.** Composizione stratigrafica dei pannelli di tamponamento alleggeriti.

Il programma sperimentale ha riguardato due pannelli con lunghezza di 11.20 metri, larghezza 2.5 metri e spessore di 20 centimetri.

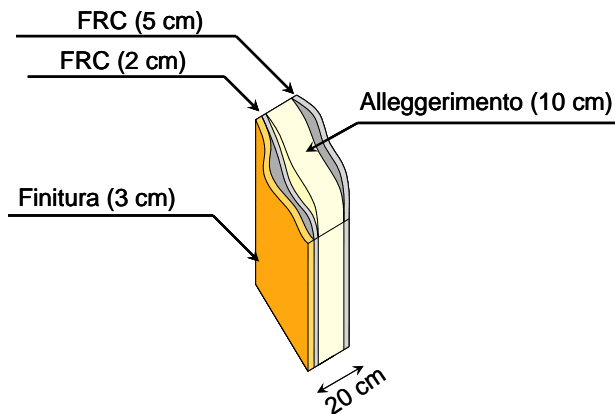
La resistenza a compressione, la tipologia di armatura ed i giorni di maturazione al momento della prova sono riassunti in Tabella 5.

Pannello	$f_{c,cube}$ [MPa]	Matur. [giorni]	Fibre		Rinforzo
			Tipo	$V_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
RC	40.4	78	F5/20/20	-	Rete
FRC	39.1	80	S40	3.0	Fibre

**Tabella 5.** Tipologia di rinforzo adottato per la realizzazione dei pannelli.

I pannelli sono costituiti da una serie di strati adiacenti; in particolare, procedendo idealmente dal lato esterno (compressivo) verso il lato interno (teso) si incontrano (Fig. 7):

- uno strato in calcestruzzo armato tradizionalmente o rinforzato con fibre sintetiche dello spessore di 5.0 cm;
- uno strato di alleggerimento in materiale coibente (polistirolo) dello spessore di 10 cm;
- un altro strato in calcestruzzo finito mediante staggiatura sempre dello spessore di 5.0 cm (3 cm di finitura più 2 cm di SCC).



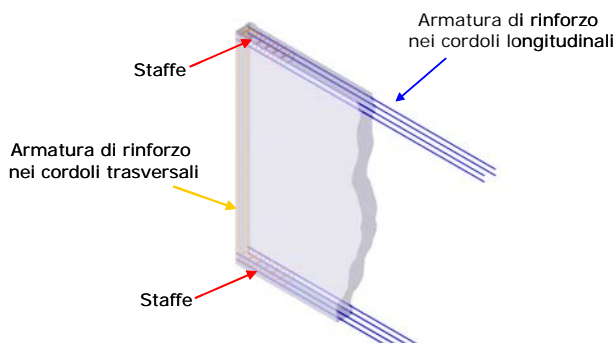
**Figura 7.** Caratteristiche geometriche della sezione trasversale dei pannelli testati.

Il pannello tradizionale (nel seguito RC) è armato con rete d'armatura (F5/20/20) posizionata nelle facce esterne e con quattro barre (F12) nei correnti.

Il pannello fibrorinforzato (nel seguito FRC) è invece rinforzato con fibre sintetiche, in sostituzione della tradizionale rete nelle facce esterne. L'armatura convenzionale è costituita, anche in questo caso, da quattro barre (F12) posizionate all'interno dei due travetti longitudinali (superiore ed inferiore), legate da staffe presenti solo in te-

stata ed in prossimità dei ganci di sollevamento (Fig. 8). I due cordoli trasversali sono stati armati con ferri (F12) ancorati nei travetti longitudinali, mentre il rinforzo in fibra sintetica presidia gli sforzi presenti negli strati interno ed esterno in calcestruzzo.

Il peso totale dei manufatti è di 7500 kg circa.



**Figura 8.** Armatura convenzionale dei travetti longitudinali e dei cordoli trasversali.

#### 4. TEST SET-UP E MODALITA' DI PROVA

Dal momento che un modello sperimentale può fornire informazioni utili per la progettazione solo quando riproduce al meglio le condizioni reali, è stato necessario mettere a punto un sistema di prova in grado di ricostruire la flessione deviata dovuta agli effetti concomitanti del vento e del peso proprio [13].



**Figura 9.** Posizionamento del pannello con asse orizzontale.

Per questo motivo si è disposto il provino come normalmente avviene in opera per un pannello ad asse orizzontale (Fig. 9), che rappresenta la tipologia staticamente più sollecitata. Il vincolo bilatero (che nella realtà è rappresentato dal pila-

stro) è stato realizzato con due profili di acciaio, i quali svolgono anche la funzione di sostegno in sicurezza del pannello nei confronti di un possibile ribaltamento. Tra il profilo compresso dal pannello ed il pannello stesso è stata interposta una striscia di neoprene con spessore di 20 mm, allo scopo di ripartire la reazione su tutto il profilo d'appoggio.

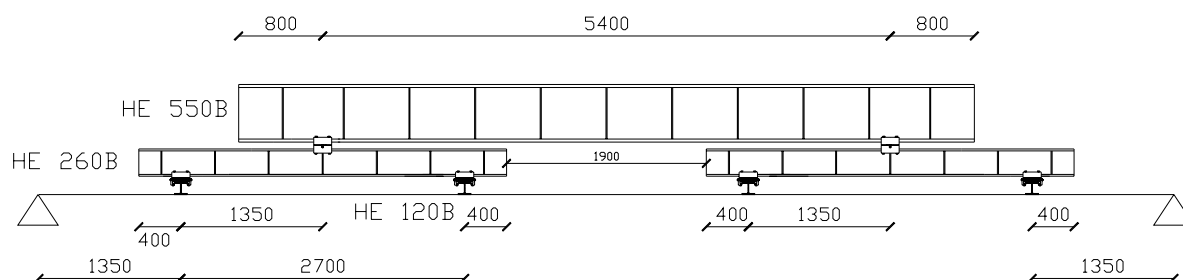
Si è reso quindi necessario risolvere il problema relativo all'applicazione di un carico orizzontale in grado di simulare efficacemente l'azione del vento o del sisma, che nella realtà generano una spinta distribuita su tutta la superficie esterna del manufatto. In generale ciò richiede l'impiego di uno o più martinetti disposti in maniera tale da consentire il trasferimento del carico lungo la luce del pannello.

Nel presente lavoro si è pensato di utilizzare un unico martinetto (Fig. 10), accoppiato ad un sistema di ripartitori in grado di scorrere in un piano orizzontale al fine di assecondare gli spostamenti del provino (Fig. 11; [13]). E' stato quindi progettato il sistema di prova mostrato in Figura 12. Allo scopo di riprodurre nel modo più veritiero possibile gli effetti delle azioni orizzontali, sulla faccia ante-

riore del pannello sono state applicate quattro strisce di carico, posizionate in modo tale che momento e taglio massimi prodotti da tale distribuzione corrispondessero alle azioni prodotte da un carico uniformemente distribuito equivalente.



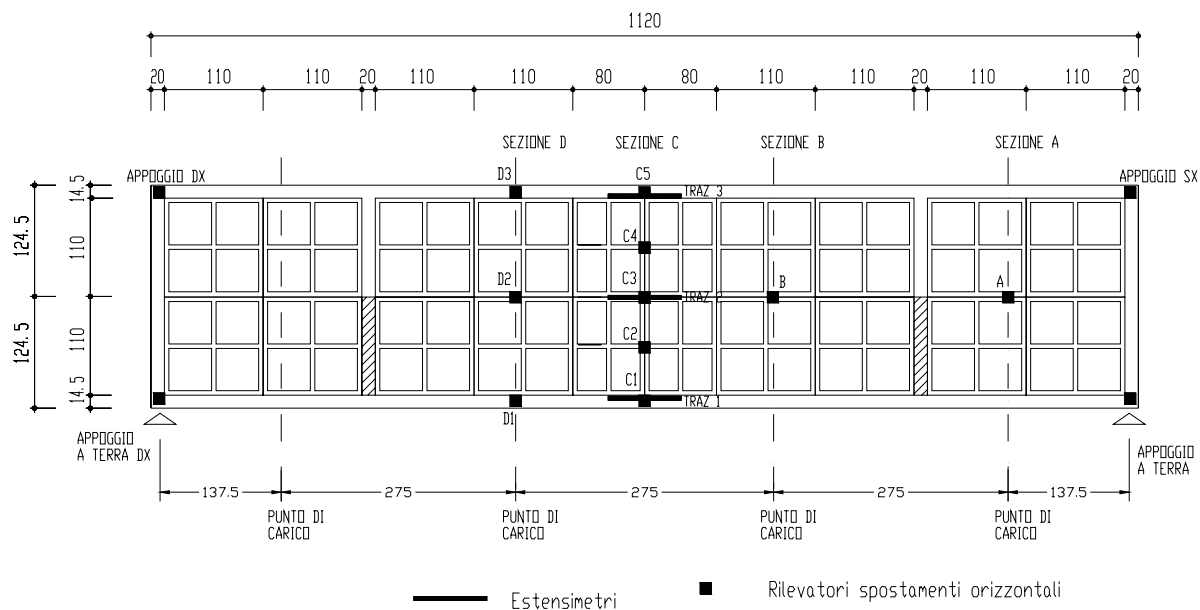
**Figura 10.** Martinetto elettromeccanico utilizzato per le prove di laboratorio.



**Figura 11.** Schema di carico della prova.



**Figura 12.** Visione globale del banco prova.



**Figura 13.** Strumentazione applicata sulla faccia tesa dei pannelli.

In realtà il carico non è stato distribuito uniformemente lungo le strisce, ma è stato applicato attraverso tre blocchi di neoprene posizionati lungo una fascia larga 30 cm a partire dai correnti longitudinali (superiore ed inferiore) per evitare rotture locali dovute a concentrazioni di sforzo non presenti nel caso reale.

Lo spostamento è stato imposto per mezzo del martinetto elettromeccanico da 1000 kN con corsa da 300 mm (Fig. 10), azionato da un motore la cui velocità è stata controllata elettronicamente.

Il carico trasmesso dal martinetto è stato rilevato tramite una cella di carico da 80 kN, interposta tra il martinetto e le travi di acciaio per il trasferimento del carico.

Durante la prova sono stati rilevati gli spostamenti orizzontali del pannello in più punti ed il cedimento agli appoggi causato dalla deformazione del neoprene.

Si sono inoltre monitorate le deformazioni legate alle compressioni ed alle trazioni (o le aperture di fessure) sulle due facce dei pannelli, come mostrato in Figura 13.

In particolare si è pensato a quattro sezioni di misura coincidenti con tre dei quattro punti di applicazione del carico, oltre alla mezzeria del pannello. Gli spostamenti sono stati rilevati per mezzo di trasduttori di spostamento induttivi e con trasduttori potenziometrici aventi corsa di 250 mm.

Maggiori informazioni sul banco e sulle modalità di prova sono riportate in [13, 14].

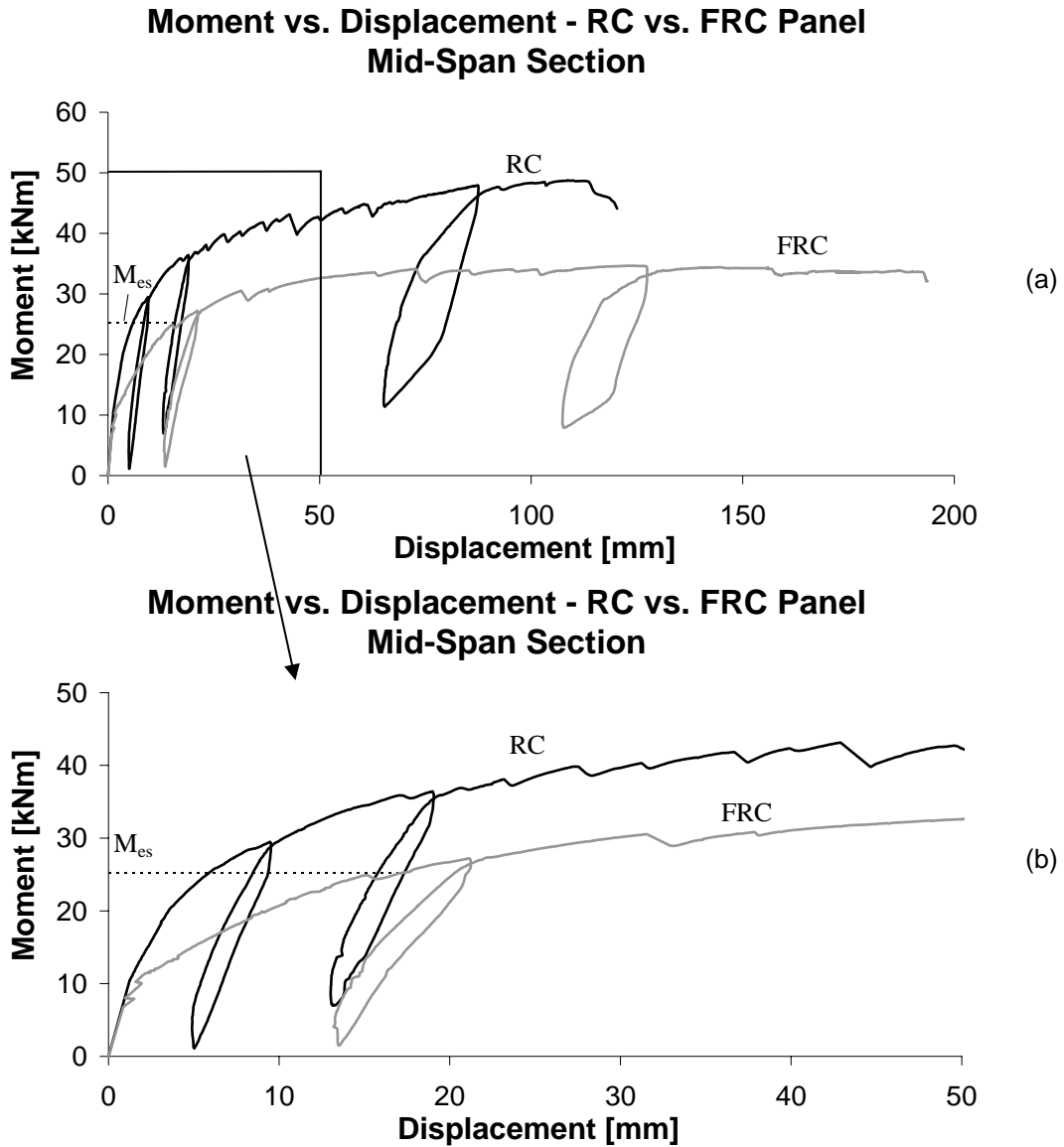
## 5. RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

Il carico ultimo è stato raggiunto sottoponendo i pannelli a cicli di carico e scarico successivi, in modo tale da raggiungere livelli di sollecitazione progressivamente crescenti, al fine di verificare le deformazioni residue. In particolare, i livelli di carico raggiunti al termine di ciascuna fase sono stati fissati in corrispondenza al raggiungimento di azioni flessionali nella mezzeria del pannello, pari a multipli del momento di esercizio ( $M_{es}$ ). Le prove sperimentali sono poi continuate caricando i pannelli fino a rottura.

Il momento di esercizio dovuto al vento è stato calcolato ipotizzando i pannelli come tamponamenti esterni di un edificio sito in zona I, categoria IV e con altezza pari a 8 metri [16] ed è risultato pari a 25.3 kNm.

I risultati sperimentali più significativi riguardano il momento massimo agente sui pannelli in funzione dello spostamento di mezzeria (C3 in Fig. 13, depurato del cedimento del neoprene agli appoggi) ed il quadro fessurativo a fine prova.

In Figura 14 è mostrato l'andamento del momento in funzione dello spostamento rilevato nella sezione di mezzeria dei due pannelli sottoposti a prova. Si può notare la minor resistenza del pannello in calcestruzzo rinforzato con  $3 \text{ kg/m}^3$  di fibre, che è però caratterizzato da una notevole duttilità.



**Figura 14.** Confronto tra i diagrammi sperimentali del momento in funzione della freccia in mezzeria (a) e particolare del comportamento in esercizio (b).



Pannello RC



Pannello FRC

**Figura 15.** Quadro fessurativo a fine prova dei pannelli testati.



Si può osservare come i manufatti manifestino un comportamento elastico-lineare fino al raggiungimento di una sollecitazione pari alla metà del momento di esercizio (I stadio). In seguito alla formazione della prima fessura, manifestatasi una volta superata la soglia dei 12 kNm, il comportamento continua ad essere praticamente lineare, anche se si assiste ad un notevole abbattimento della rigidità del provino (II stadio). La prova è continuata fino all'applicazione di un momento ultimo pari a circa 50 kNm (III stadio).

Va sottolineato che i pannelli presentavano, già prima dell'inizio della prova, alcune fessure dovute a fenomeni di ritiro e come, con il procedere della fase di carico, si sia assistito alla formazione di ulteriori fessure che sono andate poi concentrandosi nella zona centrale dell'elemento, soggetta al massimo momento flettente.

È oltremodo possibile notare che, per la tipologia fibrorinforzata, l'uscita dal primo stadio è avvenuta in corrispondenza di un momento flettente inferiore rispetto a quello che ha sancito la medesima transizione per il pannello tradizionale (Fig. 14b).

I risultati sperimentali fanno supporre che la causa della minor rigidità post-fessurazione del pannello FRC si possa imputare alla scarsa collaborazione della soletta tesa. Per quanto riguarda lo strato di finitura, si può anche pensare che esso non collabori interamente alla risposta strutturale del pannello.

L'adozione di un rinforzo fibroso ha permesso, nel pannello FRC, di limitare l'apertura di fessura a livelli inferiori rispetto a quelli rilevati sperimentalmente nel pannello tradizionale.

In Figura 15 è infine mostrato il quadro fessurativo relativo ai due pannelli testati, a collasso avvenuto. È interessante notare come nel pannello RC, con armatura tradizionale, si formi una fessura principale, la cui ampiezza è rilevante già al momento della sua comparsa. Nel pannello FRC, invece, la fessurazione è più diffusa e, di conseguenza, l'ampiezza massima delle fessure si riduce.

## 6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente lavoro si è inizialmente studiato il comportamento a frattura di calcestruzzi auto-compattanti rinforzati con fibre sintetiche. L'attività sperimentale ha avuto come oggetto prove di frattura su campioni di trave intagliati.

I risultati sperimentali hanno dimostrato il buon comportamento delle fibre sintetiche per quanto riguarda l'incremento di tenacità del com-

posito. Particolare rilievo merita il comportamento del SCC alleggerito e fibrorinforzato nel quale le fibre eliminano la tradizionale fragilità e garantiscono una buona resistenza residua.

La ricerca è poi proseguita con uno studio sperimentale su pannelli di tamponamento prefabbricati in scala reale.

Lo studio intende mettere a confronto il comportamento di pannelli con armatura tradizionale (doppia rete elettrosaldada ed armature longitudinali nei correnti) con pannelli simili, dove la rete è sostituita da fibre sintetiche.

La sperimentazione ha messo in evidenza i seguenti risultati:

- il pannello in calcestruzzo fibrorinforzato ha mostrato un comportamento simile a quello del pannello armato con la tradizionale rete elettrosaldada, anche se la rigidità flessionale in fase fessurata è risultata inferiore. Tale pannello ha però ampi margini di miglioramento legati sia ad eventuali incrementi del dosaggio di fibre sia a variazioni dell'armatura corrente;
- le fibre sono particolarmente utili nel controllo della fessurazione in quanto riducono l'ampiezza delle fessure, contribuendo ad incrementare la durabilità dell'opera.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] **ACI SP 182**, "Structural Applications of Fiber Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, 1988.
- [2] **M. DI PRISCO, G. TONIOLO Eds.**, "Structural applications of steel fibre reinforced concrete", Proc. of the international workshop. Milano, 4 Aprile 2000, CTE publ., 126 pp.
- [3] **M. DI PRISCO, R. FELICETTI, G.A. PLIZZARI Eds**, "BEFIB 2004", "Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (FRC), RILEM PRO 39, 2004, 1514 pp.
- [4] **A. AHMAD, M. DI PRISCO, C. MEYER, G.A. PLIZZARI, S.P. SHAH Eds**, "Fiber Reinforced Concrete: From theory to practice", Proceedings of the International Workshop, Bergamo, 24-25 Settembre 2004, Starrylink, 222 pp.
- [5] **L. COMINOLI, A. MEDA, G.A. PLIZZARI**, "Hybrid fibers to enhance fracture properties of concrete pavements", Third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Struc-

- tural Implications, Banthia, N., Uomoto, T., Bentur, A. e Shah, S.P. Eds., Abstract a pag. 69, Full paper su CD Rom (ISBN 0-88865-810-9), 22-24 August 2005, Vancouver, Canada.
- [6] **V.C. LI**, "From Micromechanics to Structural Engineering - the Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", JSCE Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 10(2), 1993, 37-48.
- [7] **A. MEDA, G.A. PLIZZARI, P. RIVA**, "Fracture behavior of SFRC slabs on grade", Materials and Structures, Vol. 37(270), 2004, pp. 405-411.
- [8] **B. SCHNÜTGEN**, "Design of Precast Steel Fibre Reinforced Tunnel Elements", in "Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete - Background and Experiences", Proc. of the RILEM TC 162-TDF Workshop, Bochum (Germany), 20-21 Marzo 2003, pp. 145-152.
- [9] **G.A. PLIZZARI, L. COMINOLI**, "Numerical Simulations of SFRC Precast Tunnel Segments", in Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES 2005, Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future, Y. Erdem and T. Solak Eds., Istanbul (Turchia), 7-12 Maggio 2005, pp. 1105-1111.
- [10] **G.A. PLIZZARI, G. TIBERTI**, "Steel Fibers as Reinforcement for Precast Tunnel Segments", in the World Tunnel Congress ITA-AITES 2006, Seoul (S. Corea), April 22-27.
- [11] **L. COMINOLI, G.A. PLIZZARI**, "SFRC precast slabs", Proceedings of The Second Fib Congress, Naples, Italy, 5-8 June, 2006, abstract on page 460-461, full length paper available on accompanied CD.
- [12] **M. DI PRISCO, C. FAILLA, G.A. PLIZZARI**, "Applicazioni industriali della tecnologia SFRC per la realizzazione di strutture prefabricate", Atti del 15° Congresso CTE, Bari, 4-6 Novembre 2004, pp. 405-414.
- [13] **L. COMINOLI, C. FAILLA, M. MANZONI, G.A. PLIZZARI, P. RIVA**, "Experimental study on SFRC precast panels", in BEFIB 2004, di Prisco, M., Felicetti, R. e Plizzari, G.A. Eds., Proceedings of the Sixth RILEM symposium on fibre reinforced concrete (FRC), Varenna (LC), 20-22 Settembre 2004, RILEM PRO 39, pp. 1133 - 1142.
- [14] **L. COMINOLI, C. FAILLA, M. MANZONI, G.A. PLIZZARI, P. RIVA**, "Precast panels in Steel Fibre Reinforced Concrete", Proceedings of The Second Fib Congress, Naples, Italy, 5-8 June 2006, abstract on page 448-449, full length paper available on accompanied CD.
- [15] **UNI 11039**, "Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio parte I: Definizioni, classificazione e designazione parte II: Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità", 2003.
- [16] **D.M. 14.9.2005**, "Norme tecniche per le costruzioni", G.U. n. 222 del 23-9-005.

## RINGRAZIAMENTI

La presente ricerca è stata finanziata dalla Chryso Italia S.p.a. di Lallio (BG).

Gli Autori desiderano ringraziare la società Mozzo Prefabbricati S.r.l. di Zevio (VR) ed i Sigg. Martinelli e Del Barba del Laboratorio Pietro Pisa dell'Università degli Studi di Brescia, per la collaborazione nello svolgimento delle prove sperimentali.

Un ringraziamento particolare è infine dovuto a Valerio Belloni per la preziosa collaborazione durante la fase sperimentale e per la successiva elaborazione dei risultati.

### Contatti con gli autori:

Luca Cominoli: [luca.cominoli@unibg.it](mailto:luca.cominoli@unibg.it)

Giovanni Plizzari: [plizzari@ing.unibs.it](mailto:plizzari@ing.unibs.it)

Pietro Massinari: [p.massinari@chrysoitalia.com](mailto:p.massinari@chrysoitalia.com)