



CONVEGNO NAZIONALE ASSOCOMPOSITI

Associazione Italiana Compositi & Affini

# Atti del Convegno

MILANO 25-26 MAGGIO 2011

Con il patrocinio di



Partner



OCV™ Reinforcements



composite engineering



Organizzato da



# Elementi strutturali in calcestruzzo armati con barre in GFRP

Valter Carvelli, Marco Andrea Pisani, Carlo Poggi

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano  
Piazza Leonardo Da Vinci 32, 20133 Milano

## Introduzione

L'impiego delle barre di FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) come armature di strutture di conglomerato cementizio diviene sempre più frequente in tutti i paesi più industrializzati in virtù dei notevoli pregi dei materiali compositi fibrorinforzati, soprattutto nei riguardi della resistenza alla corrosione. La progettazione di strutture con tali rinforzi è supportata da numerose normative e/o le linee guida (e.g. [1, 2, 3]).

Queste barre possiedono caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche radicalmente diverse da quelle dell'acciaio, il che ha richiesto un'adeguata sperimentazione tutt'oggi oggetto di studio. I risultati delle ricerche condotte hanno consentito di aumentare la fiducia nell'applicazione di barre FRP in elementi strutturali in calcestruzzo. Infatti, diverse nazioni hanno liberalizzato l'utilizzo di tali armature. In Italia le norme vigenti per le costruzioni (Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14 gennaio 2008) prevedono l'utilizzo di barre fibrorinforzate per la realizzazione di elementi strutturali a seguito di richiesta di autorizzazione al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Tuttavia, vi sono aspetti, nell'opinione degli autori, che necessitano ancora approfondite indagini. Tra questi si annovera la resistenza a fatica e l'effetto di elevate temperature su elementi in calcestruzzo rinforzati con barre FRP.

Inoltre, una corretta progettazione non può prescindere dall'utilizzo di affidabili proprietà meccaniche delle barre in FRP e dell'accoppiamento barra-calcestruzzo. Tali informazioni a volte sono di non facile determinazione a causa dell'anisotropia dei materiali compositi che aumenta la difficoltà nella realizzazione di accurate prove sperimentali.

In seguito sono riportati alcuni risultati sperimentali, ottenuti dagli autori, riguardanti gli aspetti sopra citati. In particolare:

1. caratterizzazione meccanica a trazione di barre GFRP, anche di elevato diametro (vedi [4]);
2. valutazione dell'aderenza tra barre in GFRP e calcestruzzo;
3. vita a fatica di solette da ponte rinforzati con barre in GFRP (vedi [5]);
4. comportamento statico di elementi in calcestruzzo rinforzati con barre in GFRP soggetti ad elevate variazioni di temperatura.

## Caratterizzazione a trazione di barre in GFRP

La caratterizzazione delle barre in GFRP è fondamentale per la definizione dei parametri meccanici utili alla progettazione strutturale.

E' stata svolta una campagna sperimentale per determinare le proprietà in trazione di barre pultruse GFRP di diametri compresi tra 10 e 32 mm.

Nello svolgimento delle prove di trazione uno degli aspetti più delicati è il sistema di ancoraggio del campione alla macchina di prova a causa della natura anisotropa delle barre FRP. Le caratteristiche meccaniche sono affidabili solo se il sistema di ancoraggio assicura un completo trasferimento delle forze a tutte le fibre. Tale circostanza diviene tanto più influente per barre con grosso diametro. Attualmente, sia le normative sia la letteratura specializzata non forniscono metodologie adeguate (e.g. [6]). A tal fine, è stato

studiato e realizzato [4] un sistema di afferraggio, per barre di grosso diametro, in grado di raggiungere la resistenza ultima reale di barre GFRP.

La progettazione del sistema di ancoraggio è stata guidata dallo stato di sforzo creato sulla superficie della barra e della pressione radiale creata all'aumentare del movimento della testa all'interno della sede conica (vedi Figura 1). La forma finale dell'ancoraggio, ottenuta dopo numerose prove sperimentali e analisi numeriche, è riportata in Figura 1.

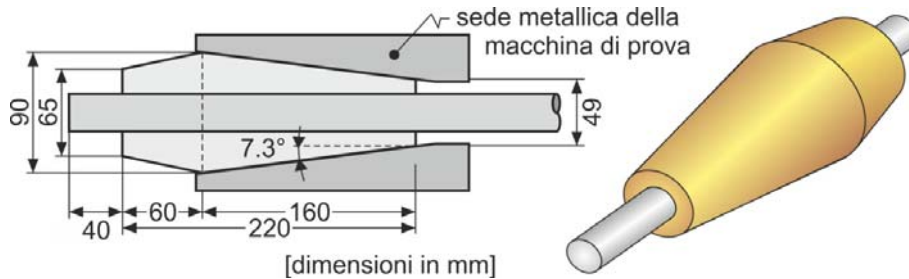


Figura 1. Geometria del sistema di afferraggio per barre GFRP.

Un aspetto importante nella realizzazione del sistema è stato la scelta del materiale per le teste. Dopo aver utilizzato differenti resine, è stato adottato, per le prestazioni meccaniche rilevate, una resina poliestere ortoftalica insatura addiziona con particelle di quarzo di dimensioni comprese tra 0.2 e 0.3 mm.

L'adeguato comportamento del sistema di ancoraggio è dimostrato dalla ripetibilità delle proprietà meccaniche ottenute, dai valori di sforzo ultimo analoghi a quelli teorici e dal meccanismo di collasso delle barre.

In Figura 2 sono riportate le curve ottenute dalle prove di trazione di barre GFRP di tre diversi diametri. Queste mostrano una trascurabile variazione sia in termini di rigidezza sia di resistenza. Tutte le barre hanno avuto una rottura diffusa delle fibre tra gli ancoraggi e non sono stati rilevati né danneggiamenti delle teste di resina né della parte di barra prossima all'ancoraggio (Figura 3).

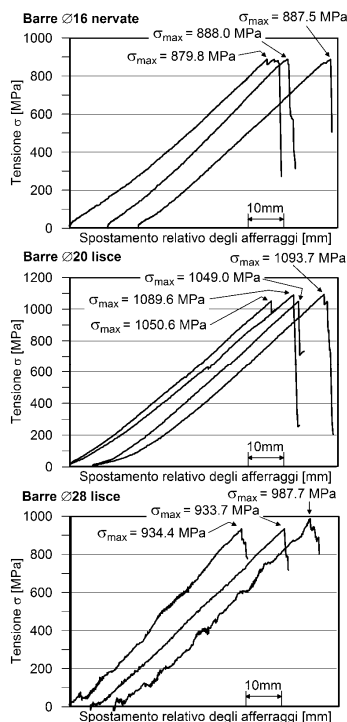


Figura 2.



Figura 3. Meccanismo di rottura a trazione delle barre GFRP.

### Aderenza tra barre in GFRP e calcestruzzo

La capacità di aderenza delle barre in GFRP al conglomerato cementizio è stata valutata eseguendo una serie di prove di “pull-out” (Figura 4a) e di “beam-test” (Figura 4b) per diversi diametri e finiture superficiali delle barre. L’aderenza barra-calcestruzzo è notevolmente influenzata dalla finitura superficiale.



Figura 4. (a) prova di “pull-out”; (b) prova di “beam-test” di barre pultruse GFRP.

Le prove di “pull-out” sono state eseguite a temperatura ambiente in accordo con la normativa UNI EN 10080, adottando un calcestruzzo con resistenza a compressione media  $R_c \approx 30$  MPa. Le resistenze tangenziali medie di aderenza ( $\tau_{max}$ ), ottenute con queste prove, sono confrontate in Figura 5, per diversi diametri di barre GFRP la cui capacità di aderenza è stata aumentata con un’elica di fibra aramidica e da sabbia di quarzo sulla superficie esterna. I risultati in Figura 5 mostrano che, in alcuni casi, l’aderenza delle barre GFRP può essere paragonabile a quella delle classiche barre in acciaio ad aderenza migliorata (con nervature).

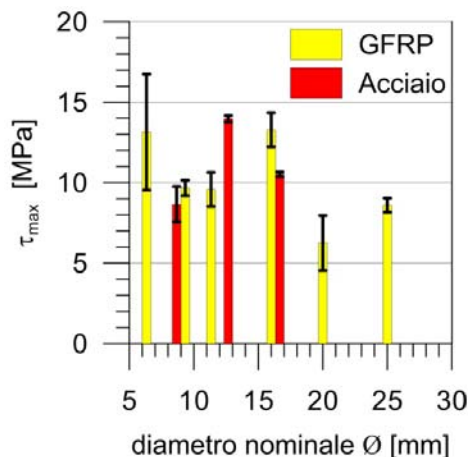


Figura 5. Prove di “pull-out”: resistenza media di aderenza ( $\tau_{max}$ ).

La differenza sostanziale tra le barre in GFRP e di acciaio è il meccanismo di collasso dell’adesione. Le barre in GFRP subiscono un deterioramento della superficie esterna in contatto con il calcestruzzo il quale, invece, non subisce considerevole danneggiamento (Figura 6a), mentre nel caso di barre in acciaio con nervatura il danneggiamento maggiore avviene nel calcestruzzo (Figura 6b).



(a)



(b)

Figura 6. Prove di “pull-out”: confronto rottura dell’adesione con barre: (a) GFRP; (b) acciaio.

Oltre alle citate prove di “pull-out”, sono state eseguite alcune prove di “beam-test” in conformità alla norma UNI EN 10080. I campioni, sottoposti a flessione (Figura 4b), sono stati rinforzati con barre GFRP di diametro nominale pari a 12 mm. Il confronto dei risultati delle prove di “beam-test” e “pull-out” dimostra un buon accordo (vedi Figura 7), anche se il numero limitato di prove di “beam-test” non consente di trarre conclusioni accurate e richiede un’ulteriore indagine.

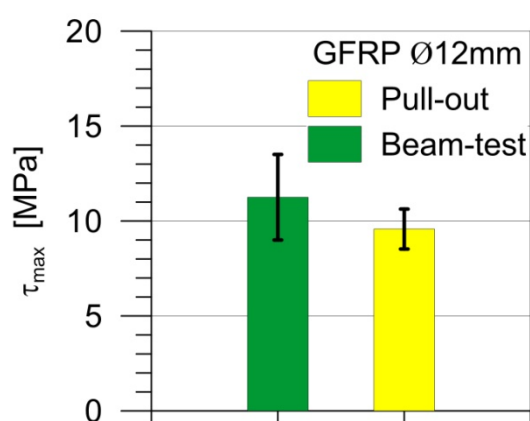


Figura 7. Resistenza media di aderenza ( $\tau_{max}$ ): confronto prove di “pull-out” e “beam-test”.

### Comportamento a fatica di solette da ponte rinforzate con barre GFRP

L’indagine sperimentale ha riguardato prototipi di solette da ponte in scala reale armate con barre GFRP, progettate in accordo con gli Eurocodici [6]. Gli obiettivi dell’indagine erano: accertare la fattibilità e l’efficienza di solette armate solo con queste barre;

verificare l'applicabilità delle regole suggerite dagli Eurocodici alle solette rinforzate con barre GFRP con carichi viaggianti generati da mezzi pesanti.

I campioni analizzati hanno le dimensioni riportate in Figura 8. È stato scelto lo spessore di 20 cm in quanto comune nei ponti a travata. L'interasse di 150 cm tra gli appoggi continui rappresenta un compromesso tra un ragionevole interasse tra le travi dell'impalcato e la volontà di ridurre il contributo dell'effetto arco sulla resistenza della soletta.

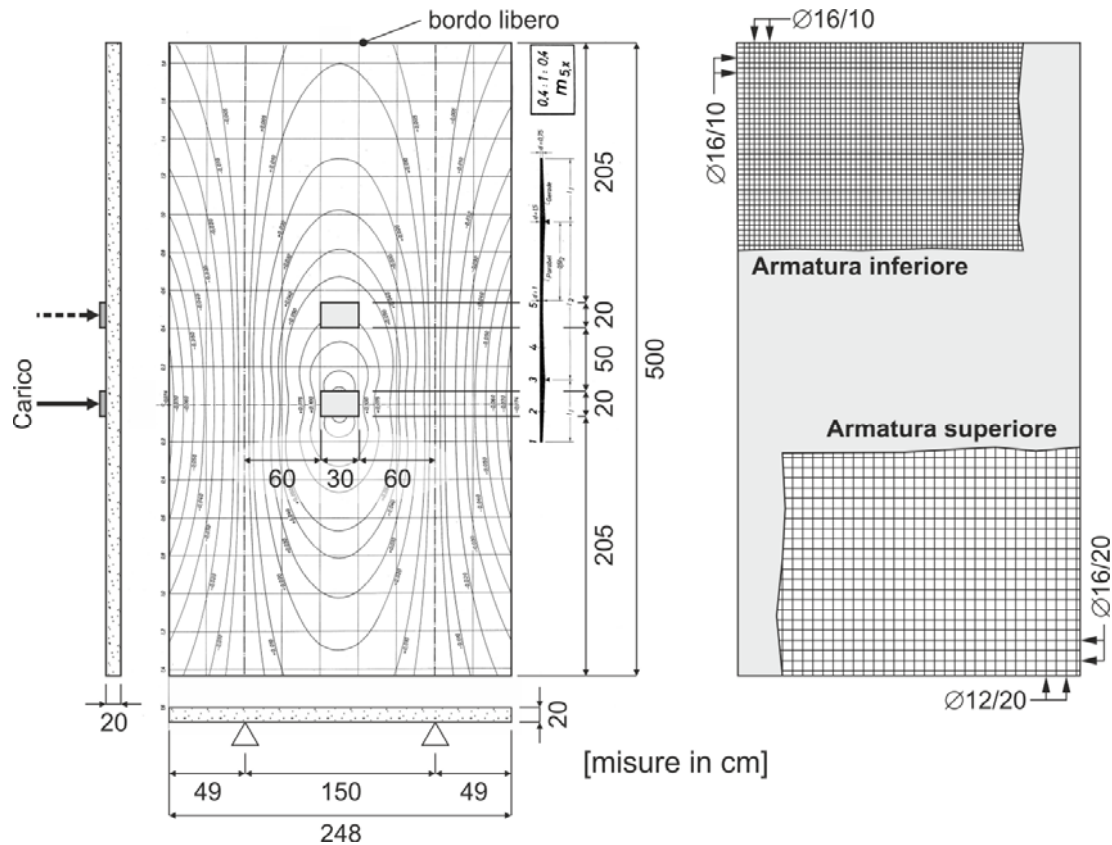


Figura 8. Geometria e rinforzo delle solette da ponte.

Le barre GFRP utilizzate sono composte da fili unidirezionali di vetro E (60% in volume) uniti da resina poliesteri. Un'elica di fibra aramidica è avvolta sulla superficie esterna delle barre, che sono ulteriormente rese scabre dalla presenza di sabbia di quarzo. Le loro caratteristiche meccaniche, determinate in laboratorio [4], sono: modulo elastico  $E_{GFRP} = 39 \text{ GPa}$ , resistenza a rottura  $f_{GFRP} = 885 \text{ MPa}$ , valutate rispetto alla sezione nominale delle barre.

Le prove cicliche sono state realizzate vincolando le solette con due travi longitudinali in acciaio alla cui sommità sono stati posti due semi-cilindri tali da riprodurre un vincolo tipo appoggio semplice bilatero (Figura 9a).

Il carico prodotto dal passaggio di una ruota di un veicolo è stato simulato con l'utilizzo di due martinetti idraulici, ortogonali alla soletta, posti a una distanza reciproca di 70 cm (Figura 9b). Il contatto tra la soletta e i due martinetti è stato realizzato con due appoggi in neoprene cerchiato per ottenere superfici di contatto di 20x30 cm. La sollecitazione di un mezzo pesante è stata riprodotta con cicli di carico dei due martinetti sfasati di un quarto di ciclo. La frequenza di prova è stata scelta nell'intervallo 0.2÷1.25 Hz in funzione del carico massimo adottato.



(a)

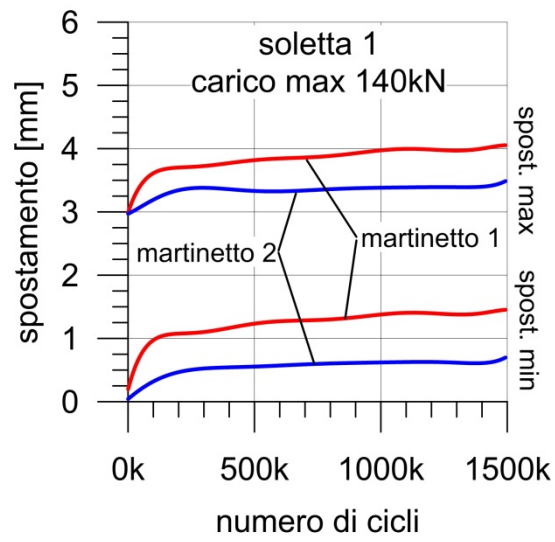


(b)

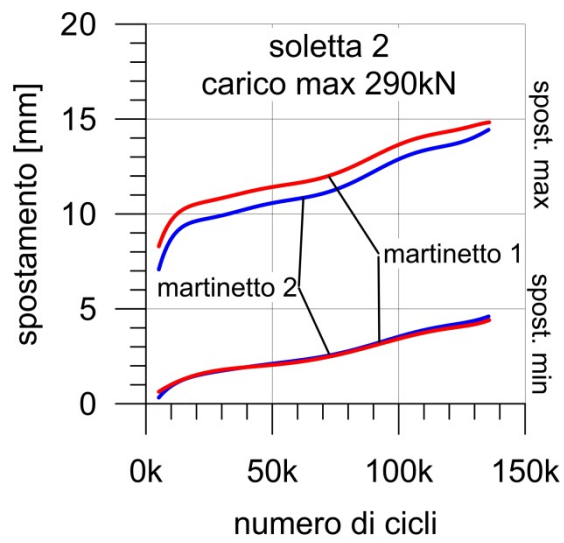
Figura 9. Solette da ponte: set-up di prova.

Le tre solette, oggetto di prova, (denominate 1, 2 e 3) sono state sottoposte a sollecitazione ciclica in controllo di carico. Il carico massimo per la soletta 1 è stato di 140 kN, per la 2 di 290 kN e per la 3 di 440 kN. Il carico minimo è stato posto in tutte le prove pari a 5 kN.

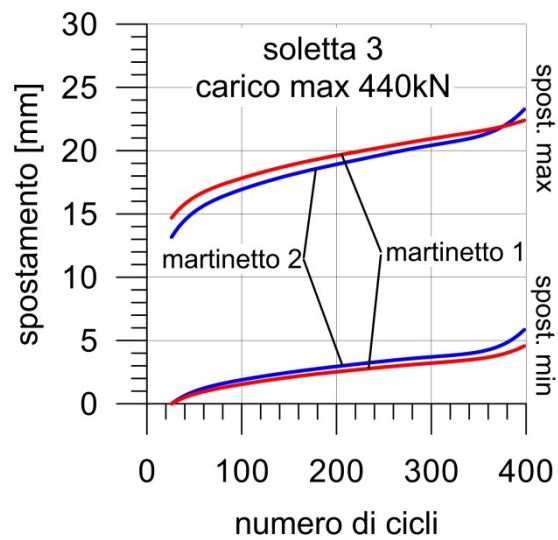
Il comportamento dei campioni nel corso delle prove può essere riassunto con il confronto dello spostamento massimo e minimo registrato dai trasduttori dei martinetti in ogni ciclo di carico (Figura 10). Gli spostamenti dei martinetti, nel corso della prova del campione 1 (carico massimo nel ciclo di 140 kN), rimangono circa stabili dopo circa un milione di cicli (Figura 10a), il che mostra un comportamento divenuto quasi-stabile della soletta. Per tale motivo la prova è stata interrotta dopo 1.5 milioni di cicli. Il campione 2, caricato ciclicamente con 290 kN, ha compiuto circa 140.000 cicli prima dell'interruzione della prova a causa dell'eccessiva e crescente freccia registrata in mezzeria (vedi Figura 10b). La soletta 3 (carico massimo di 440 kN), è collassata dopo 403 cicli (vedi Figura 10c) per punzonamento (Figura 11). Si ricorda che il collasso per punzonamento statico teorico è pari a 546 kN.



(a)



(b)



(c)

Figura 10. Andamento dello spostamento massimo e minimo di ogni martinetto in funzione del numero di cicli.



Figura 11. Soletta 3: meccanismo di collasso.

Da una visione d'insieme dei risultati ottenuti con le prove cicliche, si può ottenere una stima, anche se approssimata, della vita a fatica delle solette investigate al variare del carico massimo applicato. In Figura 12 è riportato anche il carico massimo applicato da una ruota di un mezzo pesante (95 kN), come suggerito dagli Eurocodici [6]. Il confronto dimostra come la vita a fatica di una soletta da ponte rinforzata con barre GFRP potrebbe essere molto elevata quando sollecitata con carichi tipici del traffico di mezzi pesanti.

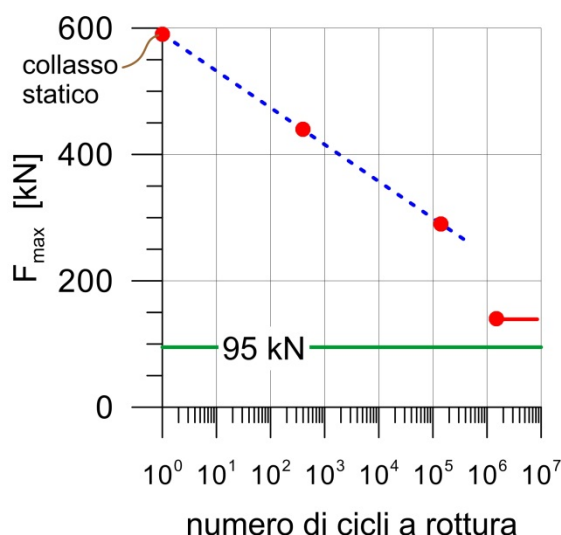


Figura 12. Approssimazione della vita a fatica delle solette da ponte.

### Effetto della temperatura su elementi strutturali rinforzati con barre GFRP

L'effetto di variazioni di temperatura localizzate (ovvero incendi localizzati) è stato valutato con prove di flessione statiche. Gli elementi strutturali hanno la geometria in Figura 13 e sono rinforzati con le barre GFRP utilizzate per le solette da ponte sopra citate. Sono state investigate diverse configurazioni di rinforzo interno. In particolare, il rinforzo costituito da barre continue (Figura 13) è stato confrontato con rinforzi costituiti da barre sovrapposte nella zona riscaldata con diverse lunghezze di sovrapposizione (24, 40, 56 cm) e con barre ripiegate dalla zona tesa alla zona compressa.

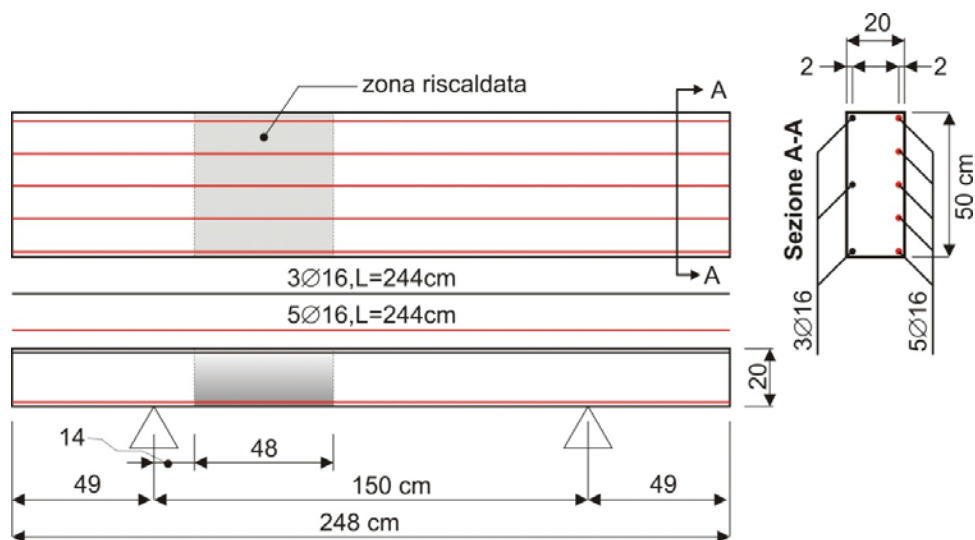


Figura 13. Geometria di una tipologia di rinforzo degli elementi soggetti a pre-riscaldamento.

Le prove di flessione su tre punti sono state svolte dopo aver riscaldato, per circa due ore, una porzione della superficie inferiore (48 cm x 50 cm) (Figura 14) fino a due differenti temperature massime (230 °C and 510 °C).

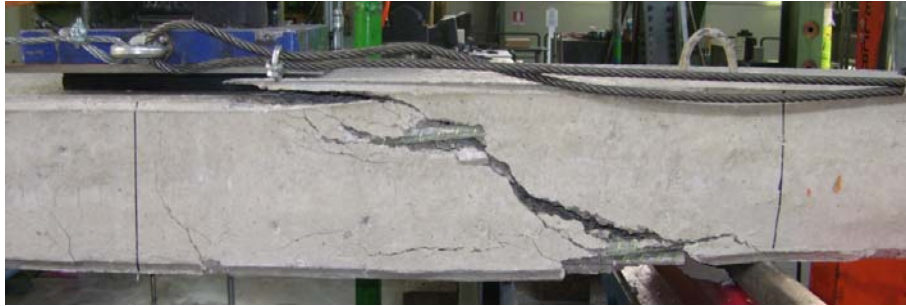


Figura 14. Elementi soggetti a pre-riscaldamento: set-up di prova.

Il meccanismo di rottura è profondamente influenzato dalla temperatura di pre-riscaldamento. Tutti gli elementi caricati, senza preliminare riscaldamento, hanno evidenziato una classica rottura dovuta al taglio (prevedibile dalla progettazione della geometria di rinforzo) (Figura 15). Gli elementi pre-riscaldati con temperatura massima di 510 °C, sono invece arrivati a rottura con fessurazione iniziata nella zona tesa in mezzeria (Figura 16). Tale comportamento è giustificabile con la perdita della resina nella porzione di barre riscaldate è quindi di aderenza al calcestruzzo.

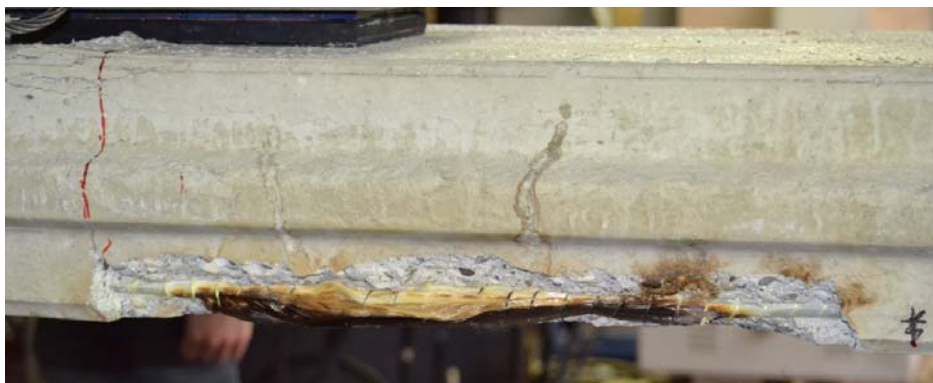


(a)



(b)

Figura 15. Meccanico di collasso di elementi non soggetti ad aumento di temperatura: (a) rinforzo continuo; (b) rinforzo con sovrapposizione di 56 cm.



(a)



(b)

Figura 16. Meccanico di collasso di elementi pre-riscaldati con temperatura massima di 510 °C: (a) rinforzo continuo; (b) rinforzo con sovrapposizione di 56 cm.

Il confronto del carico a rottura degli elementi analizzati al variare del rinforzo e della temperatura di pre-riscaldamento è riportato in Figura 17. L'istogramma mostra il carico a

rottura maggiore per il rinforzo con barre sovrapposte di 56 cm quando gli elementi non sono stati pre-riscaldati. Dopo l'applicazione di una temperatura massima di 510 °C, gli elementi con rinforzo composto di barre sovrapposte arrivano a collasso con un carico notevolmente inferiore di quello ottenuto senza riscaldamento. Gli elementi con rinforzo continuo non subiscono una considerevole variazione del carico, in quanto la continuità delle barre tese consente di sopportare i carichi trasferiti tramite l'aderenza al calcestruzzo delle parti di barre non riscaldate.

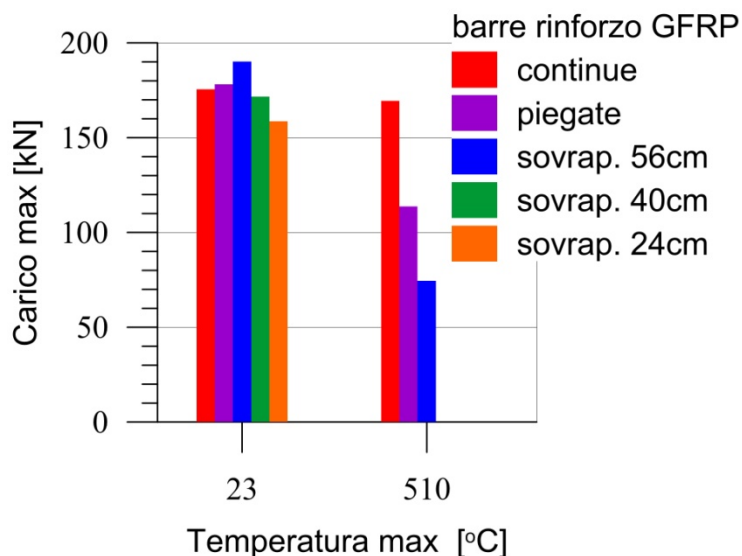


Figura 17. Carico a rottura a flessione con e senza pre-riscaldamento e con differenti geometrie di rinforzo.

## Conclusioni

Le indagini sperimentali, accennate in questo articolo, hanno messo in evidenza alcuni aspetti del comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con barre GFRP.

In particolare, lo studio sperimentale ha focalizzato l'attenzione su particolari condizioni di carico (carichi ciclici e termici). Gli aspetti che lo studio ha messo in rilievo sono:

- la necessità di appropriati apparati sperimentali per la determinazione delle proprietà meccaniche di barre GFRP, soprattutto se di grosso diametro, da utilizzare nella qualificazione del prodotto;
- l'ottimo comportamento sotto carichi ciclici di solette da ponte armate con barre GFRP ben oltre le previsioni derivanti dalle normative adottate;
- l'influenza di elevate temperatura sulla variazione del meccanismo di collasso e sul carico massimo sopportato da elementi inflessi. La riduzione della capacità portante, dopo l'applicazione di elevate temperature, può essere notevolmente ridotta se vi è una appropriata lunghezza di barra in zona non riscaldata che mantiene un adeguato ancoraggio al calcestruzzo.

## Ringraziamenti

Si ringrazia la società SIREG S.p.A. per la fornitura della barre in GFRP e la società COOPSETTE per la produzione degli elementi in calcestruzzo.

## Riferimenti

1. American Concrete Institute (ACI). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars - ACI 440.1R-06, ACI, Farmington Hills, Mich, 2006

2. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series No. 23, 1997.
3. Italian National Research Council (CNR). Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars - CNR-DT 203/2006, CNR, Rome, Italy, 2006.
4. Carvelli V, Fava G, Pisani M A. Anchor system for tension testing of large diameter GFRP bars. ASCE Journal of Composites for Construction, 2009; 13; 344-349.
5. Carvelli V., Pisani M.A., Poggi C.: "Fatigue behaviour of concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP bars", Composites Part B, 2010, 41, 560-567.
6. American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars - ASTM D7205M - 06, West Conshohocken, PA, 2006
7. European Committee for Standardization, Eurocode 2 - Design of concrete structures – Part 2: Concrete bridges. Design and detailing rules, EN 1992-2:2006, CEN Management Centre, Brussels, Belgium, 2006.