

Modalità di crisi di elementi in calcestruzzo armati con barre in FRP

Andrea Acciai¹, Raffaele Nudo¹

¹*Dipartimento di Costruzioni, Università di Firenze, Italia*
E-mail: raffaele.nudo@unifi.it

Keywords: calcestruzzo, elementi inflessi, barre in FRP, sperimentazione, modalità di crisi.

SUMMARY. Le barre in materiale composito fibro-rinforzato (FRP) rappresentano oggi una possibile alternativa alle barre tradizionali in acciaio e ciò a causa dei problemi di durabilità che queste ultime inducono negli elementi in calcestruzzo armato esposti ad ambiente aggressivo. Tuttavia, le caratteristiche meccaniche dei materiali compositi, abbinata a quelle del calcestruzzo, possono causare anomalie di comportamento sia in fase ultima che in condizioni di esercizio. Allo scopo di indagare le modalità di crisi di elementi inflessi in calcestruzzo armati con barre longitudinali in FRP e privi di armatura a taglio, è stato sviluppato un programma sperimentale presso il Dipartimento di Costruzioni dell'Università di Firenze. Il programma ha interessato sedici campioni, caratterizzati da diverse variabili di studio quali la geometria della sezione, la resistenza del calcestruzzo ed il tipo di armatura. In particolare, oltre ad elementi armati con barre in materiale composito rinforzato con fibra di vetro (GFRP) e di carbonio (CFRP), sono stati confezionati anche campioni armati con barre in acciaio, a scopo di confronto. I risultati sperimentali hanno evidenziato differenti modalità di crisi con meccanismi governati, in alcuni casi, dallo sforzo di taglio. E' stato altresì analizzato il comportamento dei campioni per livelli di carico corrispondenti a condizioni di esercizio.

1 INTRODUZIONE

Com'è noto, le membrature in calcestruzzo armate con barre tradizionali in acciaio presentano problemi di durabilità, specialmente se esposte a condizioni ambientali aggressive come accade, ad esempio, in ambiente marino. Per tale ragione negli ultimi anni è stata dedicata grande attenzione, da parte della comunità tecnica e scientifica, alla possibilità d'utilizzo di materiali compositi con fibre di rinforzo (FRP) per la realizzazione di barre d'armatura. I vantaggi di tali materiali sono essenzialmente connessi alla loro elevata resistenza meccanica, alla resistenza alla corrosione ed al basso peso. Altre caratteristiche tipiche sono il basso modulo d'elasticità, il comportamento elastico-lineare fino a rottura in assenza di un'apprezzabile fase plastica e le ridotte capacità d'aderenza. Tali ultime proprietà determinano solitamente problemi in condizioni di esercizio a causa di deformazioni consistenti e di quadri fessurativi poco diffusi e con lesioni ampie [1, 2]. La rilevanza del problema ha fatto sì che numerose ricerche teoriche e sperimentali siano state dedicate al problema dell'aderenza delle barre in FRP; in particolare, molti studi sono stati rivolti alla valutazione della relazione esistente tra efficacia dell'aderenza e resistenza del calcestruzzo [3], senza tuttavia pervenire a conclusioni definitive. Altri studi ancora hanno messo in evidenza il problema della concentrazione tensionale nelle barre in FRP connessa ad elevate tensioni d'aderenza [4]; tale fenomeno può determinare una crisi prematura della barra in FRP al contrario di quanto accade nelle armature tradizionali in acciaio per le quali il fenomeno risulta attenuato dalla duttilità del materiale.

Qualora siano adottati gli opportuni accorgimenti atti a scongiurare l'insorgere di meccanismi

dovuti a problemi d'aderenza, è tuttavia necessario contemplare la possibilità di sviluppo di modalità di crisi connesse alle proprietà meccaniche di calcestruzzo ed FRP, necessariamente a connotazione fragile. Tali caratteristiche determinano, tra l'altro, una incompatibilità tra la tecnologia in oggetto ed un comportamento di tipo duttile il quale, com'è noto, costituisce spesso un requisito imprescindibile per le membrature costituenti le strutture sismo-resistenti. Per i suddetti motivi le applicazioni più frequenti di armature in materiale composito hanno finora riguardato elementi delle strutture d'impalcato, quali travetti di solaio e piastre a semplice o doppia orditura. Si tratta quindi di strutture secondarie, presidiate unicamente da armature longitudinali e pertanto con possibilità di innesco di meccanismi di crisi in cui la sollecitazione di taglio gioca un ruolo determinante [5, 6].

Il lavoro qui proposto intende indagare la risposta in fase ultima di elementi in calcestruzzo armati con barre longitudinali in FRP e privi di armature a taglio. A tal fine sono presentati i risultati di un programma sperimentale sviluppato presso il Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Costruzioni dell'Università degli Studi di Firenze. Il programma ha interessato un totale di sedici campioni, provati in condizioni di carico monotono fino a rottura. Le variabili indagate sono state: 1) il tipo di armatura (sono state utilizzate barre in materiale composito rinforzato con fibre di vetro e di carbonio, oltre a barre tradizionali in acciaio); 2) la resistenza del calcestruzzo (sono stati adoperati calcestruzzi di resistenza rapportata alle proprietà meccaniche delle barre d'armatura); 3) la geometria della sezione (i campioni presentavano 2 tipi di sezione: $b \times h = 10 \times 20$ cm, sezione rappresentativa di un travetto di solaio; $b \times h = 20 \times 10$ cm, sezione rappresentativa di una porzione di piastra in calcestruzzo con armatura monodirezionale). Tutti i campioni presentavano una zona d'ancoraggio supplementare al di là dei vincoli di semplice appoggio, al fine di scongiurare la possibilità di una crisi connessa a problemi d'aderenza.

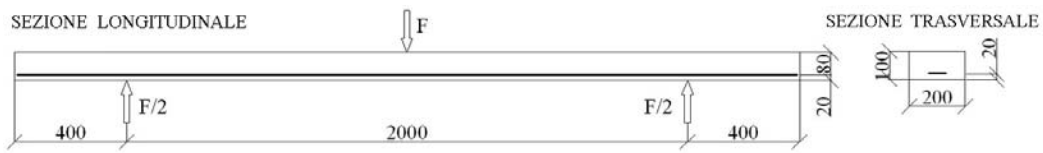
I risultati forniti dagli elementi armati con barre in FRP sono stati confrontati con quelli di campioni armati con barre in acciaio aventi rapporti d'armatura, sia geometrici che meccanici, di valore prossimo ai fini del confronto della risposta.

2 IL PROGRAMMA SPERIMENTALE

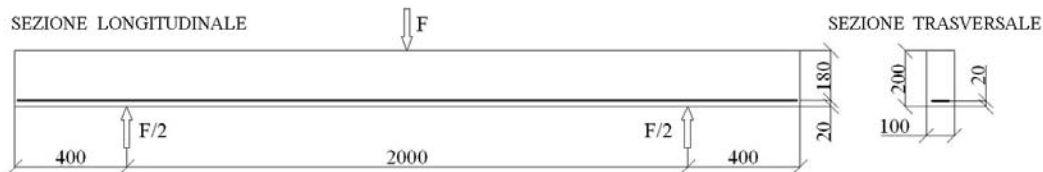
2.1 *Caratteristiche dei campioni ed attrezzatura di prova*

La campagna sperimentale ha interessato sedici campioni in conglomerato cementizio in scala reale, suddivisi in due serie di otto elementi. Ciascuna serie risultava caratterizzata da una geometria costante della sezione trasversale: 200 mm di larghezza e 100 mm di altezza per la serie 1 (sezione "bassa", Figura 1a); 100 mm di larghezza e 200 mm di altezza per la serie 2 (sezione "alta", Figura 1b). La variabilità all'interno di ciascuna serie risultava invece determinata dal tipo di armatura e dalla classe del calcestruzzo. Ciascun campione presentava una lunghezza complessiva di 2800 mm, risultante dalla somma tra la luce di campata di 2000 mm e due tratti addizionali di 400 mm, posizionati al di là degli apparecchi di appoggio al fine di ottenere una lunghezza di ancoraggio supplementare.

I campioni risultavano presidiati dalla sola armatura a flessione, con barre longitudinali di diverso tipo e numero; in particolare, ciascuna serie presentava 2 campioni armati con barre in fibra di vetro (GFRP), 2 campioni armati con barre in fibra di carbonio (CFRP) e 4 campioni armati con barre tradizionali in acciaio (campioni di confronto); le sezioni delle armature in acciaio sono state fissate in modo da riprodurre rapporti geometrici e meccanici simili a quelli dei campioni armati con barre in FRP.



a) Campioni della prima serie: sezione “bassa”.



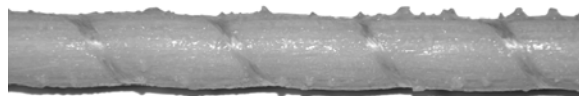
b) Campioni della seconda serie: sezione “alta”.

Figura 1: Configurazione di prova e geometria dei campioni (dimensioni in mm).

Le proprietà meccaniche dei materiali costituenti le barre d’armatura sono riportati nella Tabella 1; in Figura 2 sono riportati i due tipi di barre adoperati per costituire l’armatura in FRP, con evidenziazione delle caratteristiche superficiali. Si tratta in particolare di un tipo di barra in materiale composito rinforzato con fibre di vetro (GFRP, diametro 13 mm) e di un secondo tipo di barra rinforzato con fibre di carbonio (CFRP, diametro 9 mm). Per entrambi i tipi è previsto un trattamento meccanico superficiale finalizzato al miglioramento delle caratteristiche di aderenza; nel caso delle barre rinforzate con fibra di vetro è inoltre presente un avvolgimento esterno ad elica. Per le barre d’acciaio, del tipo ad aderenza migliorata, sono stati utilizzati due diversi diametri, rispettivamente di 8 e 14 mm.

Tabella 1: Proprietà dei materiali costituenti le barre d’armatura.

Materiale	Diametro (mm)	Tensione di rottura/ snervam. (MPa)	Modulo elastico (GPa)	Deformaz. ultima (%)
GFRP	13.0	690.0	40.8	1.7
CFRP	9.0	2068.0	124.0	1.7
Acciaio	8.0	556.0	206.0	3.8
	14.0	570.0	206.0	3.9



a)



b)

Figura 2: Caratteristiche superficiali delle barre in materiale composito; a) GFRP (diametro 13 mm); b) CFRP (diametro 9 mm).

Tabella 2: Caratteristiche dei campioni.

Serie	Campione	Armatura	$\rho_r = A_r / bd$	R_c (MPa)	$\omega_r = f_{ru} \rho_r / f_c$
1	S-G1×13	1Ø13 - GFRP	0.0083	49.0	0.141
	S-G2×13	2Ø13 - GFRP	0.0166	49.0	0.281
	S-C1×9	1Ø9 - CFRP	0.0040	80.0	0.124
	S-C2×9	2Ø9 - CFRP	0.0079	80.0	0.248
	S-ST1×8	1Ø8 - acciaio	0.0031	39.0	0.054
	S-ST2×8	2Ø8 - acciaio	0.0063	39.0	0.108
	S-ST1×14	1Ø14 - acciaio	0.0096	39.0	0.169
	S-ST2×14	2Ø14 - acciaio	0.0192	39.0	0.339
2	D-G1×13	1Ø13 - GFRP	0.0074	49.0	0.125
	D-G2×13	2Ø13 - GFRP	0.0147	49.0	0.250
	D-C1×9	1Ø9 - CFRP	0.0035	80.0	0.110
	D-C2×9	2Ø9 - CFRP	0.0071	80.0	0.220
	D-ST1×8	1Ø8 - acciaio	0.0028	39.0	0.048
	D-ST2×8	2Ø8 - acciaio	0.0056	39.0	0.096
	D-ST1×14	1Ø14 - acciaio	0.0085	39.0	0.151
	D-ST2×14	2Ø14 - acciaio	0.0171	39.0	0.301

* b : larghezza della sezione; d : altezza utile; A_r : sezione d'armatura; f_{ru} : resistenza dell'armatura; f_c : resistenza cilindrica del calcestruzzo, assunta pari a $0.83R_c$.

Le caratteristiche dei campioni sono elencate in Tabella 2, con riferimento alle due serie; in particolare sono riportate le percentuali geometriche e meccaniche d'armatura (rispettivamente ρ_r ed ω_r). Per il confezionamento dei campioni sono stati utilizzati tre tipi di calcestruzzo, di resistenza rapportata al tipo di armatura: rispettivamente 39, 49 ed 80 MPa per i campioni con armature in acciaio, GFRP e CFRP. Per la produzione dei diversi tipi di calcestruzzo sono stati impiegati cementi di classe 32.5 e 42.5 ed inerti costituiti da sabbia di fiume e pietrisco con dimensione massima rispettivamente di 3 e 10 mm. Il dosaggio di tali materiali è stato variato a seconda della resistenza prefissata e nel caso del calcestruzzo di maggiore resistenza è stato utilizzato un additivo fluidificante. La resistenza R_c dei diversi tipi di calcestruzzo è stata ottenuta dalla media dei risultati forniti da quattro provini cubici di 150 mm di lato, confezionati contestualmente al getto dei campioni corrispondenti.

I campioni sono stati sottoposti a prova di flessione e taglio per mezzo di una forza concentrata, applicata monotonicamente nella mezzzeria fino al raggiungimento della condizione di crisi. L'attrezzatura di prova risultava costituita da un telaio di contropinta in acciaio, dotato di un martinetto meccanico per l'applicazione del carico in controllo di spostamento. La strumentazione di misura è consistita in una cella di carico per la misura della forza trasversale applicata ed in trasduttori di spostamento per il rilievo della freccia.

2.2 Criteri di dimensionamento delle armature in FRP

Il criterio adottato per il dimensionamento delle sezioni d'armatura in FRP dei campioni è stato quello di ipotizzare un meccanismo di crisi di tipo flessionale, connesso al raggiungimento della deformazione limite da parte del calcestruzzo compresso, escludendo pertanto modalità di crisi per problemi di aderenza o per rottura delle barre. In base alle norme ACI 440.1R 2006 [7], il suddetto criterio è soddisfatto tramite la seguente condizione:

$$\rho_r > \rho_{rb} \quad (1)$$

essendo ρ_r il rapporto d'armatura in FRP ($= A_r/bd$) e ρ_{rb} il “rapporto di armatura bilanciata” (corrispondente ad una condizione bilanciata tra le deformazioni del calcestruzzo compresso e dell'armatura) fornito dall'espressione:

$$\rho_{rb} = \frac{A_{rb}}{bd} = 0.85 \frac{f_c}{f_{ru}} \beta_1 \frac{E_r \varepsilon_{cu}}{E_r \varepsilon_{cu} + f_{ru}} \quad (2)$$

in cui ε_{cu} è la deformazione limite convenzionale del calcestruzzo (assunta pari al 3‰ in [7]), E_r il modulo elastico dell'armatura e β_1 il rapporto tra l'altezza dello “stress block” rettangolare equivalente e la profondità dell'asse neutro. Nel caso dei campioni di confronto, armati con barre tradizionali in acciaio, i rapporti d'armatura sono risultati inferiori ai rispettivi valori di bilanciamento, ad esclusione dei campioni armati con 2 barre Ø14.

La condizione espressa nella (1) soddisfa in genere anche i criteri di salvaguardia delle condizioni di esercizio, in termini di controllo dello stato di deformazione e di fessurazione [8]. Tuttavia, nel presente studio si è tenuto conto in modo esplicito del comportamento dei campioni di prova in fase di esercizio; per valutare i livelli di carico corrispondenti a tale fase è stato considerato il modello proposto da Ospina & Bakis [9], espresso dalla condizione di seguito riportata:

$$s \leq 1.2 \frac{w}{\varepsilon_r k_b} - 2.5 c_c \leq 0.95 \frac{w}{\varepsilon_r k_b} \quad (3)$$

in cui s è la distanza tra le barre, ε_r la deformazione dell'armatura corrispondente al livello di carico considerato, k_b ($=1.4$) un coefficiente che tiene conto delle caratteristiche d'aderenza delle barre in FRP e c_c lo strato di copriferro; w è la massima ampiezza consentita delle fessure al bordo teso, assunta nel presente lavoro pari a 0.5 mm, in accordo con le indicazioni fornite dalle linee guida CNR DT203 [10].

La condizione espressa nella (3), basata sulla limitazione dell'interasse s tra le barre, consente di esercitare un controllo indiretto sulla fessurazione dell'elemento in esame; inoltre, attraverso il metodo in esame è possibile superare le difficoltà connesse alla misurazione diretta dell'ampiezza delle fessure che si manifestano negli elementi inflessi. Ai fini del presente lavoro, il metodo di Ospina & Bakis è stato adoperato per valutare, per ciascun campione, il carico equivalente F_{SL} corrispondente alla condizione di esercizio, imponendo l'uguaglianza nella prima parte della (3) noti i valori di s caratterizzanti i diversi campioni. Nel caso di armatura costituita da una barra singola, s è stata assunta pari alla larghezza b della sezione.

Il problema della possibilità di innesco di un meccanismo di crisi per eccesso di aderenza è stato risolto attraverso l'aggiunta di due tratti addizionali di ancoraggio delle barre di lunghezza pari a 400 mm all'estremità dei campioni (Figura 1).

3 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati delle prove effettuate sono espressi in termini di diagrammi forza-spostamento con riferimento alle due serie di campioni: serie 1, sezione “bassa”, Figura 3; serie 2, sezione “alta”, Figura 4. In particolare, le misure della forza applicata e della corrispondente deformazione sono state fornite dalla cella di carico e dalla media dei due trasduttori di spostamento applicati in corrispondenza della mezziera del campione.

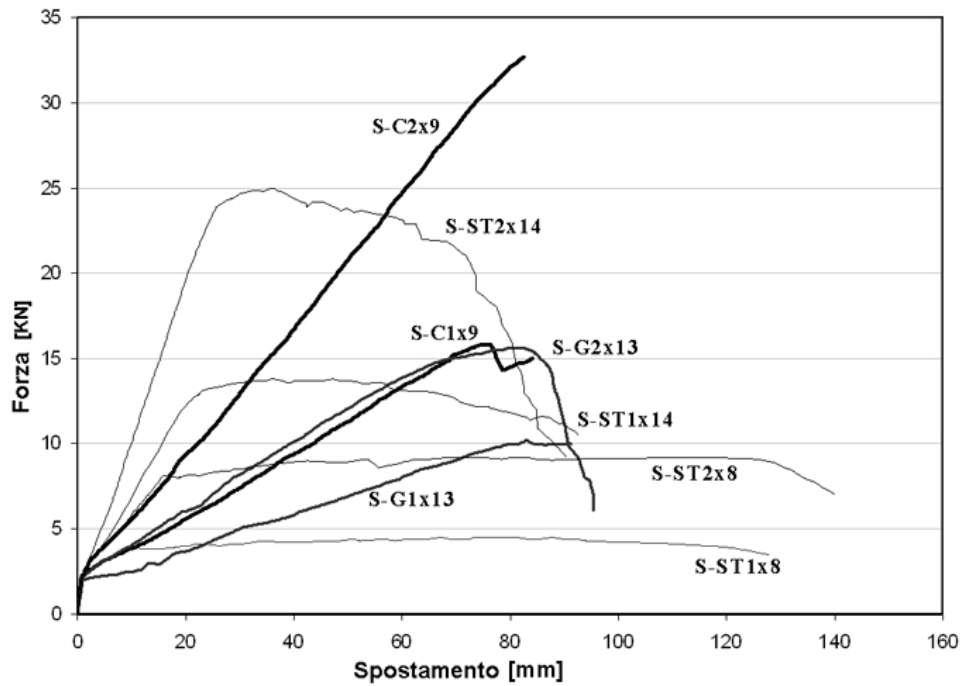


Figura 3: Diagrammi forza-spostamento dei campioni della serie 1.

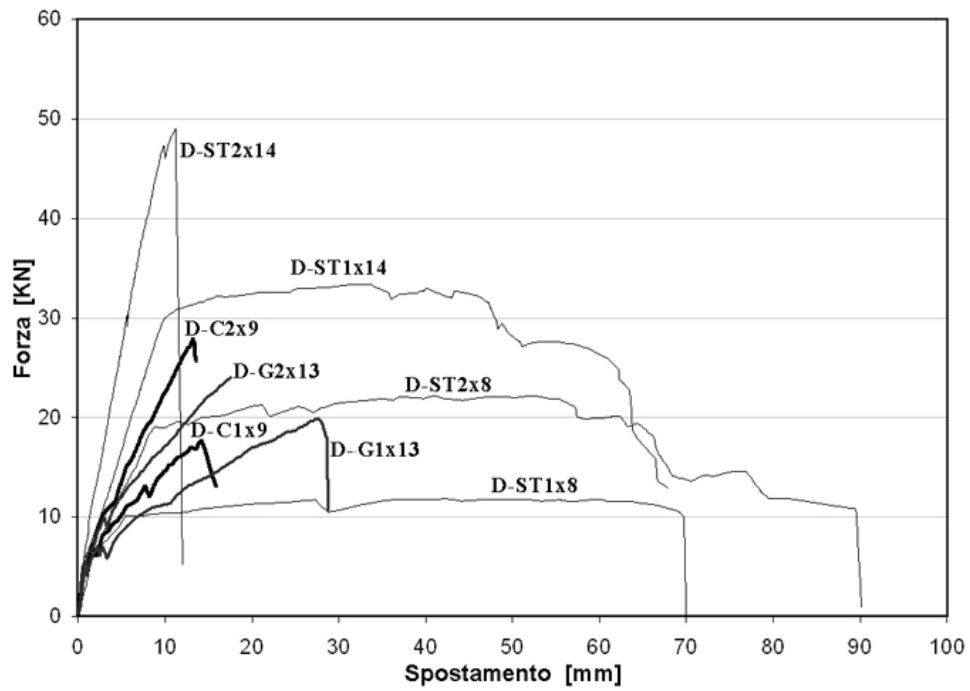


Figura 4: Diagrammi forza-spostamento dei campioni della serie 2.

3.1 Campioni della serie 1 (sezione "bassa")

In generale, i campioni armati con barre in GFRP (campioni S-G1×13 e S-G2×13) hanno evidenziato un comportamento meccanico meno efficace rispetto ai campioni armati con barre in CFRP (campioni S-C1×9 e S-C2×9), sia in fase ultima che per quanto attiene alla risposta in termini di deformazione e fessurazione. Tutti ed otto i campioni della serie hanno attinto condizioni di crisi governate da meccanismi flessionali; i campioni con barre in FRP sono collassati per eccesso di deformazione nel calcestruzzo compresso, mentre i campioni armati con barre tradizionali in acciaio (campioni di confronto) sono pervenuti a rottura attraverso meccanismi deformativi che hanno coinvolto sia il calcestruzzo compresso, sia l'armatura.

In aggiunta, i campioni armati con barre in materiale composito hanno evidenziato un diagramma di risposta di tipo bi-lineare, con rami rappresentativi, rispettivamente, della fase elastica non fessurata e della fase elastica fessurata. I campioni armati con barre in acciaio (campioni S-ST1×8, S-ST2×8, S-ST1×14, S-ST2×14) hanno invece esibito, come peraltro atteso, una risposta caratterizzata da un'ampia fase plastica, con ramo duttile di ampiezza decrescente all'aumentare della percentuale d'armatura. Nel caso dei campioni S-ST1×8 e S-ST2×8 è stata rilevata la rottura delle barre. Non sono state rilevate differenze significative nella distribuzione e nell'ampiezza delle fessure per tutti i campioni della serie.

In Figura 5 sono illustrati i campioni S-G1×13, S-C1×9 and S-ST1×14 in una fase prossima alla condizione di crisi.

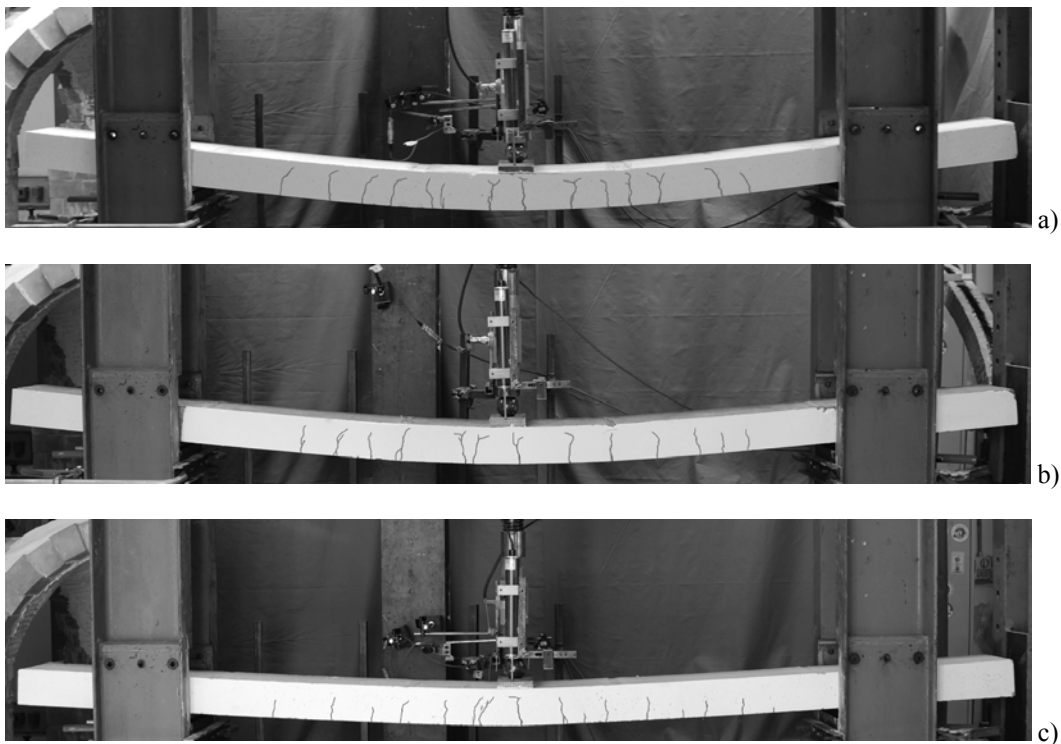


Figura 5: Quadri fessurativi dei campioni S-G1×13 (a), S-C1×9 (b), S-ST1×14 (c) in prossimità del collasso.

3.2 Campioni della serie 2 (sezione "alta")

All'interno di questa serie è stato rilevato in generale che i campioni dotati di barre in FRP (campioni D-G1×13, D-G2×13, D-C1×9 e D-C2×9) hanno evidenziato una risposta meccanica complessiva inferiore rispetto a quella dei campioni con armatura in acciaio (campioni D-ST1×8, D-ST2×8, D-ST1×14, D-ST2×14), sia dal punto di vista della resistenza che sotto l'aspetto deformativo e fessurativo. Inoltre, gli otto campioni della serie hanno attinto la fase ultima secondo modalità diverse. In particolare, i campioni armati con barre in FRP hanno manifestato un comportamento marcatamente fragile, caratterizzato da una crisi prematura dovuta ad una profonda lesione da taglio che ha interessato la regione centrale dell'elemento. I campioni di confronto, armati con barre in acciaio, hanno invece esibito curve forza-spostamento caratterizzate da una fase plastica significativa, ad esclusione del campione D-ST2×14 che è collassato per taglio e quindi con modalità di crisi a connotazione fragile. I campioni D-ST2×8 e D-ST1×14 hanno invece attinto una condizione di crisi di tipo misto flessione-taglio, come evidenziato dai quadri fessurativi in prossimità del collasso. Soltanto nel caso del campione D-ST1×8 è stata rilevata la rottura dell'armatura. In questa serie, i campioni armati con barre in FRP hanno evidenziato, in condizioni di fessurazione stabilizzata, valori medi del passo tra le fessure superiori rispetto ai campioni di confronto (167 mm circa per i campioni con barre in FRP e 115 mm circa per i campioni con barre in acciaio).

In Figura 6 sono illustrate le condizioni al collasso dei campioni D-G2×13, D-C2×9 e D-ST1×14.

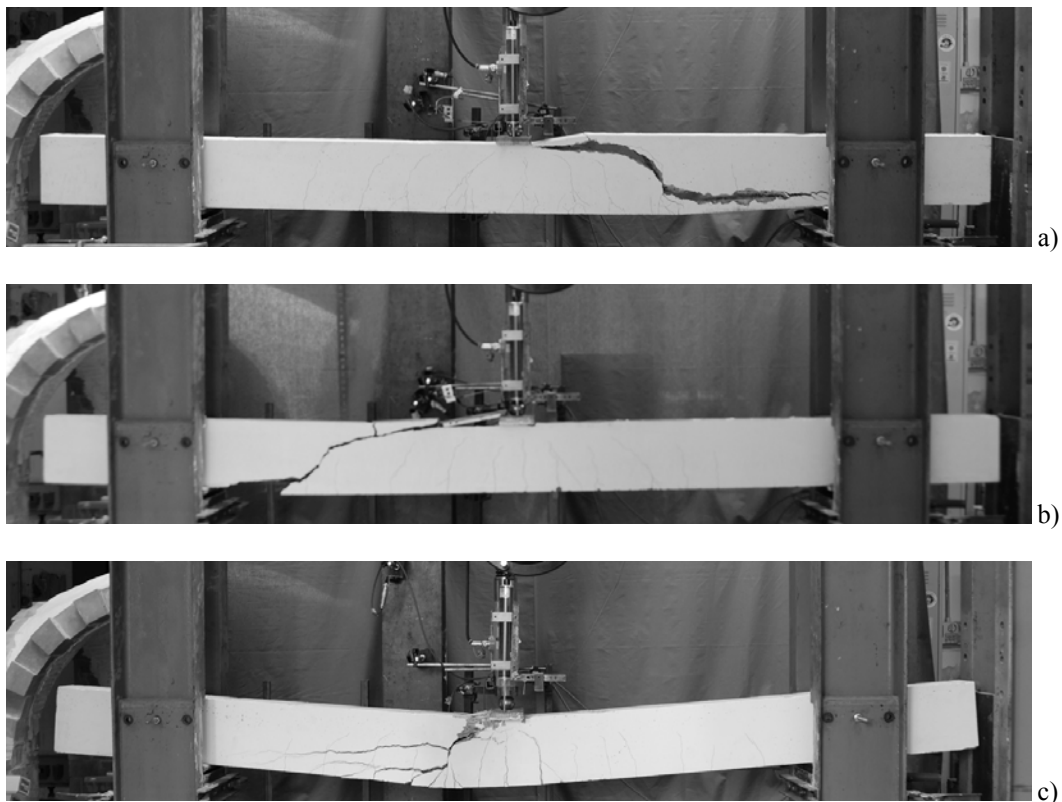


Figura 6: Condizioni al collasso dei campioni D-G2×13 (a), D-C2×9 (b), D-ST1×14 (c).

3.2.1 Resistenza a taglio dei campioni della serie 2

I campioni della seconda serie armati con barre in FRP sono pervenuti al collasso sviluppando meccanismi governati dalla sollecitazione di taglio. Tale aspetto merita particolare attenzione in quanto modalità di crisi diverse da quelle attese possono condizionare la risposta dell'elemento anche in fase di esercizio. Per tale motivo la resistenza a taglio dei campioni in esame è stata confrontata con i valori convenzionali forniti dalle norme CNR DT203 ed ACI 440.1R.

La resistenza a taglio secondo le norme CNR DT203 si valuta tramite la seguente espressione:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,ct}; V_{Rd,max}) \quad (4)$$

essendo $V_{Rd,ct}$ e $V_{Rd,max}$ i contributi resistenti forniti rispettivamente dal calcestruzzo teso e dalle bielle di calcestruzzo compresso. In particolare, il primo dei due contributi viene usualmente valutato in funzione della resistenza a trazione f_{ctm} del calcestruzzo; nel presente lavoro, tale resistenza è stata valutata utilizzando le seguenti espressioni [11]:

$$f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3} \quad (5)$$

per calcestruzzo di classe $C \leq 50/60$;

$$f_{ctm} = 2.12 \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) \quad (6)$$

per calcestruzzo di classe $C > 50/60$; f_{ck} e f_{cm} sono, rispettivamente, il valor medio ed il valore caratteristico della resistenza a compressione del calcestruzzo.

La resistenza a taglio secondo le norme ACI 440.1R è fornita dalla seguente espressione semplificata:

$$V_c = \frac{2}{5} bc \sqrt{f_c} \quad (7)$$

essendo c la profondità dell'asse neutro in condizioni di sezione fessurata.

La massima forza di taglio V_{max} ($=F_{max}/2$) assorbita dai campioni in esame e le resistenze convenzionali a taglio V_{CNR} e V_{ACI} , valutate rispettivamente attraverso le relazioni (4) e (7), sono riportate nella Tabella 3. Dal confronto tra valori teorici e sperimentali si deduce che le procedure analitiche esaminate forniscono previsioni a svantaggio di sicurezza, soprattutto nel caso dei campioni armati con barre in fibra di carbonio.

Tabella 3: Valori teorici e sperimentali della resistenza a taglio dei campioni della serie 2 armati con barre in FRP.

Campione	V_{max} (kN)	V_{CNR} (kN)	V_{ACI} (kN)
D-G1×13	9.95	9.15	5.75
D-G2×13	12.00	10.96	7.91
D-C1×9	8.85	17.24	8.18
D-C2×9	13.95	19.06	11.21

4 CONCLUSIONI

Lo studio sviluppato, avente per oggetto la valutazione delle modalità di crisi di elementi inflessi in calcestruzzo armato con barre in FRP, sprovvisi di armatura a taglio, ha consentito di trarre le conclusioni di seguito riportate.

- I campioni armati con barre in materiale composito (GFRP e CFRP) hanno evidenziato in generale un comportamento elasto-fragile, con diagrammi di risposta di tipo bi-lineare. I campioni di confronto, armati con barre in acciaio, hanno esibito un comportamento di tipo duttile, ad esclusione del campione della seconda serie armato con 2Ø14 che è collassato per taglio.
- I campioni della prima serie (sezione “bassa”) armati con barre in FRP hanno evidenziato tutti modalità di crisi di tipo flessionale. La risposta complessiva dei campioni armati con barre in CFRP è risultata più efficace rispetto a quella dei campioni armati con barre in GFRP.
- I campioni della seconda serie (sezione “alta”) armati con barre in FRP hanno esibito meccanismi di crisi governati dallo sforzo di taglio. In questo caso non è stata rilevata una differenza sostanziale tra le risposte meccaniche dei campioni armati con GFRP e CFRP.
- Il confronto tra valori sperimentali della resistenza a taglio dei campioni della seconda serie e valori analitici forniti dalle norme CNR DT203 ed ACI 440.1R ha evidenziato scostamenti consistenti, spesso a svantaggio della sicurezza. Si rendono pertanto necessarie ulteriori indagini, soprattutto nel caso di utilizzo di calcestruzzi ad alta resistenza.

Bibliografia

- [1] Gangarao, H.V.S. and Vijay, P.V., “Design of concrete members reinforced with GFRP bars,” in *Proc. III International Conference FRPRCS-3*, vol. 1, Tokyo, 143-150 (1997).
- [2] Theriault, M. and Benmokrane, B., “Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, 1, 7-16 (1998).
- [3] Achillides, Z., *Bond behavior of FRP bars in concrete*, PhD Thesis, Centre for Cement and Concrete, Dept. of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield (1998).
- [4] Darby, A.P., Ibell, T.J., Tallis, S. and Winkle, C., “End anchorage technique for internal FRP reinforcement,” in *Proc. VIII International Conference FRPRCS-8*, Patras, CD Rom (2007).
- [5] Tureyen, A.K. and Frosch, R.J., “Shear tests of FRP reinforced concrete beams without stirrups,” *ACI Structural Journal*, vol. 99, 4, 427-434 (2002).
- [6] Wang, J., *Determination of the shear resistance of concrete beams and slabs reinforced with Fibre Reinforced Plastics*, MS Thesis, Carleton University, Ottawa, (1998).
- [7] ACI 440.1R 2006, *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*, American Concrete Institute, Detroit (2006).
- [8] Nanni, A., ed., “Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications,” *Developments in Civil Engineering*, vol. 42, Elsevier, Amsterdam (1993).
- [9] Ospina, C.E. and Bakis, C.E., “Indirect crack control of concrete beams and one-way slabs reinforced with FRP bars,” in *Proc. VIII International Conference FRPRCS-8*, Patras, CD Rom (2007).
- [10] CNR DT203 2006, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma (2006).
- [11] D.M. 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 29 del 04/02/08 (Supplemento Ordinario n. 30), Roma (2008).