

INFLUENZA DEL SISTEMA DI RINFORZO SUL CONFINAMENTO DI ELEMENTI COMPRESI IN CALCESTRUZZO RINFORZATO CON FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS)

LUCIANO OMBRES
Università della Calabria

SUMMARY

The behaviour of axially loaded concrete specimens reinforced with externally bonded fiber reinforced composite materials is analysed in the paper. Two different bonding techniques are considered in the analysis: the traditional FRP system in which unidirectional carbon fibres sheets are bonded to the concrete by organic resins, generally epoxy resin, and a system in which an overlay of carbon fiber meshes embedded into an inorganic stabilized cementitious matrix is bonded to the concrete. An experimental investigation is made to evaluate the influence of the bonding technique on the confinement of concrete elements. Obtained results are presented and discussed.

1. INTRODUZIONE

L'impiego di tessuti o lamine in materiale composito fibrorinforzato, FRP (Fiber Reinforced Polymers), per il confinamento di elementi in calcestruzzo costituisce una tecnica molto diffusa e consolidata sia per i notevoli vantaggi in fase di esecuzione (facilità e rapidità di messa in opera), sia per le buone prestazioni meccaniche offerte dagli elementi rinforzati (incremento della resistenza ultima e della duttilità).

La risposta strutturale degli elementi rinforzati è influenzata dallo stato tensionale e deformativo che si genera all'interfaccia tra calcestruzzo e rinforzo in materiale composito che a sua volta dipende dal sistema utilizzato per realizzare l'adesione tra i due materiali.

Il sistema di rinforzo più utilizzato è basato sull'impiego di una matrice in resina organica (in genere di tipo epossidico) e di lamine o nastri in fibra continua (carbonio, vetro, Kevlar); di recente sviluppo e commercializzazione è invece il sistema basato sull'uso di una matrice inorganica costituita da un legante idraulico pozzolanico e di reti di fibra (in genere carbonio).

Il presente lavoro è dedicato all'analisi del comportamento meccanico di elementi compressi in calcestruzzo rinforzati con i due sistemi di rinforzo prima descritti. L'analisi è sviluppata dal punto di vista sperimentale attraverso prove di compressione assiale su provini cilindrici e prismatici al variare dei parametri meccanici e geometrici coinvolti nel problema (resistenza a compressione del calcestruzzo, percentuale di rinforzo in composito, rapporto tra le dimensioni della sezione trasversale dei provini prismatici). I risultati della sperimentazione consentono di verificare l'influenza dei due sistemi di rinforzo sul comportamento meccanico del calcestruzzo confinato con materiale composito e, nel caso del sistema di rinforzo matrice cementizia- rete di fibra, di definire semplici relazioni analitiche in grado di interpretare la risposta del calcestruzzo confinato.

2. IL CONFINAMENTO DEL CALCESTRUZZO MEDIANTE FRP

L'efficacia del rinforzo in FRP sul confinamento del calcestruzzo è stata evidenziata dai risultati di numerose ricerche sperimentali disponibili in letteratura. La gran parte di tali ricerche fa riferimento al sistema di rinforzo fibraresina che, come noto, prevede l'impiego di resine organiche (di tipo epossidico, poliestere, vinilestere, etc.) rinforzate con fibre lunghe di carbonio, vetro o kevlar. L'azione di confinamento esercitata dal sistema è rilevante sia in termini di resistenza a compressione sia in termini di deformazione assiale e trasversale del calcestruzzo [01]. L'analisi dei risultati sperimentali ha consentito di evidenziare che il confinamento è fortemente influenzato dalle caratteristiche meccaniche delle fibre di rinforzo e dalle dimensioni geometriche delle sezioni trasversali degli elementi confinati. Valori significativi del grado di confinamento si ottengono per sezioni circolari, quadrate e rettangolari in cui il rapporto tra i lati è inferiore a 2. Il confinamento è efficace se la lunghezza di sovrapposizione degli starti di fibra è adeguata e tale da impedire pericolosi fenomeni di rottura prematura. Il tipo di resina utilizzato non influenza in modo apprezzabile il grado di confinamento del calcestruzzo.

Numerose sono anche le formulazioni analitiche del legame costitutivo del calcestruzzo confinato con il sistema resina-fibra; molte di esse sono state ottenute a partire dalle relazioni adoperate per lo studio del calcestruzzo confinato con acciaio modificate

attraverso opportuni coefficienti tarati in base ai risultati sperimentali. In particolare indicando con f'_{c0} ed ε'_{c0} il valore di picco della resistenza a compressione e la corrispondente deformazione del calcestruzzo confinato e con f_{c0} ed ε_{c0} il valore di picco della resistenza a compressione e la corrispondente deformazione del calcestruzzo non confinato, le relazioni analitiche proposte in letteratura sono del tipo

$$f'_{c0}/f_{c0} = 1 + k_1 (p_u/f_{c0})^m \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{c0}/\varepsilon_{c0} = 1 + k_2 (p_u/f_{c0})^n \quad (2)$$

dove p_u è il valore a rottura della pressione di confinamento del rinforzo il cui valore dipende dalla forma della sezione trasversale dell'elemento confinato, k_1 , k_2 , m ed n sono coefficienti di natura sperimentale. Formulazioni analoghe sono riportate nelle normative che regolano l'impiego degli FRP nel rinforzo delle strutture in calcestruzzo; ad esempio le recenti Istruzioni CNR-DT200/2004 [02] utilizzano la (1) con $k_1=2.6$ ed $m=2/3$.

Nonostante i rilevanti benefici sul confinamento del calcestruzzo, l'uso di resina organica nel sistema di rinforzo favorisce l'insorgere di alcune problematiche spesso di difficile soluzione. In particolare la resina organica presenta un comportamento deficitario al variare della temperatura (sia per bassi valori che per alti valori di temperatura si ha una sensibile riduzione delle proprietà meccaniche), non è sempre compatibile con il materiale costituente il substrato su cui il sistema di rinforzo dovrà essere applicato, è vulnerabile agli atti vandalici e presenta costi elevati.

Tali problemi possono essere eliminati o drasticamente ridotti utilizzando un sistema di rinforzo costituito da resina inorganica e fibra di rinforzo. A tale tipologia di rinforzo appartengono i sistemi che utilizzano una matrice di natura cementizia rinforzata con una rete di fibra continua (in genere in carbonio). La compatibilità matrice cementizia-calcestruzzo unitamente alla buona resistenza all'effetto della temperatura, rende tale sistema particolarmente efficace per il rinforzo del calcestruzzo sottoposto a condizioni ambientali gravose (basse temperature, incendi, etc.). L'impiego di tale sistema di rinforzo in alternativa al sistema resina-fibra impone la necessità di analisi, soprattutto di tipo sperimentale, in grado di individuarne l'efficacia. Attualmente sono disponibili pochi dati sperimentali relativi al confinamento del calcestruzzo mediante l'uso del sistema malta cementizia-rete di fibra e pertanto non sufficienti per poter stabilire le prestazioni e l'efficacia del sistema [03]. Sulla base di questi primi risultati si può, tuttavia, ritenere che il grado di confinamento fornito dal sistema è in molti casi paragonabile con quello ottenuto mediante l'utilizzo del sistema resina-fibra. La necessità di ulteriori indagini sperimentali è pertanto fondamentale sia per verificare l'efficacia del sistema di rinforzo sia per trarre utili indicazioni ai fini progettuali.

3. INDAGINE SPERIMENTALE

Per la valutazione del comportamento meccanico di elementi in calcestruzzo confinati con FRP, è stata programmata ed in parte eseguita una campagna sperimentale. Sono stati utilizzati i due sistemi di rinforzo precedentemente descritti: il tradizionale rinforzo con matrice organica, costituita da resina epossidica, ed il sistema basato sull'impiego di una matrice inorganica, costituita da un legante idraulico pozzolanico. Le finalità della sperimentazione sono state quelle di confrontare la risposta del calcestruzzo al variare del sistema di rinforzo e di analizzare l'efficacia sul confinamento del sistema matrice cementizia-rete di fibra.

L'indagine è stata eseguita su tre tipologie di provini; provini di forma cilindrica con diametro 150 mm, provini prismatici con sezione quadrata di lato 150 mm e sezione rettangolare con dimensioni 150 mm x 300 mm; tutti i provini sono di altezza pari a 300 mm.

Complessivamente sono stati rinforzati e sottoposti a prova 47 provini di cui 7 con sezione rettangolare, 10 con sezione quadrata e 33 con sezione circolare. Tutti i provini quadrati e rettangolari e 24 provini cilindrici sono stati rinforzati con il sistema malta cementizia-rete di fibra (Sistema X-MESH C10 - Ruredil S.p.A.) [04] mentre 9 dei provini cilindrici sono stati rinforzati con il sistema resina organica-fibra. Sia la rete di fibra che la fibra unidirezionale dei due sistemi di rinforzo sono in carbonio.

In tutti i provini il rinforzo è stato interrotto a circa 5 mm dalle facce poste a contatto con la pressa per evitare la diretta applicazione del carico sul sistema di rinforzo. Gli spigoli dei provini a sezione quadrata e rettangolare sono stati arrotondati con raggio di curvatura $r=2$ cm per evitare concentrazioni di tensione ed eventuali rotture premature del sistema.

2.1. Materiali

La resistenza a compressione del calcestruzzo utilizzato per realizzare le tre tipologie di provini è stata determinata sperimentalmente, attraverso prove standard di compressione su cubetti di lato pari a 150 mm. I valori medi ottenuti sono riportati nelle Tabelle 1-3 in corrispondenza di ciascun gruppo di provini.

La resistenza a flessione media della malta utilizzata per realizzare la matrice cementizia, determinata mediante prove di flessione su tre punti, è risultata pari a 5.05 MPa.

Le caratteristiche meccaniche del rinforzo fibroso sia unidirezionale sia con rete di fibra sono state determinate attraverso prove di trazione su provini confezionate utilizzando la resina come legante. I valori sono riportati nelle Tabelle 1-3.

2.2. Set-up della prova

I provini sono stati sottoposti a prove di compressione centrata. Gli spostamenti verticali e trasversali dei provini sono stati misurati mediante trasduttori (tre nella direzione assiale, tre nella direzione trasversale).



Figura 1. Set-up prove di compressione

3. RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguito sono descritti i principali risultati ottenuti dalle prove sperimentali condotte.

i) provini cilindrici

La sperimentazione è stata condotta su 41 provini cilindrici di cui 2 non confinati, 9 confinati con il sistema resina epossidica-fibra unidirezionale in carbonio ad alto modulo elastico e 30 confinati con il sistema malta cementizia-rete di fibra in carbonio (Sistema X MESH C10). Il quantitativo di fibra di rinforzo ovvero del numero di strati di avvolgimento adoperati per il confinamento dei cilindrici è variabile così come indicato in Tabella 1.

Le modalità di rottura dei provini sono risultate differenti a seconda del tipo di rinforzo utilizzato. Il collasso dei provini rinforzati con il sistema resina-fibra è avvenuto in maniera violenta ed improvvisa a seguito della rottura dello strato di fibra e dello scollamento dal calcestruzzo; il calcestruzzo è risultato notevolmente danneggiato (Fig. 2). La rottura dei provini confinati con il sistema malta cementizia-rete di fibra è invece avvenuta in modo graduale; raggiunta la resistenza a rottura del calcestruzzo si è attivato il confinamento con lo sgretolamento della malta, la formazione di fessure verticali e rottura o scollamento delle fibre in corrispondenza di tali fessure. In tal caso il sistema di confinamento ha consentito di evitare la frantumazione e l'espulsione del calcestruzzo come avviene in assenza di confinamento.



Figura 2. Rottura dei provini cilindrici

Entrambi i sistemi di rinforzo consentono di ottenere incrementi della resistenza a compressione del calcestruzzo; tali incrementi sono legati al quantitativo di rinforzo utilizzato per realizzare il confinamento. Dai risultati riportati in Tabella 1 si evince che i valori del rapporto f'_{c0}/f_{c0} sono più elevati nel caso di rinforzo realizzato con il sistema resina-fibra; va tuttavia osservato che il quantitativo di fibra di rinforzo utilizzato nel sistema malta cementizia-rete di fibra è più basso rispetto a quello utilizzato nel sistema resina-fibra. Lo spessore della rete in carbonio è, infatti, pari a 0.047 mm, come indicato dal produttore, mentre lo spessore del nastro con fibre unidirezionali è pari a 0.221 mm. E' pertanto evidente che per ottenere un maggiore incremento della capacità resistente dei provini è necessario disporre più strati di rete di CFRP. A conferma di ciò, analizzando i risultati ottenuti su provini confinati con malta cementizia rinforzata con 3 strati di rete di fibra per i quali lo spessore totale del rinforzo è pari a 0.141 mm, si osserva che il rapporto f'_{c0}/f_{c0} varia tra 1.33 ed 1.68; tali valori sono stati ottenuti nei provini confinati con il sistema resina-fibra con spessori del rinforzo in fibra pari a 0.442 mm (2 strati di fibra unidirezionale ad alto modulo). Va tuttavia evidenziato che lo spessore complessivo del sistema malta cementizia-rete di fibra cresce all'aumentare del numero di strati (nella sperimentazione effettuata si passa da spessori di 5 mm in presenza di uno strato di rete di fibra a spessori di 7 mm in presenza di due strati e di 12 mm in presenza di 4 strati); si forma pertanto un involucro rigido esterno al provino in cui il contributo offerto dalla malta cementizia è rilevante. Al contrario nel sistema resina-fibra la variazione di spessore con il numero di avvolgimenti è irrilevante ed il contributo irrigidente della resina è modesto. Nei provini rinforzati con il sistema malta cementizia-rete di fibra sono stati misurati valori del rapporto $\epsilon'_{c0}/\epsilon_{c0}$ più elevati di quelli ottenuti per i provini confinati con il sistema resina-fibra. Tale risultato evidenzia un comportamento più duttile del calcestruzzo confinato con il sistema malta cementizia-rete di fibra. Nelle Figure 3 e 4 sono riportati, per i soli provini rinforzati con il sistema malta cementiziarrete di fibra i diagrammi carico - spostamento assiale e carico -spostamento trasversale al variare del quantitativo di rete di fibra.

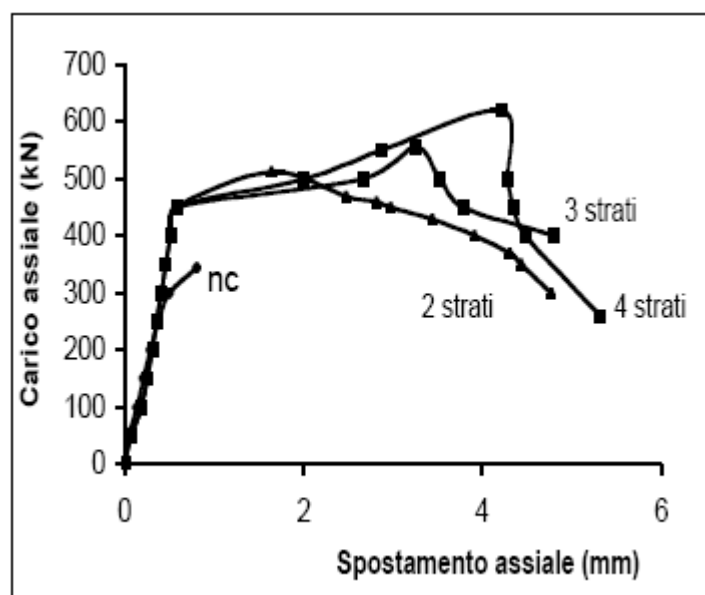


Figura 3. Provini cilindrici: Curve Carico assiale-spostamento assiale

Analizzando le curve riportate nelle figure si evince che all' aumentare del numero di strati di rete di fibra aumentano sia la capacità portante sia la duttilità dei provini. La pendenza del secondo tratto è identica per tutte le curve e quindi è indipendente dal quantitativo di fibra di rinforzo.

Nella Tabella 4 sono riportati i valori della duttilità dei provini calcolata con la relazione $\mu = A_{tot}/A_{eq}$ essendo A_{tot} l'area racchiusa dal diagramma tensione-deformazione assiale ed A_{eq} l'area racchiusa dal diagramma convenzionale tensione-deformazione assiale di tipo bilatero avente il primo tratto lineare fino ad f'_{c0} ed il secondo tratto orizzontale fino al valore della deformazione ultima del calcestruzzo [05]. Come si può osservare il valore di μ cresce con il quantitativo di rete di rinforzo ed i valori sono prossimi all'unità. Nella Tabella 4 sono riportati anche gli incrementi percentuali di resistenza al variare del quantitativo di fibra di rinforzo; i valori ottenuti mostrano un incremento pressoché lineare di resistenza al variare del quantitativo di rinforzo.

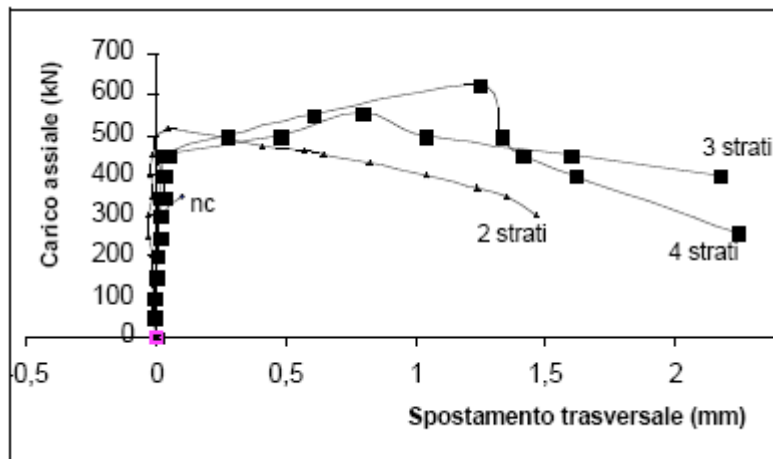


Figura 4. Provini cilindrici: Curve Carico assiale - spostamento trasversale

ii) provini con sezione quadrata

Sono stati sottoposti a prova 12 provini con sezione quadrata di lato 150 mm ed altezza 300 mm di cui 2 provini non confinati ed i restanti rinforzati con il sistema malta cementizia-rete di fibra al variare del numero di strati di rete di fibra così come indicato nella Tabella 2. Nel provino rinforzato con un solo strato di fibra a causa dell'esiguo quantitativo di rinforzo non si è manifestato l'effetto di confinamento. Il confinamento è risultato invece significativo negli altri casi come evidenziato nelle Figure 5 e 6 in cui al variare del numero di strati di rete di rinforzo sono riportate le curve carico -spostamento assiale e carico assiale-spostamento trasversale.

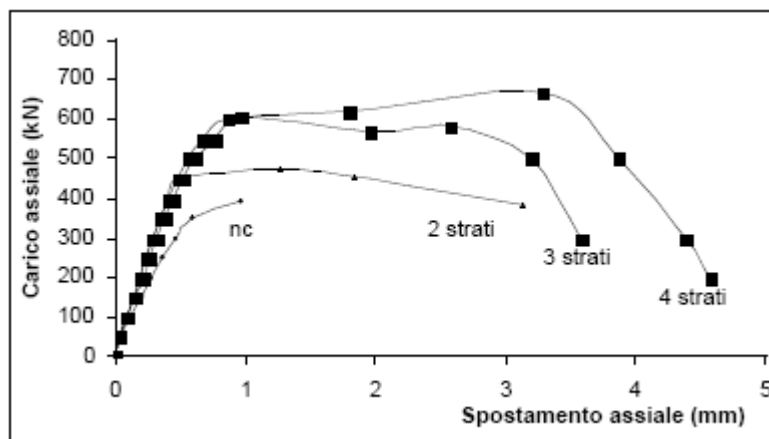


Figura 5. Provini con sezione quadrata: curve carico-spostamento assiale

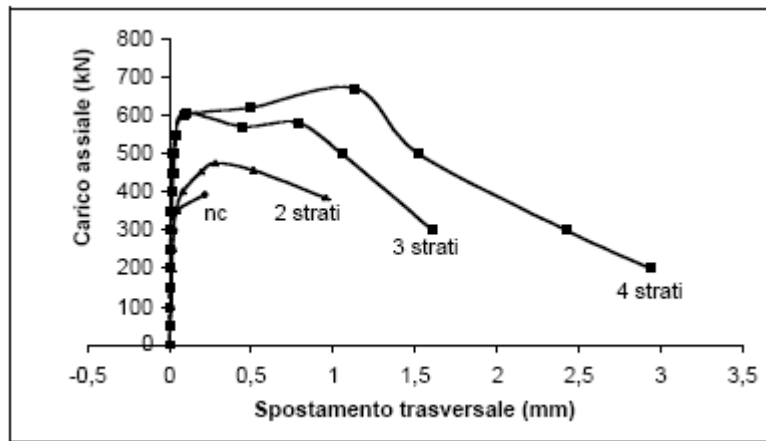


Figura 6. Provini con sezione quadrata: curve carico-spostamento trasversale

L'analisi dei risultati evidenzia un incremento della resistenza e della duttilità al crescere del quantitativo di rinforzo; gli incrementi più rilevanti si hanno passando dal rinforzo con due strati (incremento rispetto al calcestruzzo non confinato pari al 21.1%) al rinforzo con tre strati (incremento rispetto al calcestruzzo non confinato pari al 54.5%). Il valore della duttilità è risultato pari a $\mu=0.97$ per tutti i provini (Tabella 4).

iii) provini con sezione rettangolare

Sono stati sottoposti a prova 8 provini prismatici con sezione rettangolare di dimensioni 150 x 300 mm ed altezza 300 mm, di cui 1 provino non confinato e 7 provini confinati con 1, 2 e 3 strati di rete di fibra di carbonio come indicato nella Tabella 3. Gli effetti di confinamento sono risultati significativi solo per i provini rinforzati con due e tre strati di rete di fibra. La rottura dei provini è avvenuta in maniera graduale a seguito della formazione di fessure verticali nella malta e rottura o scollamento della rete di fibra (Fig. 7). I risultati ottenuti, riportati nella Tabella 3, sono poco significativi dal punto di vista dell'incremento della capacità portante che è risultato modesto e compreso tra il 5.4% (rinforzo con un solo strato) ed il 24.3 % (rinforzo con tre strati di rete di fibra). Il valore della duttilità è risultato pari a 0.93 per tutti i provini indipendentemente dal quantitativo di rinforzo.



Figura 7. Rottura dei provini prismatici

Sezione	Strati di rete	Incremento di resistenza (%)	Duttilità
Circolare	2	48,50	0,92
Circolare	3	61,00	0,97
Circolare	4	79,70	0,98
Quadrata	1	15,00	0,97
Quadrata	2	21,00	0,97
Quadrata	3	54,50	0,97
Quadrata	4	70,70	0,98
Rettangolare	1	5,40	0,93

Rettangolare	2	12,90	0,93
Rettangolare	3	24,30	0,94

Tabella 4. Incrementi di resistenza e duttilità dei provini al variare del quantitativo di rinforzo

4. ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati ottenuti mediante la sperimentazione sui provini rinforzati con il sistema malta cementizia-rete di fibra, può consentire la definizione di opportune relazioni analitiche in grado di predire la risposta strutturale del calcestruzzo confinato. Nel seguito vengono analizzati i dati relativi ai soli provini con sezione circolare e quadrata; non vengono presi in esame i dati relativi ai provini con sezione rettangolare poiché in numero esiguo e quindi poco significativi. Per la stessa ragione l'analisi è riferita solo alle resistenze e non vengono considerate le deformazioni.

Nelle Figure 8 e 9 sono riportati i punti che definiscono la relazione tra il rapporto di resistenza f'_{c0}/f_{c0} ed il rapporto di confinamento p_u/f_{c0} per i provini con sezione circolare ed i provini con sezione quadrata.

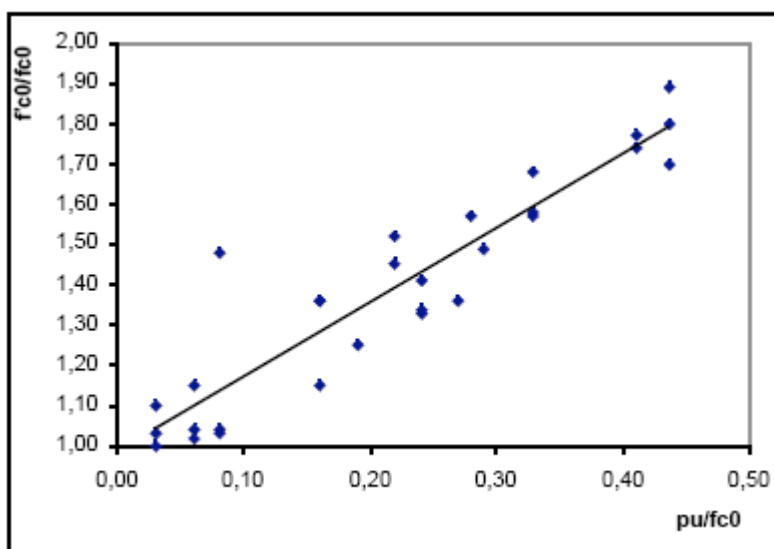


Figura 8. Provini cilindrici

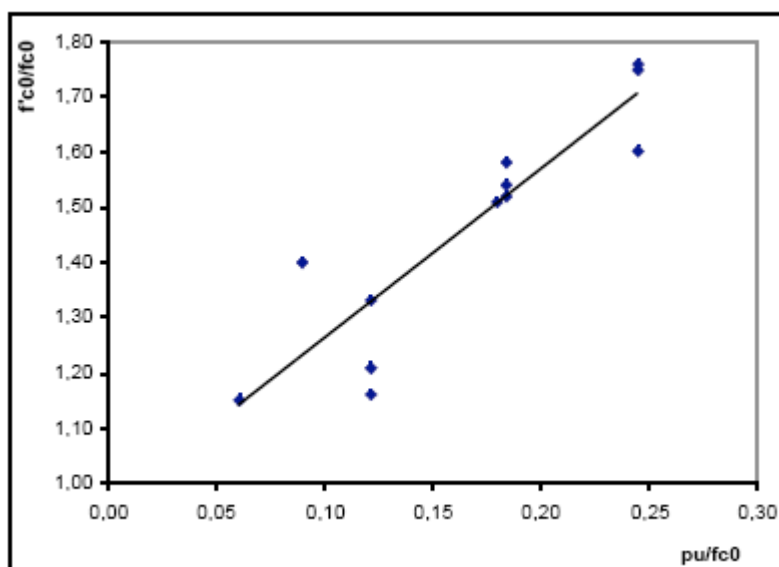


Figura 9. Provini con sezione quadrata

Nelle Figure sono riportate anche le rette di interpolazione dei dati sperimentali che possono essere considerate come rappresentative del legame tra le due grandezze e le cui equazioni possono definire delle semplici relazioni, analoghe alla (1), da utilizzare per predire il comportamento del calcestruzzo confinato con il sistema malta cementizia-rete di fibra. In particolare le suddette relazioni sono:

$$f'_{c0}/f_{c0} = 0,99 + 1,83(p_u/f_{c0}) \quad (3)$$

per i provini cilindrici ($R^2=0,86$)

$$f'_{c0}/f_{c0} = 0,86 + 3,48(p_u/f_{c0}) \quad (4)$$

per i provini con sezione quadrata ($R^2=0,89$).

Tali relazioni, definite con riferimento ai dati a disposizione non numerosi, possono costituire solo una base di partenza per successive verifiche e miglioramenti da eseguire sulla base di un più elevato numero di dati sperimentali.

5. CONCLUSIONI

Nel lavoro è stata analizzata l'influenza del sistema di rinforzo sul confinamento di elementi in calcestruzzo rinforzati con materiale composito (FRP). I risultati ottenuti evidenziano che:

- il rinforzo degli elementi compressi in calcestruzzo con sistemi basati sull'impiego di materiali compositi consente di realizzare un elevato grado di confinamento sia in termini di resistenza che in termini di duttilità;
- il sistema di rinforzo malta cementizia-rete di fibra costituisce una valida alternativa al sistema resina-fibra nel confinamento del calcestruzzo sia perché consente di eliminare alcune deficienze relative alle prestazioni delle resine (soprattutto quelle legate agli effetti della temperatura) sia perché, a parità di quantitativo di rinforzo in fibra, consente di ottenere incrementi di resistenza simili (in alcuni casi anche superiori) a quelli ottenuti utilizzando il sistema resina-fibra accompagnati da elevati valori di duttilità;
- nella modellazione teorica del confinamento del calcestruzzo mediante il sistema malta cementizia-rete di fibra è possibile utilizzare semplici relazioni analitiche quali quelle lineari dedotte in base all'analisi dei dati sperimentali descritta nel lavoro.

6. BIBLIOGRAFIA

[01] TENG J.G., CHEN J.F., SMITH, S.T., LAM L. "FRP strengthened RC structures" Wiley & Sons, Ltd, 2002.

[02] CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati-Materiali, strutture in c.a. e in c.a.p., strutture murarie," 2004.

[03] TRIANTAFILLOU T. "Recent developments in strengthening of concrete structures with advanced composites: textile-reinforced mortar (TMR) jacketing" Proceedings of the International Conference on Structural Composites for Infrastructure Applications, Alexandria, Egypt, 2005.

[04] RUREDIL S.p.A., "X MESH C10 M50", Schede Tecniche.

[05] ROCHETTE P, LABOSSIÈRE P. "Axial testing of rectangular column models confined with composites" Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 4, No 3, 129-136, 2000.

Contatti con gli autori:

Luciano Ombres: l.ombres@strutture.unical.it

ALLEGATI

DATI		GEOMETRIA			PROPR. COMPOSITO FRP			PROPRIETA' DEL CLS			PROPRIETA' DEL CONFINAMENTO			RISULTATI SPERIMENTALI			
Sigla provino	Sist rinf	D (mm)	d (mm)	nt (mm)	Ef (MPa)	ffu (MPa)	efu (%)	fco (MPa)	εco (%)	Eco (MPa)	EI (MPa)	pu (Mpa)	pu/ fco	f'c0 (Mpa)	f'c0/ fco	ε' c0 (%)	ε' c0/ εco
HCR1a	Malta/ rete	150	300	0,047	240000	3404	1,418	67,1	-	-	150	2,13	0,03	69,17	1,03	0,553	-
HCR1b		150	300	0,047	240000	3404	1,418	67,1	-	-	150	2,13	0,03	73,98	1,1	0,887	-
HCR1c		150	300	0,047	240000	3404	1,418	67,1	-	-	150	2,13	0,03	67,4	1	-	-
HCR2a		150	300	0,094	240000	3404	1,418	67,1	-	-	301	4,27	0,06	68,24	1,02	0,862	-
HCR2b		150	300	0,094	240000	3404	1,418	67,1	-	-	301	4,27	0,06	76,98	1,15	0,617	-

HCR2c		150	300	0,094	240000	3404	1,418	67,1	-	-	301	4,27	0,06	70,1	1,04	-	-
CR1a	Malta/ rete	150	300	0,047	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	150	2,13	0,08	40,03	1,48	0,13	0,65
CR1b		150	300	0,047	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	150	2,13	0,08	27,87	1,03	0,16	0,8
CR1c		150	300	0,047	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	150	2,13	0,08	28,2	1,04	-	-
CR2a		150	300	0,094	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	301	4,27	0,16	36,83	1,36	0,166	0,83
CR2b		150	300	0,094	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	301	4,27	0,16	31,1	1,15	0,174	0,87
CR2c		150	300	0,094	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	301	4,27	0,16	36,69	1,36	-	-
CR3a		150	300	0,141	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	451	6,4	0,24	35,95	1,33	0,238	1,19
CR3b		150	300	0,141	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	451	6,4	0,24	38,13	1,41	0,224	1,12
CR3c		150	300	0,141	240000	3404	1,418	27,05	0,2	20544	451	6,4	0,24	36,3	1,34	-	-
CR-2a		Malta/ rete	150	300	0,094	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	300,8	4,27	0,22	29,65	1,52	0,53
CR-2b	150		300	0,094	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	300,8	4,27	0,22	28,34	1,45	0,56	3,42
CR-2c	150		300	0,094	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	300,8	4,27	0,22	-	-	-	-
CR-3a	150		300	0,141	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	451,2	6,4	0,33	30,57	1,57	0,63	3,8
CR-3b	150		300	0,141	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	451,2	6,4	0,33	30,85	1,58	1,42	8,59
CR-3c	150		300	0,141	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	451,2	6,4	0,33	32,88	1,68	1,21	7,32
CR-4a	150		300	0,188	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	601,6	8,53	0,44	33,18	1,7	1,21	7,36
CR-4b	150		300	0,188	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	601,6	8,53	0,44	35,12	1,8	1,31	7,94
CR-4c	150		300	0,188	240000	3404	1,418	19,42	0,165	25183	601,6	8,53	0,44	36,97	1,89	1,68	10,2
CS1a	Fibra/ resina		150	300	0,221	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	1155	6,93	0,26	39,23	1,45	0,172
CS1b		150	300	0,221	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	1155	6,93	0,26	38,19	1,41	0,184	0,92
CS1c		150	300	0,221	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	1155	6,93	0,26	36,3	1,34	-	-
CS2a		150	300	0,442	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	2310	13,86	0,51	50,48	1,87	0,24	1,2
CS2b		150	300	0,442	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	2310	13,86	0,51	47,6	1,76	0,21	1,05
CS2c		150	300	0,442	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	2310	13,86	0,51	43,7	1,62	-	-
CS3a		150	300	0,663	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	3465	20,79	0,77	45,1	1,67	0,424	2,12
CS3b		150	300	0,663	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	3465	20,79	0,77	58,08	2,15	0,502	2,51
CS3c		150	300	0,663	392000	2740	0,6	27,05	0,2	20544	3465	20,79	0,77	56	2,07	-	-

Tabella 1. Provini cilindrici: proprietà geometriche, caratteristiche meccaniche dei materiali e risultati sperimentali

DATI		GEOMETRIA			PROPR. COMPOSITO FRP			PROPRIETA' DEL CLS			PROPRIETA' DEL CONFINAMENTO			RISULTATI SPERIMENTALI			
Sigla provino	Sist rinf	D (mm)	d (mm)	nt (mm)	Ef (MPa)	ffu (MPa)	εfu (%)	fco (MPa)	εco (%)	Eco (MPa)	El (MPa)	pu (Mpa)	pu/fco	f'c0 (Mpa)	f'c0/fco	ε' c0 (%)	ε' c0/εco
R-11	Malta/ rete	150	300	0,047	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	75	1,07	0,06	20,02	1,15	0,47	2,36
R-12		150	300	0,094	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	150	2,13	0,12	23,11	1,33	0,62	3,08
R-13		150	300	0,094	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	150	2,13	0,12	21,06	1,21	0,52	2,58
R-14		150	300	0,094	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	150	2,13	0,12	20,22	1,16	0,61	3,04
R-24		150	300	0,141	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	226	3,2	0,18	26,41	1,52	0,3	1,51
R-25		150	300	0,141	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	226	3,2	0,18	26,75	1,54	0,4	2
R-26		150	300	0,141	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	226	3,2	0,18	27,54	1,58	0,32	1,6
R-27		150	300	0,188	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	301	4,27	0,24	30,56	1,75	1,02	5,1
R-28		150	300	0,188	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	301	4,27	0,24	27,89	1,6	1	4,99
R-29		150	300	0,188	240000	3404	1,418	17,42	0,2	23790	301	4,27	0,24	30,74	1,76	1,26	6,31

Tabella 2. Provini prismatici con sezione quadrata: proprietà geometriche, caratteristiche meccaniche dei materiali e risultati sperimentali

DATI		GEOMETRIA			PROPR. COMPOSITO FRP			PROPRIETA' DEL CLS			PROPRIETA' DEL CONFINAMENTO			RISULTATI SPERIMENTALI			
Sigla provino	Sist rinf	D (mm)	d (mm)	nt (mm)	Ef (MPa)	ffu (MPa)	εfu (%)	fco (MPa)	εco (%)	Eco (MPa)	El (MPa)	pu (Mpa)	pu/fco	f'c0 (Mpa)	f'c0/fco	ε' c0 (%)	ε' c0/εco
HCR1a	Malta/ rete	150	300	0,047	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	38	0,53	0,02	28,5	1,05	0,14	1,04
HCR1b		150	300	0,047	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	38	0,53	0,02	-	-	-	-
HCR2a		150	300	0,094	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	75	1,07	0,04	30,53	1,13	0,39	3
HCR2b		150	300	0,094	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	75	1,07	0,04	04	-	-	-
HCR3a		150	300	0,141	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	113	1,6	0,06	34,44	1,27	0,83	6,38
HCR3b		150	300	0,141	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	113	1,6	0,06	33,33	1,23	0,57	4,38
HCR3c		150	300	0,141	240000	3404	1,418	27,05	0,13	20544	113	1,6	0,06	32,22	1,19	0,52	4

Tabella 3. Provini prismatici con sezione rettangolare: proprietà geometriche, caratteristiche meccaniche dei materiali e risultati sperimentali

B, H = dimensioni della sezione; D, d = diametro ed altezza del cilindro; nt=spessore complessivo del rinforzo in fibra (n=numero di strati, t=spessore del singolo strato); E_f , f_{fu} , ϵ_f = modulo di elasticità, resistenza a rottura e deformazione ultima del composito; E_{c0} , f_{c0} , ϵ_{c0} = modulo di elasticità, resistenza a rottura e deformazione ultima del calcestruzzo non confinato; E_1 =modulo di confinamento; p_u =pressione laterale di confinamento; f'_{c0} = resistenza a rottura del calcestruzzo confinato; ϵ'_{c0} = deformazione del calcestruzzo confinato corrispondente ad f'_{c0} .