

RISULTATI SPERIMENTALI DI CILINDRI IN C.A. RINFORZATI CON FRCM E SOGGETTI A COMPRESSIONE MONOTONICA

**FABRIZIO DE DOMENICO,
NATALE MAUGERI,
NINO SPINELLA,
Università di Messina**

SUMMARY

This work presents the results of some tests carried out at the material and structural lab of the University of Messina on reinforced concrete specimens wrapped with composite material dipped in inorganic matrix, and subjected to monotonic uniaxial compression.

The common practice requires the retrofitting system is made of FRP (Fibre Reinforced Polymer) by bonding with epoxy resin. In this work were used fibers belonging to another family of composite materials namely FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix, and these kind of composites are made of fibers embedded in cement mortar. The aim of the experimental tests is to evaluate the beneficial effects of the use of FRCM in terms of carrying capacity and ductility. The results showed that it is possible to achieve a significant increase in both terms of strength and deformability, obtaining hardening post-peak branches of constitutive curve.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'adeguamento strutturale risulta oramai consolidato l'impiego di materiali compositi per il rinforzo e l'incremento delle prestazioni di elementi strutturali in cemento armato, come peraltro testimoniato dal grande numero di ricerche recentemente pubblicate [], sia in campo sperimentale che nel campo della modellazione. Una delle metodologie di rinforzo che risulta assai diffusa è la fasciatura di pilastri in cemento armato impiegata al fine di aumentar la portanza e la duttilità degli elementi strutturali in c.a..

La maggior parte delle sperimentazioni e delle applicazioni è relativa all'uso degli FRP [1,2], i quali vengono applicati sulla superficie dell'elemento strutturale mediante l'impiego di

resina epossidica. Il rinforzo con FRCM si realizza, invece, applicando sulla superficie esterna dell'elemento di calcestruzzo strati di malta e fibra in ordine alterno, in modo da ottenere un pacchetto continuo con l'elemento strutturale.

Si evince come l'impiego degli FRCM per il rinforzo strutturale comporti diversi vantaggi rispetto ai classici FRP, riconducibili principalmente alla forte compatibilità della matrice con la fibra ed il calcestruzzo, nonché alla notevole resistenza delle fibre impiegate. Inoltre, il rinforzo con FRCM consente di ottenere una resistenza alle alte temperature identica a quella del supporto ed è applicabile anche su superfici umide. L'applicazione di tale sistema è caratterizzata da un'estrema facilità di posa in opera e di manipolazione per cui non richiede l'impiego di manodopera particolarmente specializzata.

Il confinamento degli elementi cilindrici in calcestruzzo è stato realizzato con tessuti o reti di FRCM disposti sulla superficie laterale del provino. L'applicazione del carico di compressione centrato determina una contrazione assiale dell'elemento e, contemporaneamente, una dilatazione radiale (in direzione ortogonale alle generatrici) la quale è contrastata dalla pressione laterale di confinamento esercitata dal rinforzo (Fig. 1 [3]). Un sistema confinante a base di FRCM ha un comportamento elastico fino alla rottura e, conseguentemente, è in grado di esercitare una pressione laterale sempre crescente all'aumentare della dilatazione radiale dell'elemento. A differenza di quanto, invece, avviene con il confinamento operato dalle armature trasversali in acciaio il quale, una volta snervate le armature, si può considerare pressoché costante durante l'intera storia di carico.

Il numero di sperimentazioni sugli FRCM presenti in letteratura è ad oggi esiguo [4,5], per cui è dapprima necessario valutare la loro efficacia nel migliorare la resistenza e la duttilità degli elementi soggetti a compressione, e successivamente vagliare l'opportunità di formulare adeguati modelli analitici in grado di predirne la risposta all'azione dei carichi esterni.

Nel seguito vengono illustrati i risultati di una parte della sperimentazione attualmente in corso presso il laboratorio di strutture dell'Università di Messina, i quali riguardano otto provini di calcestruzzo ordinario di classe medio-bassa, dei quali sei rinforzati con il FRCM.

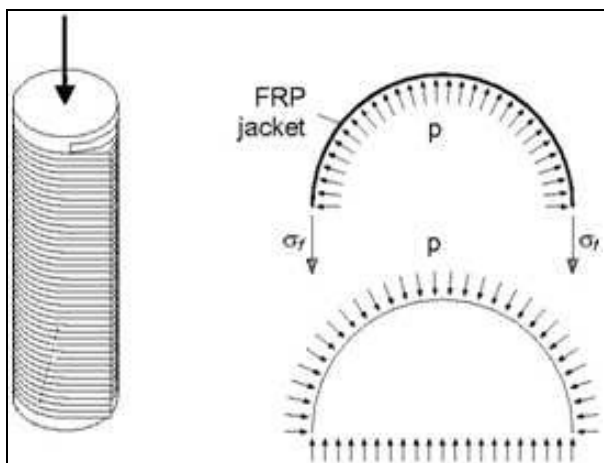


Figura 1. Effetto della pressione di confinamento indotta dalla fasciatura [3].

2. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Sono stati confezionati otto provini cilindrici in calcestruzzo aventi diametro pari a 154 mm ed altezza eguale a 335 mm utilizzando casseforme in materiale plastico ad alta resistenza ed impiegando un adeguato liquido disarmante. La miscela di calcestruzzo utilizzata per il getto è stata progettata in relazione alla classe di resistenza voluta (C 25/30 MPa). A tale scopo si sono utilizzate tre classi granulometriche di aggregato, con diametro massimo di 16 mm. Fissato il rapporto A/C (acqua/cemento) pari a 0.57 in funzione della resistenza e la quantità d'acqua in relazione al grado di lavorabilità della miscela (S4), si sono determinate le percentuali in peso degli inerti all'interno del fuso di Fuller. La composizione di un metro cubo di calcestruzzo è risultata quindi la seguente: 350 kg di cemento di tipo Portland 32.5; 200 litri di acqua; 1.010 kg di sabbia fine (diametro 0-2 mm), 915 kg di sabbia (diametro 2-8 mm) e 754 Kg di inerte più grosso (8-16 mm).

Successivamente allo scasso si è provveduto a regolarizzare la superficie di base mediante cappatura con malta cementizia colabile ed autolivellante. E' stato quindi applicato il rinforzo in FRCM su sei degli otto cilindri di calcestruzzo, così da poter confrontare i risultati dei provini confinati con quelli ottenuti da test analoghi realizzati sugli elementi privi di rinforzo.

La rete di fibra di carbonio utilizzata è denominata PBO (Poliparafenilenbenzobisoxazolo) (Fig. 2). La matrice cementizia impiegata per il confinamento è una malta inorganica che, impastata con acqua, assume una consistenza plastica idonea ad

essere applicata sulla superficie del provino che viene precedentemente saturata con acqua.



Figura 2. Rete di PBO.

Si procede applicando un primo strato di malta dello spessore di 3-4 mm, nel quale si annega la rete di PBO avendo cura di avvolgere l'intera superficie e garantire una sovrapposizione di circa 10 cm (Fig. 3). Quindi si applica un secondo strato di malta di uguale spessore per ricoprire completamente la rete di rinforzo. Si ripete la procedura per gli eventuali successivi avvolgimenti di rinforzo PBO desiderati.



Figura 3. Fasi dell' applicazione di malta e fibra.

Sui cilindri oggetto del presente lavoro, sono stati applicati due avvolgimenti di fibra su tre provini di calcestruzzo e tre avvolgimenti di PBO sui rimanenti tre provini così da valutare l'incremento di resistenza e deformabilità degli elementi al variare della percentuale geometrica di rinforzo (Fig. 4). La fasciatura con fibre di PBO è stata interrotta in prossimità delle basi dei cilindri

in modo da non alterare la superficie di applicazione del carico.

Le caratteristiche geometriche dei campioni sottoposti a prova di compressione sono indicate nella Tabella 1. Le caratteristiche meccaniche della fibra di PBO e della malta sono invece riportate in Tabella 2.



Figura 4. Provini cilindrici fasciati.

Codice	H (mm)	D (mm)	n° strati	Spessore fibra t_f (mm)
UN1	335	154	0	/
UN2	335	154	0	/
C1	335	154	2	0.091
C2	335	154	2	0.091
C3	335	154	2	0.091
C4	335	154	3	0.1365
C5	335	154	3	0.1365
C6	335	154	3	0.1365

Tabella 1. Caratteristiche geometriche dei provini.

Caratteristiche del PBO	
Densità (g/cm^3)	1.56
Resistenza a trazione (GPa)	5.8
Modulo elastico (GPa)	270
Allungamento a rottura (%)	2.15
Caratteristiche della rete	
Peso delle fibre di PBO nella rete (gr/m^2)	88
Spessore equiv. di tessuto secco in	0.0455

direzione dell'ordito (mm)	
Spessore equiv. di tessuto secco in direzione della trama (mm)	0.0115
Carico di rottura dell'ordito per unità di larghezza (kN/m)	264,0
Carico di rottura della trama per unità di larghezza (kN/m)	66,5
Peso della rete (supporto + fibre PBO) (g/m^2)	Da 110 a 126
Caratteristiche della matrice inorganica	
Consistenza (UNI EN 13395-1)	175
Peso specifico malta fresca (g/cm^3)	$1,55 \pm 0,05$
Resa $\text{Kg/m}^2/\text{mm}$ (prodotto secco)	1,210 – 1,270
Resistenza a compressione (UNI EN 196 – 1) (MPa)	$\geq 15,0$ (a 28gg)
Resistenza a flessione (UNI EN 196 – 1) (MPa)	$> 2,0$ (a 28gg)
Modulo elastico secante (UNI EN 13412) (MPa)	≥ 6000 (a 28gg)

Tabella 2. Proprietà del sistema fibra-malta.

3. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Le prove di schiacciamento sono state condotte a controllo di spostamento utilizzando la pressa della Controls da 4000 kN in dotazione al Laboratorio di Materiali e Strutture dell'Università di Messina. Per la misura degli spostamenti sono stati disposti tre compressimetri Controls, solidali con il provino e collegati con la consolle di acquisizione Advantest 9, provvista di 8 canali, la quale consente di effettuare sia prove a controllo di forza, che di spostamento o di deformazione. La base di misura dei compressimetri è pari a 100 mm. Inoltre, in aggiunta ai compressimetri sono stati installati sei comparatori digitali millesimali della Mitutoyo (mod. 543-250 B) con base di misura compresa tra 0 e 12.70 mm. Di questi tre sono stati impiegati per misurare gli spostamenti in direzione assiale controllando l'avvicinamento tra le piastre, mentre altri tre sono stati disposti in direzione radiale così da misurare gli spostamenti trasversali del provino (Fig. 5). I

valori degli spostamenti dei comparatori sono stati acquisiti mediante la centralina Mitutoyo, mod. DMX 16C. Tutte le prove sono state condotte a controllo di spostamento, con velocità di 0.15 mm/min, applicando un precarico di 40 kN per 60 secondi, al fine sia di uniformare i valori di spostamento dei comparatori millesimali e dei compressimetri che di evitare eventuali trazioni in corrispondenza delle superfici di contatto tra piastra della macchina e testa del provino.



Figura 5. Setup di prova ed acquisizione dati per i provini cilindrici fasciati.

4. RISULTATI SPERIMENTALI

I cilindri privi di rinforzo sono stati i primi ad essere portati a rottura al fine di determinare i valori del modulo elastico (E_{c0}) e della resistenza (f_{c0}).

Successivamente si sono eseguite le sei prove di compressione su altrettanti campioni di calcestruzzo, di cui tre rinforzati con due strati di PBO e tre invece rinforzati con tre avvolgimenti del pacchetto malta-fibra.

Nelle figure 6, 7, 8 e 9 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti, rispettivamente in termini di curve tensione-deformazione assiale (Figg. 6,7) e tensione-deformazione radiale (Figg. 8,9) per tutti i campioni testati.

Nella Tabella 3 sono riportati in forma sintetica i valori misurati delle grandezze di interesse. In particolare, si sono indicati con E_{c0} , f_{c0} , e ϵ_{c0} rispettivamente il modulo elastico, la resistenza massima e la deformazione assiale ultima del calcestruzzo non confinato; con f_{cc} , ϵ_{cc} e ϵ_{rc} la resistenza massima, la deformazione assiale ultima e la deformazione radiale dei provini fasciati; con t_f , lo spessore della fibra di PBO applicata e con ρ la percentuale geometrica di fibra. Dall'esame dei risultati sperimentali si evince

un considerevole incremento della resistenza massima dei campioni rinforzati, pari a circa il 20% nei provini rinforzati con due avvolgimenti di fibra ed al 50% nei campioni fasciati con tre strati di PBO, in cui è evidente il tratto incrudente post picco. L'incremento di deformazione ultima è certamente significativo, soprattutto nel caso di cilindri con tre avvolgimenti per il rinforzo.

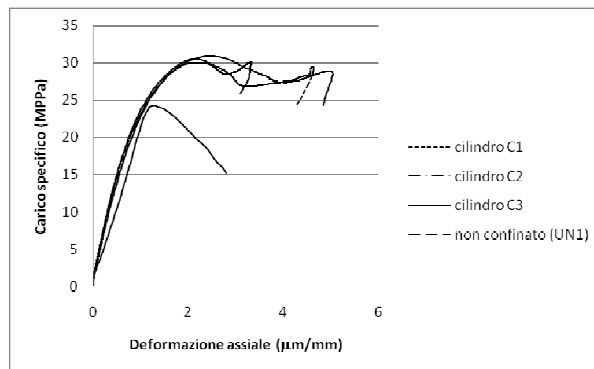


Figura 6. Curve sperimentali per campioni confinati con due strati di rinforzo PBO.

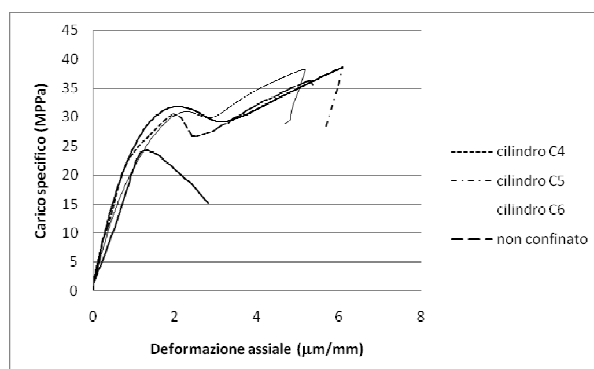


Figura 7. Curve sperimentali per campioni confinati con tre strati di rinforzo.

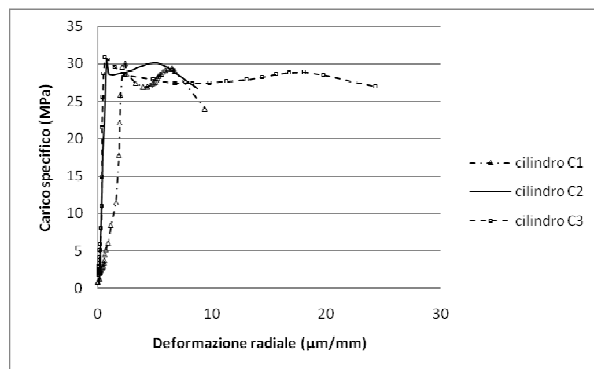


Figura 8. Curve sperimentali per campioni confinati con due strati di rinforzo PBO.

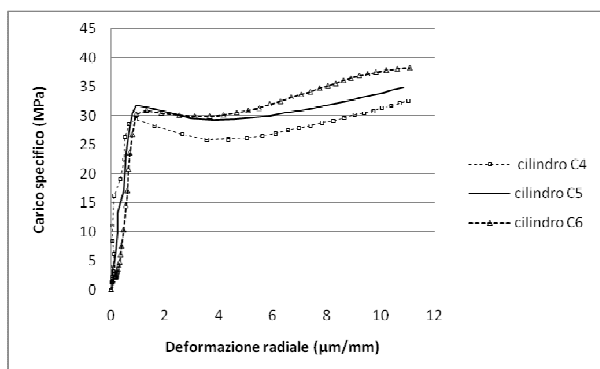


Figura 9. Curve sperimentali per campioni confinati con tre strati di rinforzo PBO.

Le prove condotte hanno mostrato che i provini confinati esibiscono un comportamento duttile fino alla rottura. Si rileva che il valore della deformazione ultima si attinge in corrispondenza di una tensione pressoché uguale a quella massima (nel caso di due avvolgimenti di PBO) o superiore (nei campioni fasciati con tre strati).

Le curve relative alla deformazione trasversale mostrano la notevole capacità di deformazione radiale indotta dalla presenza del rinforzo in PBO. Tali valori risultano superiori all'1%.

In funzione delle caratteristiche meccaniche della fibra di PBO è possibile stimare in modo approssimato la tensione media di rottura a trazione nella fibra medesima. Nell'ultima colonna della Tabella 3 sono riportati i valori ottenuti dalle prove effettuate, avendo indicato con ϵ_{rc} la deformazione radiale massima misurata sperimentalmente, la quale coincide in condizioni di simmetria radiale con la deformazione circonferenziale, e con σ_f il valore stimato di tensione di rottura della fibra. I valori ottenuti sono risultati quasi sempre inferiori a quelli dichiarati dalla ditta produttrice, per le ragioni che saranno discusse nel seguito.

Codice	E_{c0} (GPa)	f_{c0} (MPa)	ϵ_{c0} ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	ϵ_{rc} ($\mu\text{m}/\text{mm}$)
UN1	28.0	24.2	2.79			
UN2	28.0	24.2	2.79			
C1	28.0	24.2	2.79	30.07	4.63	9.71
C2	28.0	24.2	2.79	30.12	3.33	8.70
C3	28.0	24.2	2.79	28.92	5.03	24.31
C4	28.0	24.2	2.79	36.29	5.36	11.01
C5	28.0	24.2	2.79	38.53	6.76	10.83
C6	28.0	24.2	2.79	38.22	5.18	11.68

Codice	f_{ccu} (MPa)	f_{cc}/f_{c0}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{c0}$	t_f (mm)	ρ (%)	σ_f (MPa)
UN1						
UN2	15.24					
C1	29.10	1.24	1.66	0.0910	0.23	2621
C2	30.01	1.24	1.19	0.0910	0.23	2349
C3	28.45	1.19	1.80	0.0910	0.23	6563
C4	35.53	1.49	1.92	0.1365	0.35	2927
C5	38.53	1.58	2.42	0.1365	0.35	2924
C6	38.22	1.57	1.85	0.1365	0.35	3153

Tabella 3. Valori significativi dei risultati sperimentali.

5. MODALITA' DI ROTTURA E COMMENTI DEI RISULTATI

Tutti i campioni testati hanno mostrato simili modalità di rottura, manifestatasi a causa del tranciamento della fibra di PBO in corrispondenza della zona di sovrapposizione. Lo strappo della fibra è stato sempre preceduto dalla frattura dello strato più esterno della malta cementizia. L'esame delle curve sforzo-deformazione consente di formulare alcune considerazioni.

Nel primo ramo ascendente, fino al picco di tensione, si verifica un progressivo sgretolamento del nucleo di calcestruzzo confinato. Fino a questo punto il comportamento meccanico del provino è scarsamente influenzato dalle caratteristiche meccaniche del rinforzo.



Figura 10. Rottura per strappo della fibra.



Figura 11. Rottura per strappo della fibra con esplosione del nucleo di calcestruzzo.

La fase post-picco evidenzia un netto decadimento della rigidezza seguito da un immediato incrudimento dovuto all'attivazione del rinforzo e quindi del suo effetto di confinamento. Tale "ritardo" che genera il netto decadimento della resistenza del provino, è probabilmente dovuto ad un iniziale scorrimento relativo tra matrice e fibra che impedisce al PBO di esplicitare immediatamente la pressione di confinamento sulla superficie laterale del provino.

Segue quindi un tratto hardening, più o meno marcato in funzione della quantità di fibra impiegata, lungo il quale l'elemento raggiunge la sua massima portanza, deformandosi in modo duttile sino alla rottura dello strato esterno della malta di confinamento e, quindi, allo strappo delle fibre che raggiungono la propria tensione assiale di rottura in corrispondenza della zona di sovrapposizione.

Va tuttavia evidenziato che lo spessore complessivo del sistema malta cementizia-fibra cresce all'aumentare del numero di strati (nella sperimentazione effettuata si passa da spessori di 11 mm in presenza di due strati a spessori di 14 mm in presenza di tre strati); si forma, pertanto, un involucro abbastanza rigido esternamente al provino in cui il contributo offerto dalla malta cementizia diventa rilevante.

Infine, la ragione per cui la tensione di rottura effettiva a trazione della fibra risultata inferiore rispetto all'analogo valore nominale di 5.800 MPa, è da ascrivere verosimilmente a fenomeni di scorrimento della rete di fibra immersa nella malta ed alla prematura rottura o scollamento della rete nella zona di sovrapposizione, nonché al fatto che l'effettivo stato tensionale non è perfettamente monoassiale.

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro si sono presentati alcuni risultati di una campagna sperimentale attualmente in corso presso il laboratorio di Materiali e Strutture dell'Università di Messina su provini di calcestruzzo rinforzati con fasciatura in materiale composito immerso in matrice inorganica, sottoposti a compressione uniassiale monotonica. I test eseguiti a controllo di spostamento sui campioni cilindrici di calcestruzzo confinati con il sistema di rinforzo PBO, costituito da rete di fibra di carbonio annegata in malta cementizia inorganica, hanno mostrato un considerevole incremento di capacità portante e di duttilità conferito da tale sistema di rinforzo. In particolare, si è osservato che in funzione della quantità di fibra impiegata è possibile ottenere un comportamento costitutivo hardening nella fase

post picco, che porta ad una modalità di rottura di tipo duttile con valori di deformazione ultima che si attingono in corrispondenza dei massimi valori della tensione.

I risultati sperimentali conseguiti incoraggiano ad indagare in modo più massivo le prestazioni degli elementi rinforzati con FRCM al fine pervenire ad una formulazione analitica in grado di predirne il comportamento costitutivo sotto l'azione di carichi monotonicici.

7. BIBLIOGRAFIA

- [01] **L. DE LORENZIS, R. TEPFERS**, "Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites". Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 7 N° 3, 2003.
- [02] **G. CAMPIONE, P. COLAJANNI, L. LA MENDOLA, N. SPINELLA**, "Ductility of Reinforced Concrete Members Externally Wrapped with Fiber-Reinforced Polymer Sheets". Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 11 N° 3, 2007.
- [03] **G. MONTI**, Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP - Teheran, 22 Luglio 2003.
- [04] **L. OMBRES**, Influenza del sistema di rinforzo sul confinamento di elementi compressi in calcestruzzo rinforzato con FRP (Fiber Reinforced Polymers) 16° - Congresso C.T.E. Parma, 9-10-11 Novembre 2006
- [05] **R. CAIAZZA; RECUPERO A.; C.D. SCILIPOTI**, Collasso di Travi in c.a. per Taglio e Utilizzo di FRCM per l'Adeguamento. CRASC'06 - Convegno Nazionale - Università degli Studi di Messina 20-22 Aprile 2006

8. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano la RUREDIL SpA, nella persona del Dott. Mantegazza, per aver fornito le fibre MESH GOLD utilizzate per la sperimentazione.

Contatti con gli autori:

Fabrizio De Domenico: ingfdd@aliceposta.it
Natale Maugeri: nmaugeri@ingegneria.unime.it
Nino Spinella: spinella@ingegneria.unime.it

