

FIBRE IBRIDE PER APPLICAZIONI STRUTTURALI DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

L. Cominoli^a, C. Failla^b, G.A. Plizzari^c

^a*Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Università degli Studi di Bergamo, viale Marconi, 5-24044 Dalmine (BG), e-mail: luca.cominoli@unibg.it*

^b*Magnetti Building, via Don Pedrinelli, 118-24030 Carvico (BG), e-mail: c.failla@magnetti.it*

^c*Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente, Università degli Studi di Brescia, via Branze, 43-25123 Brescia (BS), e-mail: plizzari@ing.unibs.it*

SOMMARIO

L'idea di combinare fibre con diversa geometria e/o materiale ha portato, negli ultimi anni, allo sviluppo di una nuova categoria di materiali, i calcestruzzi rinforzati con fibre ibride (*HyFRC*). Nel presente lavoro vengono presentati i risultati di una estesa campagna sperimentale volta a determinare i benefici, in termini di tenacità e di fessurazione legata a fenomeni di ritiro, di calcestruzzi rinforzati con micro-fibre di polipropilene e macro-fibre di acciaio o sintetiche. La tenacità del calcestruzzo è stata valutata con prove di flessione su provini di trave, opportunamente intagliate, in accordo con la normativa UNI 11039. Per verificare il comportamento al ritiro è stato messo a punto un sistema di prova che intende simulare il comportamento di elementi di spessore sottile. A partire dalla caratterizzazione del materiale, sono state condotte simulazioni numeriche basate sulla meccanica della frattura non lineare (*NLFM*) al fine di identificare il contributo delle fibre nella propagazione della frattura. I risultati sperimentali mostrano l'efficacia derivante dall'utilizzo di un rinforzo ibrido, in cui le macro-fibre migliorano la tenacità e le micro-fibre di polipropilene riducono la fessurazione dovuta al ritiro plastico.

ABSTRACT

Based on the idea of taking simultaneous advantage of the effects of different types of fibers, new materials called Hybrid Fiber Reinforced Concretes (*HyFRC*) have been developed by combining fibers of different geometry and material. In the present paper, the benefits in terms of concrete toughness and shrinkage cracking from a combination of micro polypropylene fibers and macro steel fibers are presented. Concrete toughness was evaluated by means of bending tests on notched beams (according to Italian Standard UNI 11039) while an experimental set-up was developed for performing shrinkage tests to simulate the behavior of thin elements where cracking may occur. A numerical simulation based on non linear fracture mechanics (*NLFM*) of the experimental test was carried out in order to better identify the fiber contribution in the fracture propagation. The experimental results illustrate the effectiveness of a hybrid system where macro-fibers enhance the concrete toughness while polypropylene micro-fibers reduce shrinkage cracks.

1. INTRODUZIONE

I materiali a base cementizia sono caratterizzati da un comportamento piuttosto fragile e da una limitata resistenza a trazione. L'introduzione di un rinforzo fibroso diffuso all'interno della matrice, permette di limitare la fragilità, dando origine a compositi caratterizzati da una maggiore resistenza, una maggiore durabilità ma soprattutto da una maggior tenacità. Nasce proprio da questa idea il calcestruzzo fibrorinforzato (*FRC, Fibre Reinforced Concrete*).

L'introduzione di fibre in una matrice cementizia risale a circa un secolo fa, quando si immettevano nel getto fibre di amianto [1]. L'elevata nocività di quest'ultimo e la sua conseguente esclusione dal mercato ha spinto la ricerca verso altre tipologie di fibre, in acciaio o sintetiche. I calcestruzzi rinforzati con fibre d'acciaio (*SFRC, Steel Fibre Reinforced Concrete*) sono impiegati da tempo in applicazioni strutturali come pavimentazioni industriali [2] o rivestimento di gallerie (calcestruzzo proiettato) [3]. Negli ultimi anni l'interesse per questi materiali si è notevolmente amplificato, coinvolgendo anche il settore della prefabbricazione. In questo contesto, il rinforzo con fibre ha riguardato la realizzazione di tubi, di piastre di chiusura di tombinature e, attualmente, di pannelli di rivestimento [4]. Recentemente sono arrivate sul mercato nuove fibre sintetiche con funzione strutturale allo scopo di limitare la corrosione e di favorire la lavorabilità e la pompabilità del calcestruzzo fibrorinforzato.

L'esigenza di migliorare contemporaneamente diverse prestazioni del calcestruzzo ha spinto la ricerca degli ultimi anni a concentrarsi sullo studio degli effetti derivanti dall'uso combinato di fibre, differenti in dimensioni, materiali e caratteristiche meccaniche, in un calcestruzzo ordinario [5,6]. L'attenzione è stata quindi rivolta ad una classe di compositi cementizi rinforzati con fibre "ibride" (*HyFRC, Hybrid Fibre Reinforced Concrete*). L'idea innovativa dell'HyFRC è proprio quella di combinare fibre di diverso materiale e/o dimensione, allo scopo di produrre un composito le cui proprietà fisiche e meccaniche ottengano dei benefici sia dalla singola tipologia di fibra che da un'eventuale loro sinergia: la tenacità può ad esempio essere fornita dalle fibre di acciaio mentre il controllo delle fessure da ritiro dalle fibre sintetiche e così via [7].

L'idea di utilizzare fibre differenti contemporaneamente nella stessa matrice cementizia è riportata schematicamente in Fig. 1: nel momento in cui le micro-fessure si localizzano in macro-fessure, le fibre più lunghe (macro-fibre) divengono sempre più efficaci nel fornire tenacità (Fig. 1b), mentre le micro-fibre perdono la loro efficacia dal momento che tendono a sfilarsi dalla matrice. Se si considera il fatto che la formazione delle micro-fessure avviene nella fase di raggiungimento del massimo sforzo di trazione nella matrice, si capisce come le micro-fibre possano avere un'influenza abbastanza significativa nel miglioramento del comportamento a trazione (Fig. 1a).

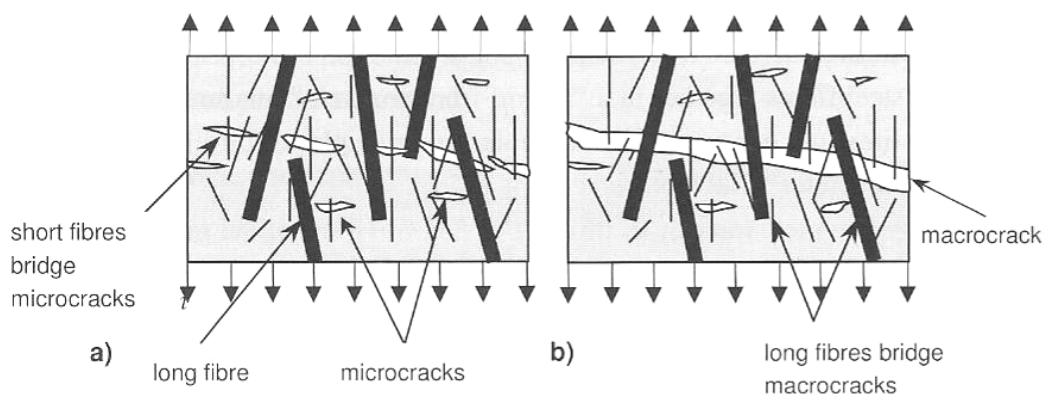


Fig. 1 – Influenza delle micro-fibre (a) e delle macro-fibre (b) in un calcestruzzo con fibre ibride.

L'unico modo per verificare l'efficacia delle fibre nel composito è quello di misurarne sperimentalmente le prestazioni, in quanto le caratteristiche meccaniche delle sole fibre non sono sufficienti per prevedere il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato che è anche molto influenzato dalla composizione della matrice (e non solo dal rapporto acqua/cemento).

2. MATERIALI E ATTREZZATURA DI PROVA

Le prove sperimentali sono state condotte su provini confezionati con un'unica matrice di calcestruzzo (Tab. 1) di normale resistenza (C30/37). I calcestruzzi sono stati rinforzati con macro-fibre di acciaio o plastiche aventi funzioni strutturali, e con micro-fibre sintetiche per il controllo della fessurazione da ritiro. Una volta prodotti i campioni sono stati stoccati in camera igrometrica, garantendo così una maturazione ottimale.

Le proprietà geometriche e meccaniche delle fibre utilizzate nel lavoro sono mostrate in Tab. 2a ed in Tab. 2b, mentre le combinazioni adottate per le fibre e la resistenza a compressione, misurata a 28 giorni di maturazione su cubi con lato di 100 mm, sono riportate in Tab. 3.

Tab. 1 – Composizione del calcestruzzo.

Cemento Portland 42.5R [kg/m ³]	340
Acqua [l/m ³]	190
Superfluidificante acrilico [l/m ³]	6
Aggregato naturale [kg/m ³]	1450
Aggregato frantumato [kg/m ³]	420
Filler calcareo [kg/m ³]	40
Rapporto acqua/cemento [-]	0,56

Tab. 2a – Proprietà geometriche e meccaniche delle fibre d'acciaio utilizzate nella ricerca.

Fibra	Steel-1	Steel-2	Steel-3	Steel-4	Steel-5
Geometria	uncinata	uncinata	uncinata	uncinata	uncinata
Lunghezza (L_f)	50 mm	40 mm	40 mm	37 mm	40 mm
Diametro (ϕ_f)	1,0 mm	0,6 mm	0,62 mm	0,6 mm	0,6 mm
Rapporto d'aspetto (L_f/ϕ_f)	50	67	65	62	67
Resistenza trazione	1050 MPa	1300 MPa	1250 MPa	1250 MPa	1200 MPa

Tab. 2b – Proprietà geometriche e meccaniche delle fibre di polipropilene adottate nella ricerca.

Fibra	Poly-1	Poly-2	Poly-3	Poly-4
Lunghezza (L_f)	40 mm	35 mm	20 mm	54 mm
Diametro equivalente (ϕ_f)	0,44 mm	0,2÷0,25 mm	0,18÷0,22 mm	0,069 mm
Rapporto d'aspetto (L_f/ϕ_f)	90	150	100	782
Resistenza trazione	620 MPa	600÷750 MPa	600÷750 MPa	600÷758 MPa
Massa volumica	920 kg/m ³	910÷950 kg/m ³	910÷950 kg/m ³	910 kg/m ³

Tab. 3 – Composizione dei differenti mix-design impiegati.

Materiale	Fibre acciaio [%] _{vol.}					Fibre polipropilene [%] _{vol.}				Resistenza compressione
	Steel-1	Steel-2	Steel-3	Steel-4	Steel-5	Poly-1	Poly-2	Poly-3	Poly-4	$f_{c,cube}$ [MPa]
SFRC	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	-	-	-	-	43,6
PFRC-A	-	-	-	-	-	0,44	0,44	0,44	0,44	40,9
PFRC-B	-	-	-	-	-	0,88	0,88	-	0,88	35,2
HyFRC	0,38	-	-	-	-	-	-	0,11	-	48,9

La sperimentazione ha riguardato prove di flessione su provini prismatici intagliati con dimensioni di 150x150x600 mm (Fig. 3), come previsto dalla normativa UNI 11039 [8]. In aggiunta si è sperimentato un primo tentativo di prova per la valutazione del ritiro igrometrico, avente lo scopo di determinare l'evoluzione della fessura in sezioni opportunamente indebolite di piastre con spessore pari a 20 mm (Fig. 4).

Le prove di flessione sono state eseguite mediante una macchina elettromeccanica (INSTRON 5587), 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 Fig. 3b. Si è anche cercato di sviluppare un metodo di prova in grado di fornire indicazioni qualitative sulla capacità delle varie miscele fibrorinforzate utilizzate di contrastare la fessurazione dovuta al ritiro igrometrico. Il sistema di prova è piuttosto semplice e consiste nel rilevare l'apertura di fessura, mediante l'utilizzo di due flessimetri disposti alle estremità di una sezione indebolita di un provino di piccolo spessore (20 mm; Fig. 4). La geometria dei provini è il frutto di studi preliminari aventi lo scopo di definire un campione in grado di localizzare una singola fessura in una posizione nota, in modo da

poterla rilevare e quindi misurarne l'ampiezza. Ciò ha portato alla realizzazione di un foro, in un provino di piastra sottile, per non consentire al calcestruzzo di accorciarsi liberamente, ma di vincolarlo nella sezione desiderata. Per aumentare questo effetto si è inoltre provveduto ad indebolire la sezione centrale portandola da una larghezza di 100 mm a 20 mm (Fig. 4b).

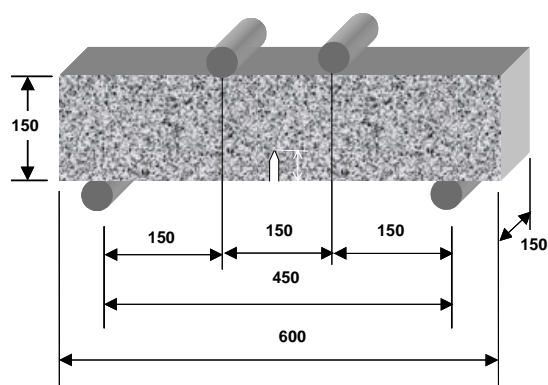


Fig. 3 – Geometria (a) e strumentazione (b) dei provini di trave intagliati secondo UNI 11039.

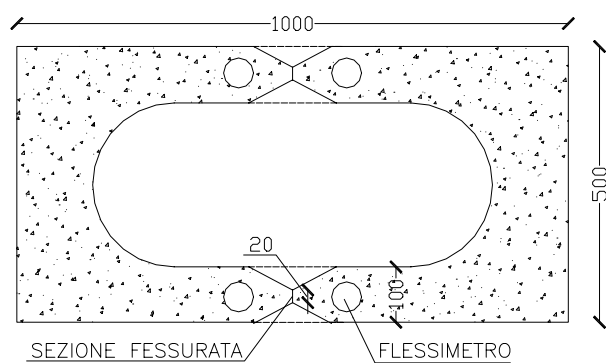


Fig. 4 – Geometria delle piastre (a) e particolare della fessurazione dovuta a ritiro (b).

3. RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 Prove di flessione

I risultati sperimentali relativi alle prove di flessione sono riportati in Fig. 5, in termini di curve medie sforzo nominale-apertura di fessura (σ -CTOD). Si può osservare come l'utilizzo di fibre diverse non modifichi significativamente il carico di picco, ma influisca in modo considerevole sull'andamento post-picco delle curve. In particolare l'introduzione di fibre di acciaio o di fibre ibride nella matrice cementizia migliora significativamente la tenacità del materiale mentre le macro-fibre di polipropilene presentano un'efficacia nettamente inferiore, a parità di percentuale volumetrica ($V_f=0,44\%$).

In Fig. 6 sono riportati i parametri calcolati in accordo con la UNI 11039 [8] in termini di resistenza di prima fessurazione (f_{f1}) e 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 mm.

Poiché gli effetti delle fibre si manifestano dopo la fessurazione della matrice, l'utilizzo di un rinforzo fibroso non modifica la resistenza di prima fessurazione ma influenza soprattutto la resistenza post-fessurazione che viene notevolmente incrementata; il contributo di ogni singola fibra alla tenacità del composito si manifesta fino alla rottura o allo sfilamento della fibra stessa. Per questo motivo, nel momento in cui le micro-fessure si localizzano in macro-fessure, le fibre più lunghe (macro-fibre) divengono sempre più efficaci nel controllo della fessurazione mentre le micro-fibre perdono rapidamente l'efficacia che tende a manifestarsi per piccole aperture di fessura.

L'utilizzo di compositi ibridi contribuisce quindi ad un aumento della resistenza residua sia per le micro-fessure che per le macro-fessure. L'impiego di micro-fibre di polipropilene (anche in dosaggi differenti) porta però ad un limitato aumento della tenacità e, di conseguenza, non apporta grandi

miglioramenti in tal senso; se però queste fibre vengono utilizzate in unione alle fibre d'acciaio si nota un incremento del ramo di *softening* per piccole aperture in prossimità del picco di carico (Fig. 5).

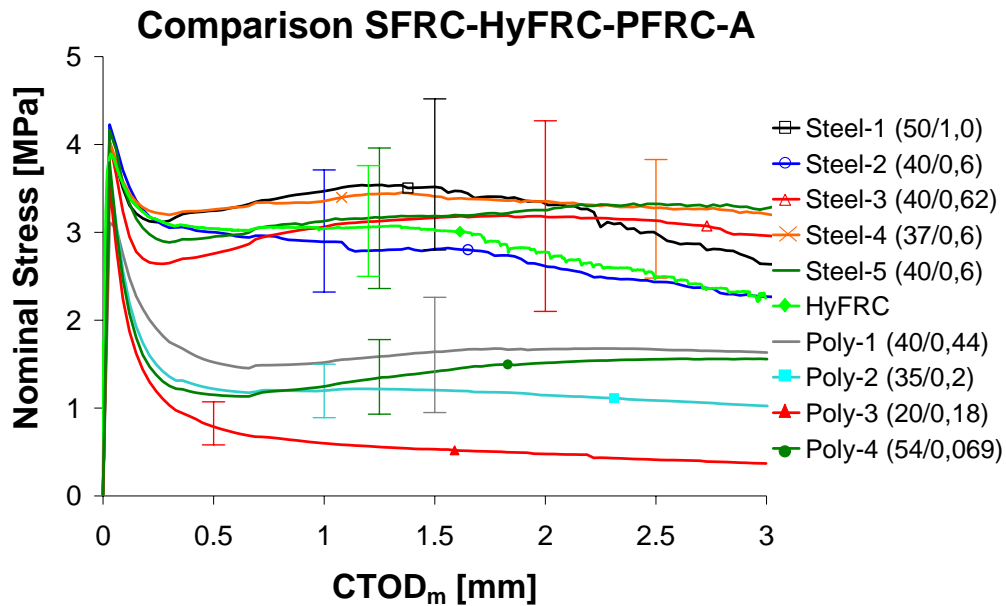


Fig. 5 – Curve sforzo nominale-apertura di fessura (valori medi) ricavate dalle prove di flessione con indicata la dispersione dei risultati sperimentali.

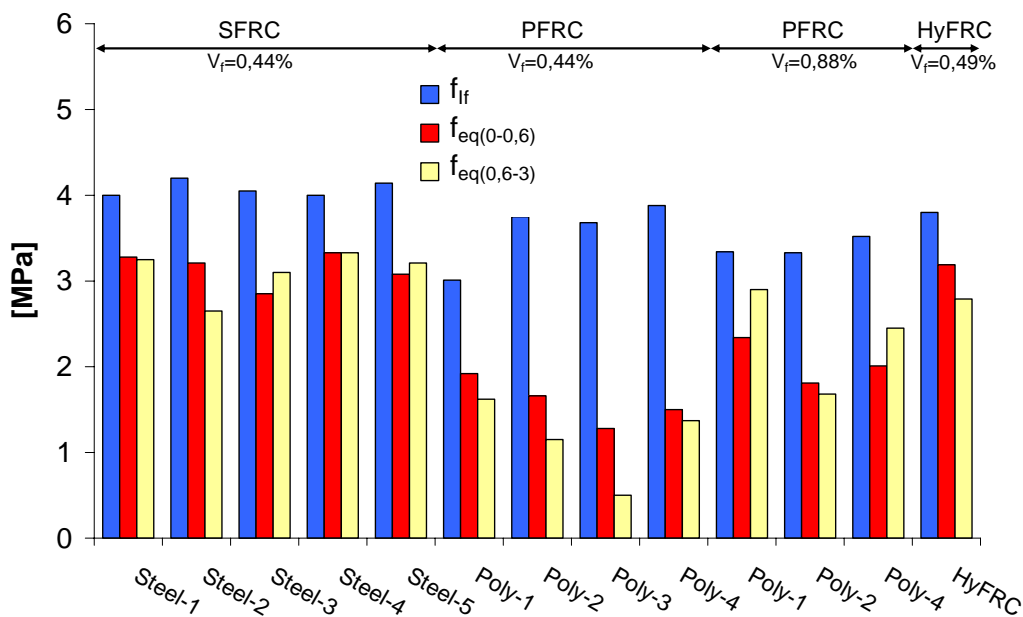


Fig. 6 – Valori medi dei parametri di normativa UNI 11039 ricavati dalle diverse miscele testate.

3.2 Prove di ritiro

E' generalmente riconosciuto il beneficio apportato dalle micro-fibre sintetiche alla riduzione della fessurazione da ritiro del calcestruzzo. Quello che non è ancora molto noto è come quantificare questo beneficio per confrontare le prestazioni di fibre differenti o il dosaggio ottimale di fibre da impiegare. Poiché il ritiro è un fenomeno particolarmente influenzato dalla struttura, la geometria del provino assume un ruolo determinante. Una prova standard dovrebbe quindi riprodurre al meglio delle situazioni strutturali tipiche in modo da poterne quantificare i benefici. I miglioramenti apportati dalle fibre alla matrice potrebbero essere misurati attraverso il tempo di innesco della fessurazione (di difficile individuazione in quanto dipende dalla "lente di ingrandimento" utilizzata per osservare il provino) e dallo sviluppo dell'ampiezza di fessura. La prova di ritiro adottata nel presente lavoro intende riprodurre la condizione particolarmente gravosa di una lastra di piccolo spessore con una superficie esposta all'aria.

Non avendo alcun riferimento normativo in materia ed essendo questa prova in fase di studio, i risultati ottenuti sono da considerarsi indicativi, anche se hanno fornito informazioni utili.

La sperimentazione ha avuto come oggetto due piastre per ciascuna miscela utilizzata e per ogni piastra sono state effettuate due diverse letture. Le lastre sono state sottoposte ad una ventilazione forzata (con le stesse modalità per tutti i provini), in laboratorio, subito dopo l'esecuzione del getto. In Fig. 7 è riportata la media delle due letture per tutte le combinazioni analizzate dopo 20 ore dal getto. Si può notare come tutte le fibre sintetiche abbiano fornito valori di apertura tendenzialmente più bassi del calcestruzzo non fibrorinforzato e del SFRC (tranne la fibra poly-3, caratterizzata da un valore notevolmente più elevato di apertura di fessura); ha invece mostrato ottimo comportamento a ritiro la miscela di fibre ibride.

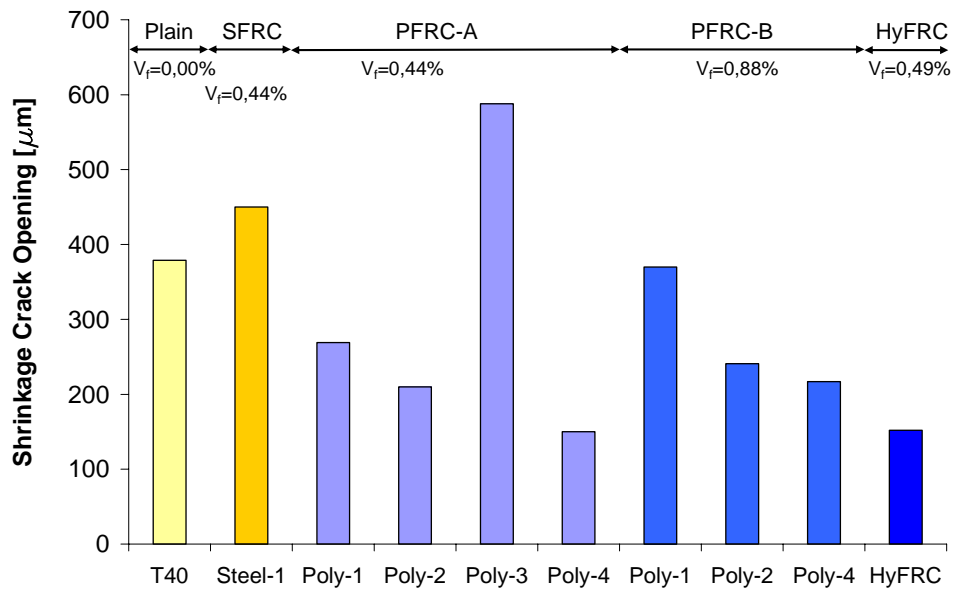


Fig. 7 – Apertura di fessura rilevata sperimentalmente da prove di ritiro.

4. SIMULAZIONI NUMERICHE

Le prove a flessione sono state simulate con analisi numeriche ad elementi finiti basate sulla meccanica della frattura non lineare (NLFM; [12]). Le elaborazioni sono state eseguite con il codice di calcolo Merlin [9], considerando una fessura discreta, in modo tale che tutto il processo fessurativo si sviluppi lungo la linea di frattura, la cui posizione deve essere prevista nel modello prima dell'analisi. Obiettivo principale delle analisi numeriche è stato la definizione di un legame tra lo sforzo e l'apertura di fessura, in grado di ben approssimare il comportamento post-fessurativo dei materiali studiati. Il legame costitutivo che descrive il comportamento a trazione del calcestruzzo è dato dall'unione di due fasi distinte: uno stadio pre-picco, nel quale la matrice di calcestruzzo non è ancora fessurata ed ha un comportamento elastico-lineare, ed uno post-picco, proprio della matrice fessurata, in cui l'energia è dissipata attraverso l'ingranamento degli aggregati (inizialmente) e dallo sfilamento delle fibre (successivamente). Il legame tra lo sforzo e l'apertura di fessura ($\sigma-w$) è stato approssimato con una polilinea (Fig. 8).

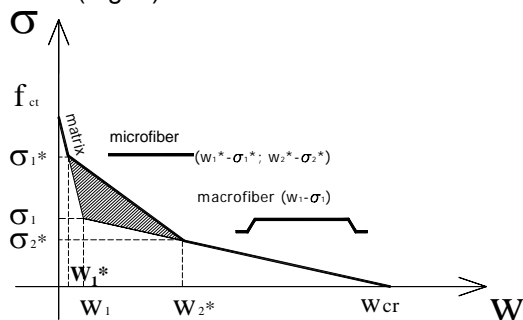


Fig. 8 - Relazione polilineare in termini di sforzo-apertura di fessura.

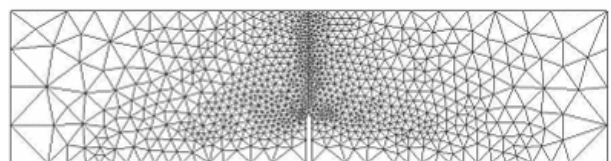


Fig. 9 - Mesh adottata per la discretizzazione dei provini di trave sottoposti a prova di flessione.

Il comportamento di calcestruzzi rinforzati con un'unica tipologia di fibra può essere descritto da una legge bilineare [10], caratterizzata da un primo ramo molto pendente che governa il comportamento del calcestruzzo nella fase in cui le microfessure non hanno ancora determinato l'insorgere di una macrofessura e da un secondo ramo, meno pendente, dovuto all'effetto di "cucitura" delle fessure esercitato dalle fibre [10]. Quando vengono utilizzate più tipologie di fibre, invece, è preferibile l'utilizzo un legame polilineare in quanto le diverse fibre si possono attivare in corrispondenza di diversi livelli di apertura di fessura [11].

Nel presente lavoro, si sono utilizzate leggi bilineari (per PFRC e SFRC) e trilineari (per HyFRC) poiché le fibre in polipropilene tendono ad attivarsi prima delle fibre in acciaio (Fig. 8).

I provini sperimentali sono stati modellati con 2348 elementi triangolari a comportamento elastico (stato di sforzo piano) e con 34 elementi interfaccia (con spessore nullo) nella sezione di frattura (la cui posizione è nota a priori in corrispondenza dell'intaglio) per simulare una fessura discreta [12] (Fig. 9). Gli elementi interfaccia collegano rigidamente gli elementi elastici fino al raggiungimento della massima resistenza a trazione; successivamente trasmettono uno sforzo che è funzione dell'apertura di fessura.

Tab. 4 – Parametri che caratterizzano le leggi bi- e tri-lineari adottate nelle simulazioni numeriche.

		f_{ct} [MPa]	σ_1^* [MPa]	w_1^* [mm]	σ_2^* [MPa]	w_2^* [mm]	w_{cr} [mm]
SFRC	Steel-1	3,09	1,100	0,022	-	-	7,20
	Steel-2	3,09	1,186	0,021	-	-	4,16
	Steel-3	3,09	0,927	0,024	-	-	4,56
	Steel-4	3,09	1,100	0,022	-	-	6,30
	Steel5	3,09	1,100	0,022	-	-	5,39
PFRC-A	Poly-1	3,09	1,186	0,021	-	-	0,28
	Poly-2	3,09	0,668	0,027	-	-	1,08
	Poly-3	3,09	1,186	0,021	-	-	0,20
	Poly4	3,09	0,841	0,025	-	-	0,74
PFRC-B	Poly-1	3,09	0,668	0,027	-	-	3,17
	Poly-2	3,09	0,755	0,026	-	-	0,69
	Poly-4	3,09	0,668	0,027	-	-	3,47
HyFRC	HyFRC	3,09	1,186	0,021	1,057	0,300	7,20

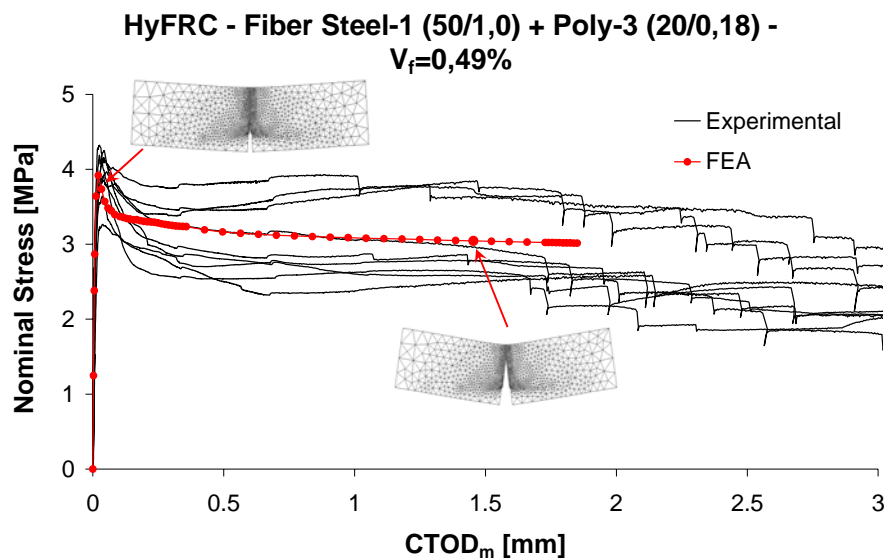


Fig. 10 – Confronto tra andamento sperimentale e numerico per calcestruzzi HyFRC.

Il modulo elastico adottato nelle simulazioni numeriche (pari a 33350 MPa) è stato determinato a partire dalle formulazioni dell'Eurocodice 2, così come la resistenza a trazione (assunta pari a 3.09 MPa). I parametri della legge σ - w sono invece stati determinati con analisi inverse in modo da ottenere il miglior "fitting" dei risultati sperimentali. Il confronto tra curve sperimentali e numeriche è mostrato in Fig.10, mentre il valore dei parametri delle leggi σ - w adottate per i diversi materiali è riportato in Tab. 4. Si può osservare come il primo ramo della legge bilineare o trilineare sia lo stesso

per tutti i materiali testati in quanto dipende prevalentemente dalla matrice (che è la stessa per tutti i provini) e come le leggi polilineari forniscano un buon accordo con i risultati sperimentali.

5. DAL MATERIALE ALLA STRUTTURA

La risposta di una struttura è sicuramente influenzata dal comportamento del materiale ma anche dalla sua capacità di redistribuzione degli sforzi, cioè dalla sua iperstaticità. In questo lavoro le relazioni sforzo-apertura di fessura determinate per i diversi materiali considerati (Tab. 4), sono poi state utilizzate per simulare numericamente il comportamento di piastre semplicemente appoggiate sui bordi e di piastre di pavimentazione su suolo elastico. Le due tipologie strutturali adottate sono entrambe iperstatiche, ma la piastra su appoggio elastico è certamente caratterizzata da un maggior grado di iperstaticità [13].

Il caso in studio ha previsto la schematizzazione di piastre quadrate con dimensioni $4,0 \times 4,0 \times 0,15$ m poggianti su suolo elastico (rigidezza del sottofondo assunta pari a $0,12 \text{ N/mm}^3$; Fig. 11) e lungo i bordi (Fig. 12), sottoposte ad un carico concentrato centrale applicato su un'impronta quadrata con dimensioni di 380×380 mm.

Il comportamento delle piastre è stato simulato numericamente con l'ausilio del software Merlin [9], adottando una mesh di tipo tridimensionale, come mostrato in Fig. 13.

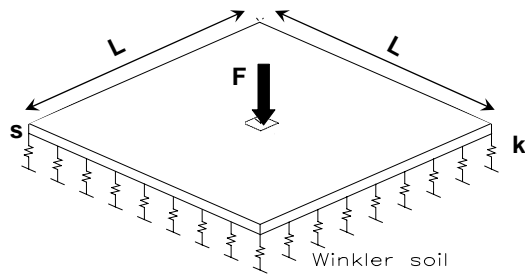


Fig. 11 – Schematizzazione delle piastre appoggiate su suolo alla Winkler.

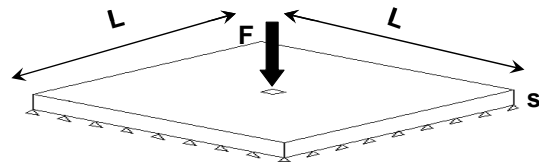


Fig. 12 – Geometria delle piastre semplicemente appoggiate lungo i bordi.

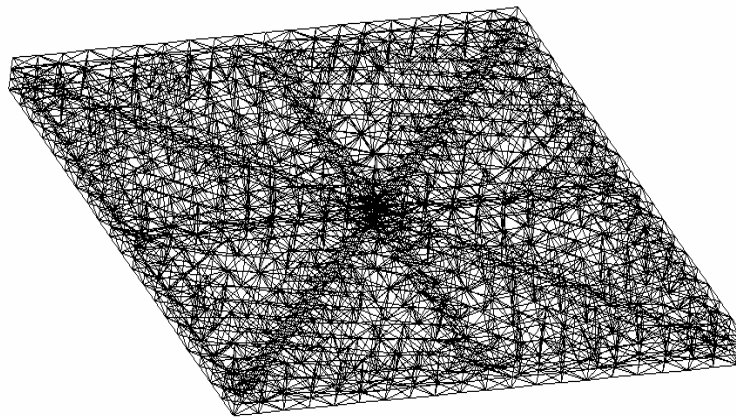


Fig. 13 – Mesh adottata per la discretizzazione delle piastre a geometria quadrata.

La Fig. 14 mostra le curve ottenute dalle simulazioni numeriche di piastre su suolo elastico realizzate con i diversi materiali testati, in termini di carico-spostamento verticale del punto centrale. Si può notare un evidente incremento del carico successivo alla fessurazione della matrice, legato al contributo benefico della resistenza post-fessurazione delle fibre. La risposta delle piastre di pavimentazione realizzate con materiali diversi è molto simile, anche se le fibre di acciaio e quelle ibride hanno permesso di raggiungere carichi ultimi leggermente maggiori rispetto a quelle sintetiche. Nel caso delle piastre appoggiate sui bordi (Fig. 15), essendo il grado di iperstaticità di questi elementi inferiore rispetto a quello delle piastre su suolo elastico, si assiste ad una maggiore distinzione tra i risultati delle elaborazioni numeriche. Le curve relative a ciascuna miscela sono mostrate in Fig. 15 in termini di carico-spostamento verticale del punto centrale della piastra. Si può osservare come in questo caso il carico applicabile si riduca dopo il raggiungimento del carico di picco e come il carico

ultimo (post-picco) dei provini con fibre sintetiche sia sensibilmente inferiore a quello con le sole fibre d'acciaio. Ancora una volta la piastra con fibre ibride ha mostrato un comportamento simile a quello delle fibre di acciaio, con il vantaggio di poter controllare meglio la fessurazione da ritiro.

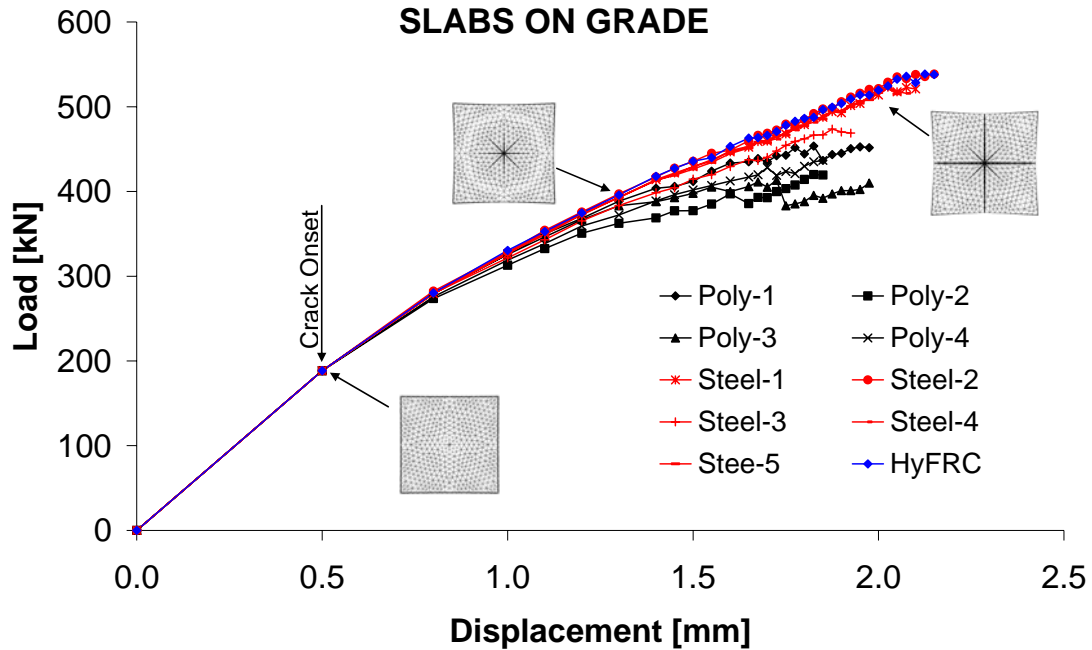


Fig. 14 – Curve carico-spostamento verticale ottenute dalle simulazioni numeriche di piastre su suolo elastico.

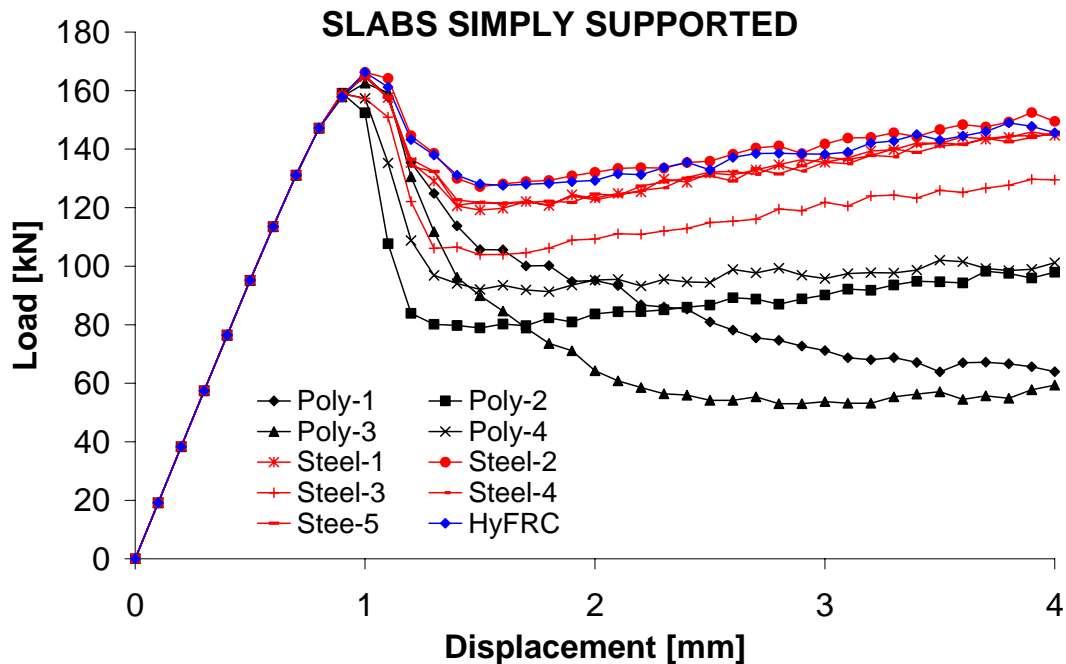


Fig. 15 – Curve carico-spostamento verticale ottenute dalle simulazioni numeriche di piastre appoggiate sui bordi.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente lavoro si sono volute approfondire le caratteristiche, in termini di tenacità e comportamento al ritiro, di calcestruzzi rinforzati con fibre d'acciaio, con fibre sintetiche e fibre ibride. L'attività sperimentale ha avuto come oggetto prove di frattura su campioni di trave intagliati. Sono state invece confezionate lastre sottili con spessore di 20 mm per la valutazione del comportamento al

ritiro. Le indagini sperimentali hanno dimostrato il miglior comportamento delle fibre di acciaio per quanto riguarda la tenacità, mentre le micro-fibre sintetiche hanno mostrato un buon comportamento nei confronti del ritiro (anche se la tipologia di prova è da considerarsi indicativa, in quanto il metodo di controllo è innovativo ed il numero di provini è limitato).

Ottimo è stato il comportamento delle fibre ibride che ha garantito una buona resistenza alla fessurazione da ritiro ed ha manifestato valori elevati degli indici di duttilità.

Il comportamento post-fessurativo (in termini di curve $\sigma-w$) può essere ben approssimato con delle leggi bilineari, quando la matrice è rinforzata con un'unica tipologia di fibra e con leggi di tipo trilineare, per matrici rinforzate con due fibre diverse.

Le simulazioni numeriche di piastre fibrorinforzate hanno mostrato come il comportamento strutturale dipenda certamente dalle caratteristiche del materiale ma anche dal grado di iperstaticità della struttura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Walraven, "The evolution of Concrete", *Structural concrete*, Vol. 1, 1999, pp. 3-11.
- [2] A. Meda e G.A. Plizzari, "La progettazione delle pavimentazioni in FRC mediante un metodo basato sulla meccanica della frattura", *La meccanica della frattura nel calcestruzzo ad alte prestazioni*, IGF, Brescia, 2001, pp. 137-156.
- [3] M. di Prisco, R. Felicetti, e G.A. Plizzari, eds., "Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (FRC)", Varenna (Italy), September 20-22, 2004, RILEM PRO 39, Bagnaux (France), pp. 1514.
- [4] L. Cominoli, C. Failla, M. Manzoni, G.A. Plizzari e 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.
- [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 Structural Implications*, Banthia, N., Uomoto, T., Bentur, A. e Shah, S.P. Eds., Abstract a pag. 84, Full paper su CD Rom (ISBN 0-88865-810-9), 22-24 August 2005, Vancouver, Canada.
- [6] N. Banthia, and N. Nandakumar, "Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Composites", *J. of Cement Composites (UK)*, 25(1),2003, pp. 3-9.
- [7] I. Markovic, J.G.M. Van Mier, and J.C. Walraven, "Single fiber from the hybrid fiber reinforced matrices", *International Symposium on High Strength/High Performance Concrete*, Vol. 2, 2001, pp. 1175-1186.
- [8] UNI 11039, "Steel fibre reinforced concrete - Part I: Definitions, classification specification and conformity - Part II: test method for measuring first crack strength and ductility indexes", *Italian Board for Standardization*, 2003.
- [9] R.W. Reich, J. Cervenka, and V.E. Saouma, "Merlin, A three-dimensional finite element program based on a mixed-iterative solution strategy for problems in elasticity, plasticity, and linear and nonlinear fracture mechanics", 1994, Palo Alto: EPRI, <http://civil.colorado.edu/~saouma/Merlin>.
- [10] P.E. Roelfstra, and F.H. Wittmann, "Numerical Method to Link Strain Softening with Failure of Concrete", *Proc. Fracture Toughness and Fracture Energy*, Elsevier, 1986, pp. 163-175.
- [11] F.H. Wittmann, K. Rokugo, E. Brühwiler, H. Mihashi, and P. Simonin, "Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by Means of Compact Tension Specimens." *Materials and Structures*, Vol. 21, 1988, pp. 21-32.
- [12] A. Hillerborg, M. Modeer and P.E. Petersson, "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 1976, pp. 773-782.
- [13] H. Falkner, Z. Huang, and M. Teutsch, "Comparative Study of Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs", *Concrete International*, 17(1), 1995, pp. 45-51.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato finanziato dalla Magnetti Building di Carvico (BG); gli Autori sono particolarmente riconoscenti all'Ing. Paolo Magnetti per aver creduto e sostenuto la ricerca.

Un ringraziamento è rivolto all' Ing. Francesco Sonzogni della Magnetti Building per l'attenta collaborazione alle prove sperimentali e a Stefano Marangoni e O'brian Lazzaroni per il prezioso contributo allo svolgimento della prove ed alla elaborazione dei risultati sperimentali.