

COMPORTAMENTO FLESSIONALE IN FASE FESSURATA DI HYFRC DA PROVE DI PULL-OUT SULLA SINGOLA FIBRA

L. Sorelli¹, N. Banthia², V. Bindiganavile², G.A. Plizzari³,

¹ *Dipartimento di Ingegneria Civile - Università degli Studi di Brescia, Via Branze 38, 25123 Brescia*

² *Dept. of Civil Engin. - Univ. of British Columbia, 2324 Main Mall, V6T 1Z4, Vancouver, B.C., Canada*

³ *Facoltà di Ingegneria - Università di Bergamo viale Marconi 5/A 24044, Dalmine (BG)*

ABSTRACT

Recent studies on Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) have pointed out it is possible to combine different kind of fibers with the scope of obtaining a material with increased resistance to cracking process and hence to water and chloride ingress. The high toughness and low permeability of these HyFRC materials are characteristics even more necessary in the structural application where concrete with high resistance, but higher brittleness, is used.

The effect of combination of different fibers in mechanical tests, such as flexural and tensile tests, has already shown the hybridation and synergistic effect in terms of energy dissipated after cracking. The hybrid effect is due to additional bridging effect and improved bond characteristic of the matrix; these effects can be identified by means of a basic test such as the pull-out test of single fibers.

In this paper, results from pull-out tests on a single steel macrofiber with different angle of orientation in a hybrid matrix (with polypropylene microfibers) as well as results from static flexural tests on the same materials, are presented.

Finally the pull-out response and a comparison of the flexural postcracking performance are able to explain the hybridation effect of HyFRC composites. The latter comparison concerns the experimental results obtained from pull-out test and an analytical model.

SOMMARIO

Recenti studi sui calcestruzzi ibridi fibrorinforzati (HyFRC) hanno mostrato come sia possibile combinare opportunamente diversi tipi di fibre per ottenere un materiale dotato di elevata tenacità e bassa permeabilità all'acqua e ai cloruri. Queste caratteristiche sono particolarmente significative nelle applicazioni strutturali dove calcestruzzi con elevata resistenza, ma con maggiore fragilità, sono sempre più utilizzati.

Gli effetti sinergici dell'ibridazione di fibre diverse sono già stati chiaramente riscontrati in termini di energia dissipata in prove di flessione e trazione. L'effetto delle fibre ibride è dovuto, al macro-livello, all'effetto addizionale di cucitura delle fibre e, al micro-livello, al controllo dell'innesco e della crescita di microfessure. Nell'ottica di distinguere e valutare questi diversi contributi, in questo studio sono state effettuate prove di estrazione di una singola fibra d'acciaio da una matrice fibrosa (con microfibre di polipropilene). I risultati di tali prove sono in grado di visualizzare il benefico effetto delle microfibre sull'ancoraggio delle macrofibre.

Gli stessi materiali sono stati sottoposti a prove di flessione, cosicché è stato possibile confrontare le resistenza flessionale delle curve sperimentali con quelle dedotte dalle

prove di pull-out utilizzando un modello basato su semplici principi di meccanica. Quest'ultimo confronto, finalmente, è in grado di distinguere e valutare l'importanza dei diversi contributi in un sistema composito HyFRC in fase fessurata.

INTRODUZIONE

La combinazione di diverse tipologie di fibre in una matrice cementizia consente di ottimizzare le prestazioni dei calcestruzzi fibrorinforzati che possono simultaneamente trarre vantaggio dagli effetti meccanici e/o fisici offerti dalle singole fibre [1-3]. La scelta della combinazione appropriata di fibre dipende dall'obiettivo dell'ottimizzazione. Ad esempio, combinando macrofibre d'acciaio e microfibre di polipropilene è possibile ottenere un calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRC) caratterizzato da elevata tenacità e durabilità. Le fibre secondarie di materiale polimerico non soltanto riducono la fessurazione dovuta a fenomeni di ritiro e la permeabilità, ma migliorano anche le proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito e manifestano effetti sinergici alle macrofibre [4-6]. Recentemente sono stati impiegati HyFRC per ottenere calcestruzzi ad elevate prestazioni caratterizzati da un legame costitutivo incrudente e da un processo di fessurazione multipla, miscelando in una malta cementizia fibre di acciaio e di polipropilene (PVA) [7]. Calcestruzzi HyFRC sono potenzialmente utilizzabili, grazie alle caratteristiche combinate di elevata tenacità e durabilità, in piastre di fondazione, nel calcestruzzo proiettato e in prodotti di prefabbricazioni caratterizzati da piccoli spessori.

Nel comportamento post-fessurativo dei compositi HyFRC il meccanismo di cucitura delle fessure da parte delle fibre conferisce al materiale elevata duttilità e tenacità. A diverse scale dimensionali, le micro e le macrofibre risultano più efficienti nel contrastare rispettivamente la crescita di micro e di macro fessure, ma è possibile che le microfibre disperse nella matrice migliorino l'aderenza e, conseguentemente, l'efficienza delle macrofibre nel processo fessurativo (Figura 1). Questo comportamento micro-meccanico potrebbe essere la ragione degli effetti sinergici riscontrati in alcune recenti ricerche sui medesimi materiali [4]. Uno dei principali scopi di questo studio è una migliore comprensione dei diversi contributi dei meccanismi resistenti al processo fessurativo per questo composito cementizio binario. Basandosi sui risultati di prove di flessione e di estrazione della singola fibra e su un semplice modello matematico che permette di correlare i risultati di queste diverse prove meccaniche [8], è possibile migliorare la conoscenza del comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato.

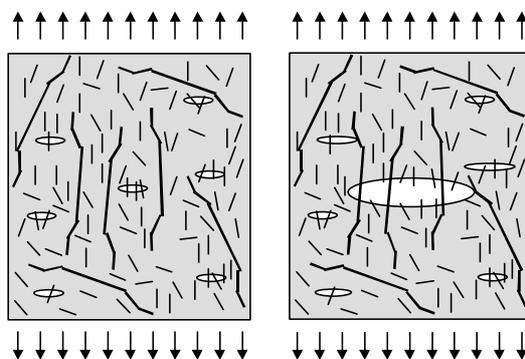


Figura 1: Rappresentazione schematica dei meccanismi resistenti al processo fessurativo in un composito con due diversi tipi di fibra.

PROGRAMMA SPERIMENTALE E PROPRIETA' DEI MATERIALI

Per la sperimentazione sono stati progettati cinque diversi materiali, riportati in Tabella 1, variando il dosaggio di macrofibre di acciaio e di microfibre di polipropilene in una matrice cementizia di media resistenza, caratterizzata da un rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0.45, da 400 kg/m³ di cemento ASTM I, da 180 kg/m³ d'acqua, da 557 kg/m³ di sabbia e da 1113 kg/m³ di ghiaia con un diametro massimo di 14 mm.

In Tabella 1 sono elencati i dosaggi delle fibre per i diversi materiali e la resistenza a compressione a 28 giorni determinati su cilindri ($\phi=100\text{mm}$, $h=200\text{mm}$) e seguendo il metodo previsto dalla ASTM C39 e C469.

Materiali	Fibre di acciaio [%] _{vol}	Fibre di polipropilene [%] _{vol}	Resistenza a compressione f_{cc} [MPa]
MS0	-	-	59.25
MS1	0.5	-	64.28
MS2	1.0	-	59.24
MS3	0.5	0.5	55.25
MS4	-	1.0	51.22

Tabella 1: Dosaggi delle fibre e resistenza cilindrica compressione.

Le principali caratteristiche delle fibre cilindriche di acciaio con l'estremità piatta e delle fibre polimeriche sono riportate in Tabella 2.

Fotografia	Fibra e Geometria	Diam. [mm]	Lungh. [mm]	Resist. a trazione [MPa]	Modulo elastico [Gpa]	Densità [kg/m ³]
	macrofibre di acciaio ----- stelo cilindrico con estremi appiattiti	1mm	50	1150	212	7850
	Microfibre di Polipropilene ----- monofilamenti	3 Denier	12.5	375	3.5	900

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche e geometriche delle fibre.

Le prove di estrazione sono state effettuate utilizzando provini cilindrici composti da due blocchi separati di calcestruzzo connessi dalla macrofibra metallica (Figura 2a). La parte inferiore è stata gettata per prima, con la fibra annegata nel calcestruzzo per la lunghezza di ancoraggio prescelta, quindi è stata mantenuta in ambiente a umidità controllata per 24 ore. Una volta indurita, si è gettato la parte superiore e successivamente il provino, così assemblato, è stato immerso in acqua per 28 giorni. Le prove di estrazione sono state effettuate con una macchina di prova Instron dotata di una cella di carico con

capacità di 5 kN. La velocità dell'attuatore è stata impostata a 2mm/min mentre il carico e lo scorrimento della fibra sono stati registrati con un sistema digitale di acquisizione ad una frequenza di 5Hz. Lo scorrimento della fibra è stato misurato da due trasduttori di spostamento induttivi (LVDT) con una corsa di 25 mm.

Per le prove di estrazione sono state gettati 4 provini con 4 diverse inclinazioni della fibra rispetto la direzione del carico (0° , 22.5° , 45° e 67.5°) con lunghezza di ancoraggio pari a metà lunghezza della fibra (Figura 2a). Per valutare l'effetto della lunghezza di ancoraggio e della parte terminale deformata, è stata testata una serie di provini con la lunghezza di ancoraggio pari a 8 e 42 mm nei due blocchi costituenti un provino. Le prove di estrazione sono state effettuate sia con matrice senza fibre sia con una matrice contenente una percentuale volumetrica di microfibre di polipropilene pari al 0.5%.

Per ogni materiale sono state sottoposte a prove di flessione con 4 punti di carico, secondo ASTM C1018, 6 travette, caratterizzate da una sezione trasversale di 100x100mm e da una luce di 300 mm (Figura 2b). Per depurare la misura dello spostamento verticale dalle deformazioni localizzate in corrispondenza dei supporti, è stato utilizzato un apposito sistema di fissaggio degli LVDT (Figura 2b).

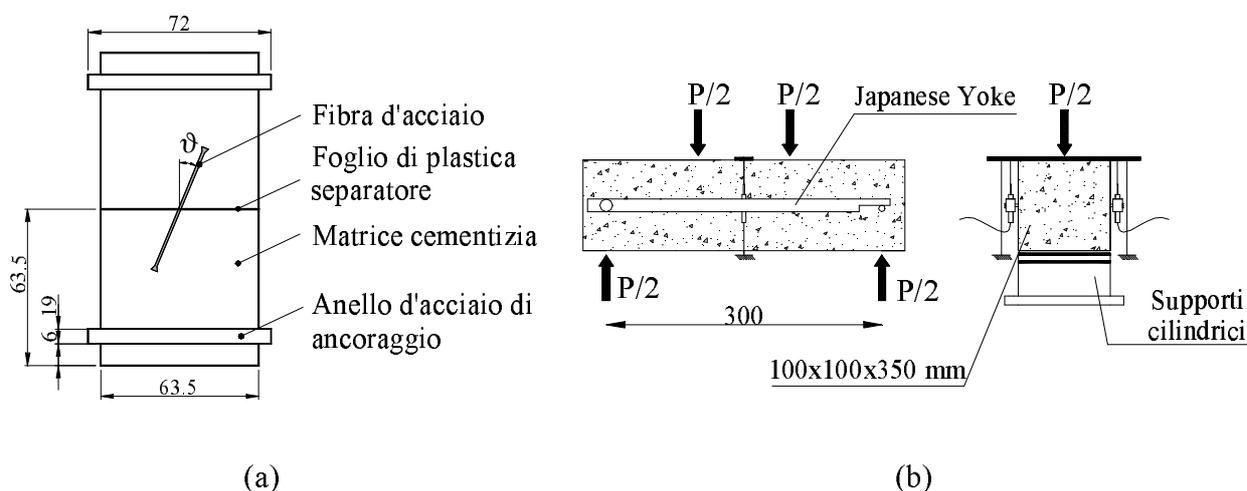


Figura 2 Provini per le prove di estrazione (a); sistema di fissaggio degli LVDT utilizzato nelle prove di flessione (b) (misure in mm).

RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

I risultati delle prove di estrazione relativi alle curve carico-scorrimento della fibra per la diversa inclinazione scelte per le fibre, sono mostrati in Figura 3(a) per la matrice cementizia senza microfibre e in Figura 3(b) per la matrice cementizia rinforzata con il 0.5% in volume di microfibre di polipropilene. La lunghezza di ancoraggio è pari a 25 mm e le curve rappresentano una media di 4 provini.

Nelle Tabelle 3 e 4 sono riportati i valori medi dell'energia necessaria all'estrazione della fibra, il carico massimo, lo scorrimento in corrispondenza del carico massimo e lo scorrimento in corrispondenza del punto in cui la curva comincia ad avere un comportamento non lineare (*Bend Over Point; BOP*). I valori delle stesse grandezze sono stati riportati limitatamente ad un intervallo con scorrimento massimo della fibra di 3mm. La deviazione standard è relativamente elevata ed aumenta nel caso del sistema ibrido.

L'estrazione della fibra è stata la principale modalità di collasso, anche se in 3 casi si è verificata la rottura della fibra (una fibra a 67.5° e una a 45° per la matrice senza microfibre e una fibra a 67.5° per la matrice fibrorinforzata).

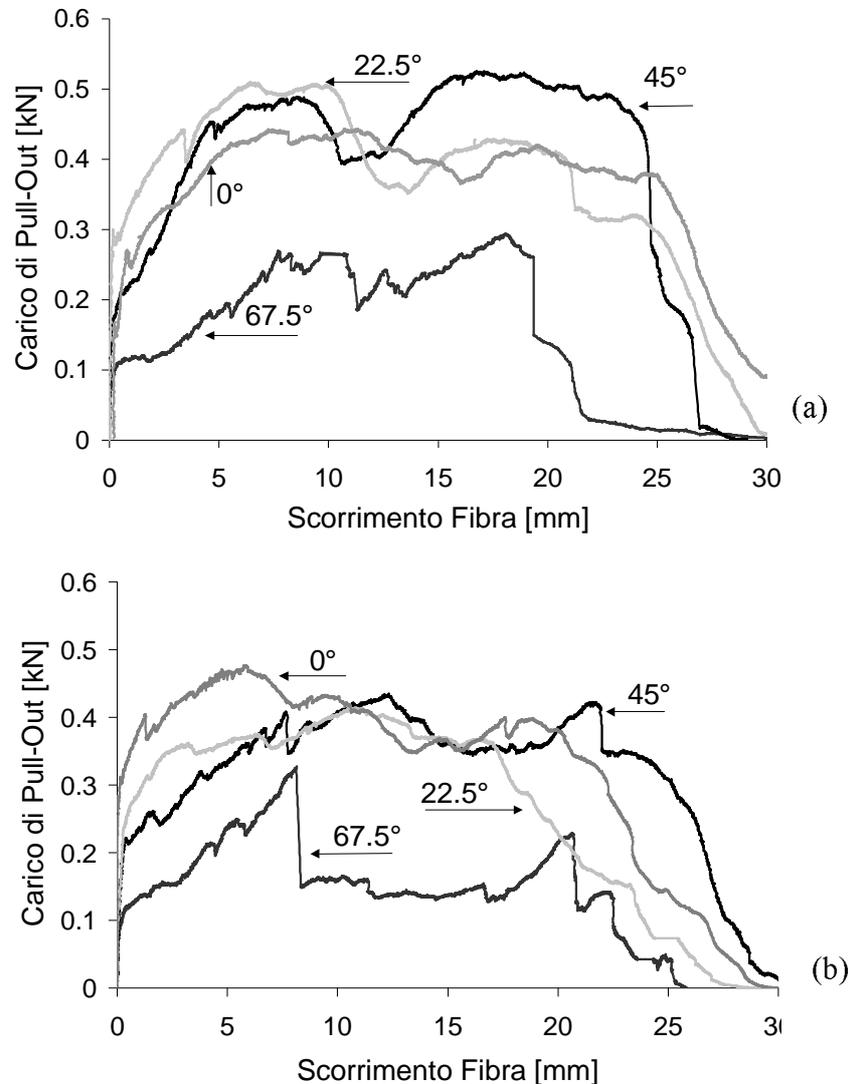


Figura 3 Diagrammi carico-scorrimento ottenuti da prove di estrazione per diverse inclinazioni della fibra di acciaio in una matrice senza microfibre (a) e con microfibre di polipropilene (b).

Per valori di scorrimento della fibra compresi tra 0 e 3 mm non vi è alcuna significativa differenza tra le curve ottenute dalla matrice con o senza microfibre disperse, ma è evidente che il sistema ibrido mostra una resistenza all'estrazione inferiore per elevati scorrimenti della fibra. Infatti, l'energia di estrazione ($A_{0-3\text{mm}}$) e il carico di picco ($P_{0-3\text{mm}}$) non sono significativamente affetti dalla presenza delle microfibre di polipropilene finché lo scorrimento è inferiore ai 3 mm; viceversa, per scorrimenti maggiori, l'energia (A_{tot}) di estrazione del sistema con microfibre disperse è sensibilmente inferiore. Si può inoltre notare che il massimo carico per un sistema ibrido avviene in corrispondenza di scorrimenti minori. Questo comportamento è più marcato per i materiali con maggiori

inclinazioni della fibra rispetto all'asse di carico (22.5° e 45°) e la differenza potrebbe essere imputata ad una minore efficacia del meccanismo resistente offerto dalla flessione della fibra inclinata in corrispondenza della fessura a causa della minore resistenza a compressione della matrice con microfibre di polipropilene; in questo caso, fenomeni di danneggiamento della matrice prevengono o riducono la deformazione plastica della fibra per flessione.

Inclinazione [gradi]	A _{tot} [J]	A _{0-3mm} [J]	P _{max} [kN]	P _{0-3mm} [kN]	slipP _{max} [mm]	B.O.P. [mm]
0	10.76	0.76	0.44	0.33	10.84	0.070
22.5	10.86	1.02	0.51	0.43	6.60	0.120
45	11.52	0.73	0.52	0.35	17.04	0.045
67.5	3.87	0.34	0.29	0.14	18.26	0.030
Dev. Stand.[%]	25.8	22.5	18.6	17.7	38.0	-

Tabella 3: Energia di estrazione, carico massimo, scorrimento relativo al carico massimo, punto di BOP ottenuti dalle curve medie nel caso di matrice senza fibre.

Inclinazione [gradi]	A _{tot} [J]	A _{0-3mm} [J]	P _{max} [kN]	P _{0-3mm} [kN]	slipP _{max} [mm]	B.O.P. [mm]
0	9.65	1.11	0.47	0.47	5.92	0.030
22.5	7.81	0.90	0.41	0.36	10.81	0.100
45	8.99	0.66	0.43	0.29	12.45	0.020
67.5	3.91	0.41	0.32	0.16	8.12	0.025
Dev. Stand. [%]	35.5	31.0	33.8	38.4	77.9	-

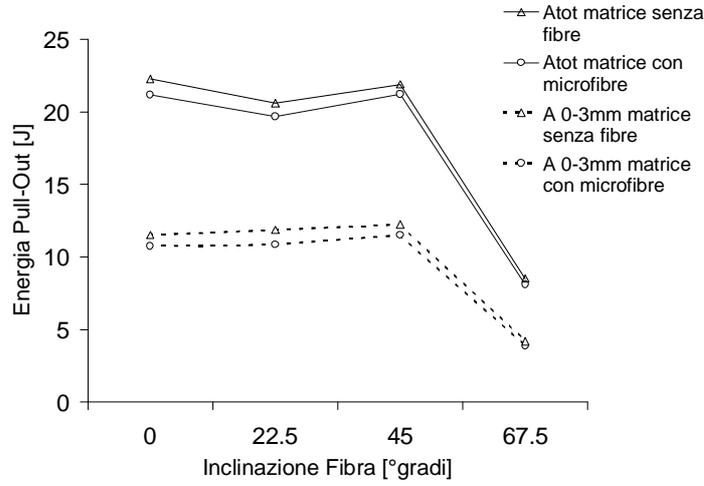
Tabella 4: Energia di estrazione, carico massimo, scorrimento relativo al carico massimo, punto di BOP ottenuti dalle curve medie nel caso di matrice con 0.5% in volume di fibre di polipropilene.

Analogamente, i valori dello scorrimento a cui corrisponde il punto di BOP sono simili per entrambe le matrici. Se si assume che il punto di BOP corrisponda al carico di rottura del legame elastico lineare del sistema fibra-matrice, le microfibre polimeriche non sembrerebbero controllare l'innesco delle microfessure che si formano all'uscita del campo lineare.

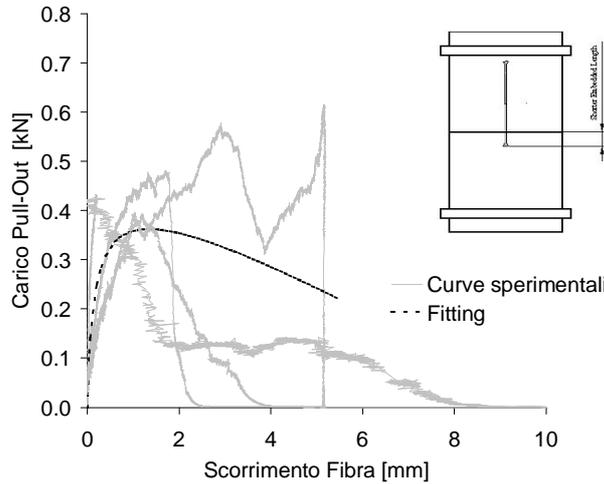
La Figura 4(a) mostra l'effetto dell'orientamento della fibra sull'energia di estrazione; si può notare che l'andamento è tipicamente quello di una fibra duttile. Come precedentemente affermato, è stato anche investigato l'effetto della lunghezza di ancoraggio per la matrice senza fibre testando 4 provini con un lunghezza di ancoraggio di 8 e 42 mm per ciascuna parte dei due blocchi del provino. I risultati relativi delle singole prove sono mostrati in Figura 4(b).

Le curve carico flessionale-spostamento per tutti i materiali impiegati sono mostrate in Figura 5 dove il calcestruzzo HyFRC (MS3) mostra un momento resistente maggiore al materiale SFRC con 0.5% in volume di fibre di acciaio (MS1). Questo incremento è dovuto all'aggiunta di microfibre nella matrice e può essere stimato in termini di resistenza post-fessurazione (*post crack strength; PCS*) [8], come mostrato in Figura 5(b).

In particolare, l'aggiunta di microfibre induce un aumento di PCS pari al 41.7% ad uno spostamento di 0.4 mm o al 27% ad uno spostamento di 1 mm.



(a)



(b)

Figura 4 Energia di estrazione per diverse inclinazioni della fibra con e senza microfibre di polipropilene nella matrice e per diversi intervalli di scorrimento (a); curve carico-scorrimento con lunghezza di ancoraggio di 8 mm (b).

Un modello matematico basato su semplici principi di meccanica e statistica [9] è stato utilizzato per correlare i risultati della prova di flessione con quelli delle prove di estrazione. Il modello considera due variabili statistiche: la variazione della forza di estrazione della singola fibra $f(l_e, \alpha)$ ed il numero di fibre (N) che intercettano il piano della fessura. Si assume una distribuzione uniforme dell'inclinazione (α) e della lunghezza di ancoraggio (l_e) delle fibre in corrispondenza della fessura (costante densità di probabilità). Secondo questo modello, la forza media di estrazione (\underline{f}) può essere così stimata:

$$\underline{f} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{l_f}{2}} f(l_e, \alpha) \cdot dl_e \cdot d\alpha}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{l_f}{2}} dl_e \cdot d\alpha} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(\frac{f_{0^\circ}[w]}{2} + f_{22.5^\circ}[w] + f_{45^\circ}[w] + f_{67.5^\circ}[w] + \frac{f_{90^\circ}[w]}{2} \right) \frac{1}{4} \right] + f_{l_e, \min}[w] \right\} \quad (1)$$

dove $f_{le,min}[w]$ è la curva di estrazione per la lunghezza di ancoraggio più corta possibile, l_f è la lunghezza della fibra e w è lo scorrimento della fibra. Il numero totale di fibre N può essere così stimato:

$$N = \beta \cdot \frac{V_f \cdot A_c}{A_f} \quad (2)$$

dove V_f è la percentuale volumetrica di fibre, A_c è l'area totale della sezione di calcestruzzo, A_f è l'area della fibra mentre β è pari a 0.5 se si assume una distribuzione uniforme dell'orientazione delle fibre e della distanza del baricentro delle fibre dal piano della fessura [10].

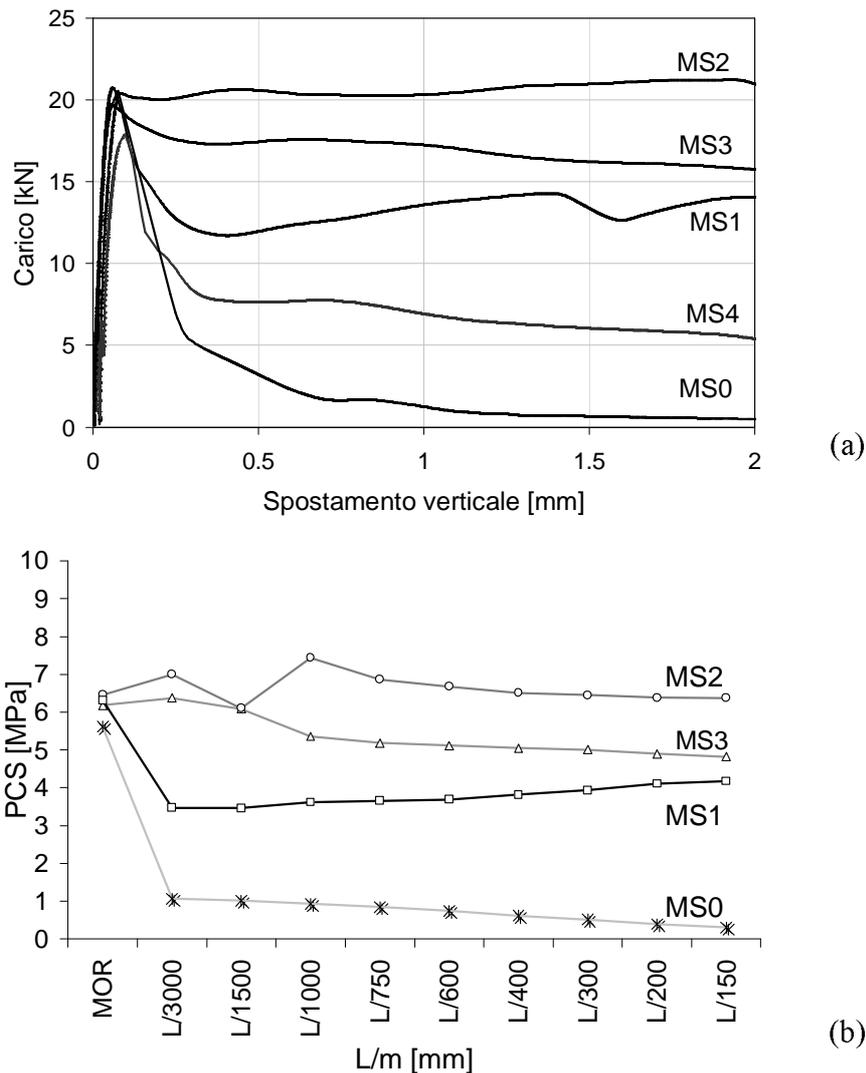


Figura 5 Curva media carico-spostamento delle prove a flessione (a); resistenza post-fessurazione [8] ottenuta dai diversi materiali (b).

Dalla definizione di media della forza totale fornita dalle fibre per unità di superficie è:

$$f_t = \underline{f} \cdot N \quad (3)$$

In questo studio il fattore β è stato corretto empiricamente a 0.65 per tenere conto del fatto che il numero medio di fibre contate in corrispondenza della fessura nei test effet-

tuati era maggiore di quello previsto. Si suppone che la causa sia la dimensione della sezione trasversale del provino (100 mm) non sufficientemente grande rispetto alla lunghezza della fibra (50 mm) da permettere una distribuzione uniforme dell'orientazione delle fibre.

Usando le equazioni di equilibrio del momento e dell'azione assiale sulla sezione fessurata collocata tra i punti di carico, e considerando la cinematica del corpo rigido per le due metà del provino divise dalla fessura [11], il problema è completamente definito e risolvibile se si conoscono le leggi costitutive e si assume una variazione lineare dell'apertura di fessura lungo la profondità del provino. Il modulo elastico (E) è stato valutato dalle prove di flessione, la resistenza a trazione (f_{ct}) è dedotta dalla resistenza cilindrica a compressione (f_{cc}) secondo la ACI ($f_{ct}=0.62 \cdot (f_{cc})^{1/2}$).

Nel modello matematico è stata anche computata la resistenza a trazione $\sigma_a[w]$ offerta dall'ingranamento degli aggregati secondo un modello empirico proposto da Stang [12]:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{mu}}{1 + (w/w_0)^p} \quad (5)$$

dove σ_{mu} è il massimo sforzo sopportato dall'azione degli aggregati con $w=0$, w_0 è l'apertura di fessura quando lo sforzo σ_a corrisponde a metà del valore di σ_{mu} e p definisce la forma della curva. In questa modellazione sono stati adottati questi valori: $\sigma_{mu}=5$ MPa, $w_0=0.015$ mm, $p=1.2$.

Le curve carico-spostamento sperimentali e quelle analitiche sono mostrate in Figura 6. Si può notare che le curve analitiche sovrastimano il carico massimo in quanto il modello è basato su semplici equazioni di equilibrio e di congruenza, senza considerare importanti aspetti propri della meccanica della frattura, quali la concentrazione degli sforzi e la zona di processo all'apice della fessura. Tuttavia, dopo il picco la corrispondenza tra le curve empiriche e analitiche può essere considerata soddisfacente.

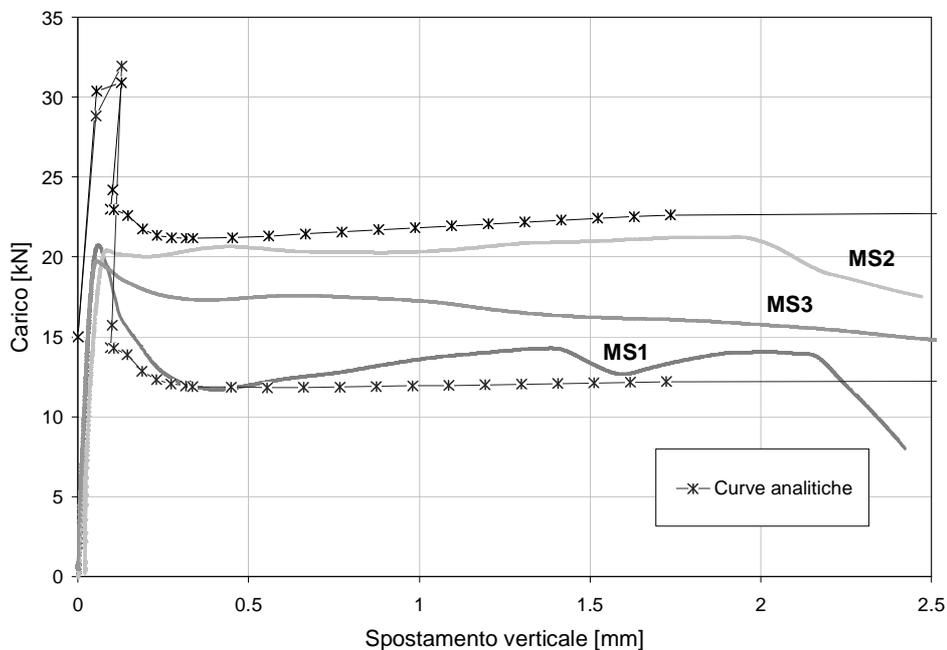


Figura 6 Confronto tra le curve sperimentali e analitiche della prova a flessione.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Un calcestruzzo con fibre ibride, dotato di elevata tenacità e durabilità, composto da macrofibre di acciaio e microfibre di polipropilene, è stato sottoposto a prove di compressione, di flessione e di estrazione per comprendere i meccanismi dei diversi tipi di fibre durante il processo fessurativo.

Tramite un semplice modello matematico [9], basato su ipotesi statistiche sulla distribuzione delle fibre e sui risultati della prova di estrazione su una singola fibra, la resistenza flessionale post-fessurativa del composito è stata stimata con buona precisione. Si può quindi ritenere la prova di estrazione in grado di generare curve carico-scorrimento che possono essere considerate rappresentative del comportamento fessurativo dell'intero composito.

I risultati della prova di flessione mostrano un miglioramento della resistenza post-fessurazione dovuto all'aggiunta di una percentuale volumetrica del 0.5% di fibre di polipropilene, pari al 41.7% in corrispondenza di uno spostamento di 0.4 mm, o pari al 27% in corrispondenza di uno spostamento di 1 mm. Questo positivo contributo delle microfibre di polipropilene alla resistenza residua del composito è in accordo con i risultati di altre ricerche su medesimi materiali [3,4].

Tuttavia, l'aderenza della macrofibra d'acciaio durante le prove di estrazione non è migliorata dalla presenza di microfibre di polipropilene disperse nella matrice. Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del composito dovuto all'aggiunta di fibre di polipropilene ad un calcestruzzo rinforzato con macrofibre di acciaio è dovuto principalmente all'azione di cucitura della microfibra al crescere dell'ampiezza della fessura.

BIBLIOGRAFIA

1. Shah, S.P., Lawler, J.S., Rapoport, J., "Reinforcing fibers and the permeability of cracked concrete with implications of durability", in 'Proc. Third Int. Conf. on ConSeC, Vancouver, 2001, 38-47.
2. Banthia N., Nandakumar N. "Crack growth resistance of Hybrid Reinforced Cement Composites", Cement & Concrete Composites 2001, accettato per pubblicazione.
3. Gupta R., Majdazadeh F., M. Soleimani Sayed, Banthia N., "Hybrid fiber reinforced concrete for bridges", VI Int. Conf. on Short & Medium Span Bridges, Vancouver, 2002.
4. Stroeven P., Shui Z., Qian C., Cheng Y., "Properties of carbon-steel and polypropylene-steel Hybrid fiber concrete in low-volume fraction range", ACI Special Publications, **200**, 713-732.
5. Sun W., Chen H., Luo X., Qian H., "The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete", Cement and Concrete Research 2001, **31**, 595-601.
6. Komlos K., Babal B., Nurnbergerova T., "Hybrid fibre reinforced concrete under repeated loading", Nuclear Engineering and Design 1995, **156**, 195-200.
7. Ramakrishnan V., Speakman J., Kakodkar S, Sure V.R., "Performance characteristics of monofilament polypropylene fiber-reinforced concrete", Transportation research, **1458**, 48-56
8. Banthia N., Trottier J.F., "Test methods of flexural toughness characterisation of fiber reinforced concrete: some concerns and proposition", ACI Materials Journal 1995, **92**.
9. Armelin H., Banthia N., "Predicting the flexural postcracking performance of steel fiber reinforced concrete from the pullout of single fibers", ACI materials Journal 1997, **94**, 18-31
10. Wang Y., Li V.C., Backer S., "A statistical tensile model of fiber reinforced cementitious composites", Composites 1989, **20**, 3, 265-274.
11. Petersson P.E., "Crack growth and development of fracture zone in plain concrete and similar materials", Lund University Technology, 1981, Report TVBM-1006.
12. Stang H., "Evaluation of properties of cementitious materials", HPFRCC Proc. of Int. RILEM/ACI Workshop 1992, 388-406.