

Verso elementi in calcestruzzo armato precompresso senza acciaio: uno studio sperimentale

Bruno Dal Lago, Liberato Ferrara, Peter Deegan, Su E. Taylor, Mohammed Sonebi, Andrea Pattarini

I materiali compositi sono i principali attori nella sfida verso la ricerca di alternative sostenibili e durevoli all'acciaio per il rinforzo di elementi strutturali in calcestruzzo armato. Tra di essi, le barre costituite da fibre di basalto annegate in matrice polimerica rappresentano un'interessante novità, visto il loro basso costo di produzione, sia ambientale sia economico, e le loro proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione. In questo lavoro vengono presentati i risultati di una campagna di studio, svolta nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca europeo denominato EiroCrete, che ha visto la collaborazione del Politecnico di Milano e della Queen's University of Belfast con aziende italiane (Azichem srl) ed irlandesi (Banagher Precast Ltd.), e finalizzata a verificare la possibilità di utilizzare tali barre per la precompressione di elementi in prefabbricati in calcestruzzo armato precompresso, realizzati in calcestruzzo autocompattante rinforzato con fibre polimeriche.

Introduzione

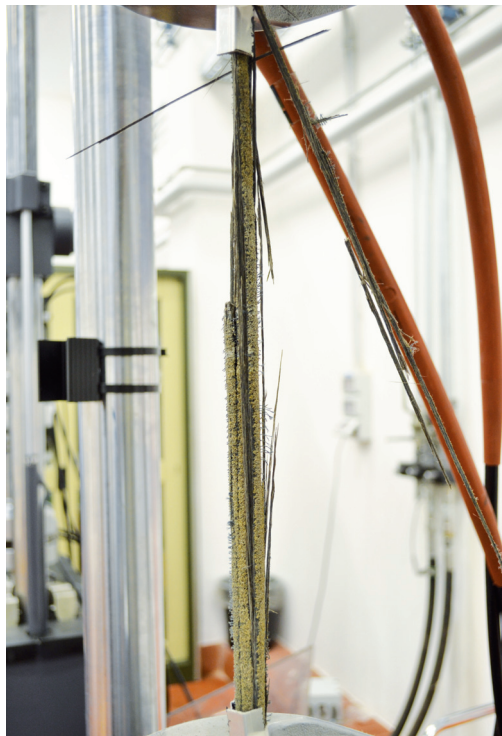
Le barre di rinforzo in fibra di basalto vengono proposte come alternativa ai tradizionali trefoli in acciaio armonico per la precompressione di elementi in calcestruzzo armato prefabbricato. Le barre sono prodotte con fibre di origine minerale (basalto) aventi diametro di circa 10 μm (ben maggiore del limite di respirabilità che ha

portato ai ben noti problemi di salute legati all'utilizzo di fibre minerali in amianto) che vengono svolte dalle bobine di produzione ed annegate in un bagno di matrice polimerica. Le barre vengono poi sottoposte a trattamento superficiale di sabbiatura al fine di aumentarne le capacità di aderenza con il calcestruzzo.

Un'attività sperimentale di ampio respiro, volta alla caratterizzazione del comportamento meccanico di tali barre e delle prestazioni di un tegolo prefabbricato in scale reale, è stata recentemente svolta nell'ambito del progetto di ricerca Eirocrete finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del programma FP7-PEOPLE-2012-IAPP - Marie Curie Action: "Industry-Academia Partnerships and Pathways". Il consorzio del progetto è costituito da istituti universitari (Politecnico di Milano e Queen's University of Belfast) e da aziende (Banagher Precast Concrete e Azichem).



Barre in fibra di basalto



Prove di caratterizzazione meccanica su barre:
(a) prova a trazione
(b) rottura
(c) prova a rilassamento

Prove di caratterizzazione del materiale

Una prima fase della attività di ricerca ha riguardato la caratterizzazione delle barre da impiegarsi quale rinforzo del prototipo da sottoporre a prova.

Sono state effettuate prove di trazione su spezzoni di barre, che hanno mostrato un comportamento elasto-fragile con un'elevata resistenza, compresa tra 900 e 1000 MPa, e un ridotto modulo elastico, pari a circa 48 GPa. Al raggiungimento della resistenza a trazione, il campione è soggetto a sfibramento. Nonostante la resistenza sia inferiore rispetto a quella dell'acciaio, e questo inevitabilmente significa poter "pre-sollecitare" ciascuna barra con uno sforzo inferiore, il basso modulo elastico rappresenta un vantaggio in termini di prestazione a lungo termine del manufatto, in quanto riduce significativamente le perdite di precompressione legate agli accorciamenti elastico, viscoso e per ritiro dell'elemento. Poichè le barre in fibra di basalto hanno un comportamento meccanico ortotropo, con proprietà meccaniche decisamente modeste in direzione ortogonale

alle fibre, l'utilizzo dei cunei di testata tipici dei trefoli in acciaio armonico ha portato alla prematura rottura per rottura locale dentro il cuneo ed al fine di ottenere la rottura della barra nella sua porzione libera, sono stati appositamente realizzati ed utilizzati cunei speciali resinati. E' stata altresì eseguita una prova di rilassamento su uno spezzone di barra tesata a 500 MPa, che ha mostrato una significativa sensibilità al fenomeno in oggetto, essendosi riscontrata una perdita a 1000 ore pari all' 8,4% del valore di pre-tensione applicata.

E' tuttavia opportuno osservare come, combinando le perdite attese per rilassamento della barra e per accorciamento del calcestruzzo dovuto a fenomeni istantanei e differiti, si ottengano dei valori che sono in buon accordo con quelli tradizionali attesi per elementi precompressi con trefoli in acciaio armonico. Sono infine state svolte prove di caratterizzazione della lunghezza di ancoraggio delle barre nel calcestruzzo, arrivando a determinare un'ottima prestazione con il pieno ancoraggio verificatosi dopo appena 10 volte il diametro delle barre utilizzate.



Progettazione e realizzazione del tegolo di prova

Un elemento strutturale con sezione a cas-sone alleggerita con blocchi di polistirolo e avente mensole laterali asimmetriche, tipica di un sistema costruttivo prefabbricato introdotto da George Tootell nel Regno Unito, è stato scelto per effettuare una prova di carico in scala al vero. L'elemento, lungo 10 m, largo 1,49 m e alto 0,4 m, è stato progettato con l'unico criterio di mantenere una monta limitata in fase di scassero e nel tempo. Per ottenere ciò, è stato progettato il posizionamento di 12 barre in fibra di basalto $\phi 12$ disposte in corrispondenza dell'asse baricentrico della soletta inferiore, spessa 80 mm, e posizionate lungo la larghezza della stessa con una spaziatura

orizzontale pari a 115 mm, altresì disposte in modo da minimizzare gli effetti torsionali conseguenti all'asimmetria della sezione. L'elemento è stato progettato a taglio sulla base dei risultati attesi dalla prova di carico. Onde evitare la rottura per taglio è stato disposto, in ciascuna delle due nervature verticali dell'elemento, un traliccio formato da spezzoni di barre in fibra di vetro $\phi 6$ inclinati a 45° e spaziati di 200 mm e ag-ganciati a due ulteriori barre correnti $\phi 12$ in fibra di basalto. Sono inoltre state inserite in direzione trasversale all'elemento degli spezzoni di barre orizzontali in fibra di vetro $\phi 6$ per garantire la capacità di ripartizione trasversale dei carichi. Per la realizzazione dell'elemento è stato impiegato un calcestruzzo autocompattante classe

*Foto in alto a sinistra:
Tessitura delle barre*

*Foto in alto a destra:
Fase di getto. Si notino
l'alleggerimento in polistirolo, i
tralicci di rinforzo a taglio e gli
accoppiatori applicati alle barre*

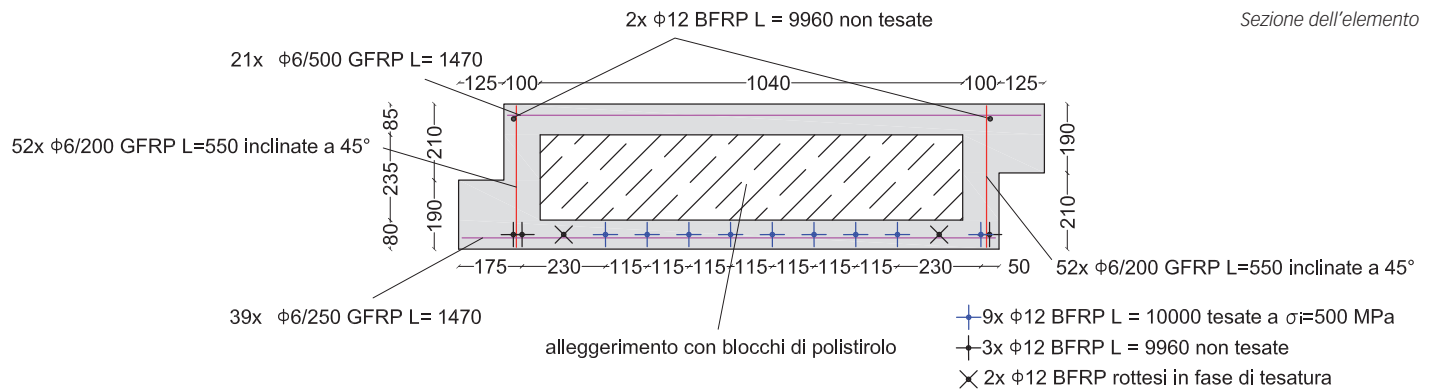
*Foto in basso:
Elemento in fase di trasporto*

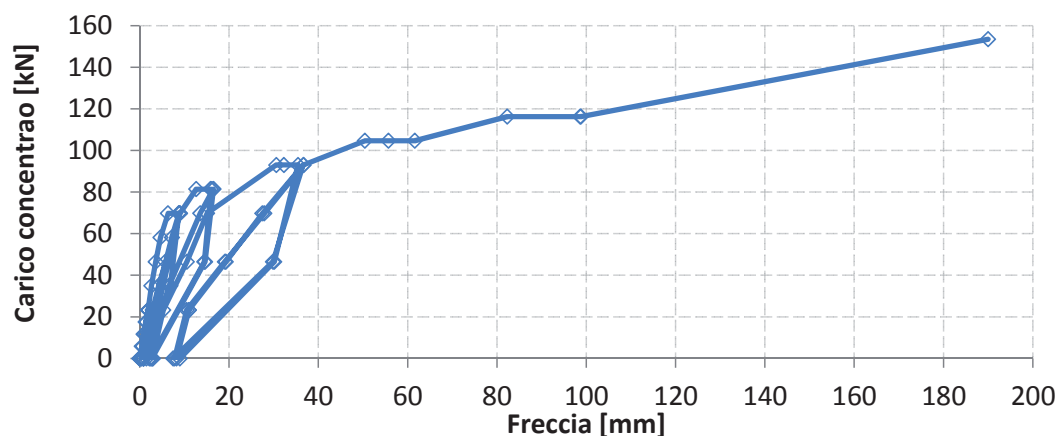
Banco di prova



C55/67 rinforzato con 4 kg/m^3 di fibre in polipropilene lunghe 38 mm, introdotte per aumentare la tenacità dell'elemento armato con rinforzi elasto-fragili e per migliorarne il comportamento in esercizio. Il cassero selezionato per la produzione dell'elemento era lungo 15 m e largo 2 m, e pertanto è stato necessario creare delle sponde in legno per la corretta sagomatura del manufatto, realizzato con lunghezza pari a 10 m per esigenze legate alla esecuzione della prova. Inoltre, si è reso necessario giuntare longitudinalmente le barre da pre-sollecitare, in quanto consegnate in lunghezze pari a 12 m. Per questa operazione sono stati utilizzati degli accoppia-

tori tradizionalmente utilizzati per trefoli in acciaio armonico, che hanno svolto la loro funzione senza particolari problemi. L'operazione di tesatura e di ancoraggio delle barre è avvenuta con l'usuale tecnica. Nonostante lo sforzo di precompressione fosse stato limitato al 50% circa della resistenza delle barre e nonostante i riscontri positivi ottenuti in prove preliminari di tesatura, si è verificata la rottura di alcune rotture in prossimità dell'ancoraggio, confermando così la necessità di utilizzo di sistemi di ancoraggio differenti da quelli tradizionalmente utilizzati per trefoli in acciaio. L'elemento è stato quindi gettato con soli 10 barre, rispetto alle 12 origina-





Risultati di prova

riamente previste, delle quali una è stata lasciata "lenta" onde evitare il ripetersi di precoci rotture. La precompressione è stata rilasciata dopo 3 giorni di maturazione a temperatura ambiente. Pur con la minore armatura, l'elemento ha mostrato una monta pressoché nulla e la ha mantenuta durante tutta la fase di stoccaggio, durata 2 mesi dalla data del getto, e terminata con l'esecuzione della prova sperimentale.

Prova di carico

La prova di carico, secondo un classico schema di flessione su 3 punti, si è svolta appoggiando l'elemento su grossi blocchi di calcestruzzo in estremità ed applicando un carico concentrato in mezzeria attraverso un martinetto idraulico reagente su un telaio di contrasto in acciaio vincolato a terra. Agli appoggi sono state interposte tra l'elemento e i blocchi in calcestruzzo degli spessori di 10 mm in legno per garantire una distribuzione omogenea di carico. Analogamente, una putrella quadra in acciaio con uno spessore in legno sottostante è stata inserita sotto il martinetto per distribuire il carico applicato alla mezzeria sulla larghezza della soletta superiore.

La prova di carico è stata eseguita applicando inizialmente un protocollo ciclico con due ripetizioni per ciascun livello di carico, per studiare la fase di apertura di fessura e la capacità di recupero elastico della freccia, tipica degli elementi precompressi in fase di esercizio, e poi aumentando il carico fino a rottura. I risultati mostrano un comportamento iniziale rigido,

corrispondente alla fase con sezione interamente reagente, seguita, a fessurazione avvenuta, da una fase caratterizzata da un brusco abbattimento della rigidità con andamento di tipo incrudente. Tale fase è determinata dall'allungamento elastico delle barre di precompressione in fibra di basalto. L'elemento ha mostrato una grande capacità di deformazione, raggiungendo un abbassamento massimo (freccia in mezzeria) di circa 190 mm, cui è corrisposto un carico di poco superiore a quanto atteso sulla base delle simulazioni numeriche effettuate.

L'elemento ha inoltre mostrato una capacità pressoché perfetta di recupero della deformazione e di richiusura delle fessure fino a valori di carico pari all'80% del carico ultimo. Ciò è conseguenza del comportamento perfettamente elastico delle barre di precompressione fino a livelli di deformazioni prossimi a quella di rottura.

La fessurazione osservata è stata segnata con un pennarello per una migliore comprensione durante lo svolgimento della prova. Si noti che le fessure pseudo-verticali, tipiche della flessione, sono ben distribuite con spaziatura pari a circa 40 mm, e conseguente apertura media molto contenuta. Tale favorevole distribuzione di fessura è dovuta al contributo delle fibre in polipropilene.

Il collasso è stato raggiunto per flessione con la rottura fragile delle barre di precompressione in fibra di basalto al lembo inferiore dell'elemento in una sezione in prossimità della mezzeria, come atteso.



*Foto in alto:
deformazione flessionale
sotto carico di 120 kN*

*Foto al centro:
profilo fessurativo e recupero di freccia*

*Foto in basso:
collasso a flessione con rottura delle
barre di precompressione*

Conclusioni

La produzione e la sperimentazione di un elemento strutturale prefabbricato di 10 m di luce in calcestruzzo autocompattante fibrorinforzato precompresso con barre in fibra di basalto e armato a taglio con barre inclinate in fibra di vetro ha dimostrato di essere un'interessante soluzione per lo sviluppo di elementi prefabbricati senza acciaio sostenibili e durevoli.

Le prove di caratterizzazione meccanica delle barre hanno portato a identificare un comportamento elasto-fragile con alta resistenza accompagnata da grande capacità di deformazione, una tendenza significativa al rilassamento e una ridotta lunghezza di ancoraggio associata ad un'ottima aderenza al calcestruzzo.

La produzione dell'elemento di copertura con sezione a cassone dissimetrica ha messo in luce che i sistemi tradizionalmente utilizzati per i trefoli di acciaio armonico possono essere reimpiegati con successo alle barre in fibra di basalto, ad eccezione dei cunei di ancoraggio, che concentrano in una lunghezza troppo ridotta gli sforzi trasversali agenti sulla barra ortotropa.

I risultati della prova di carico (flessione su 3 punti) effettuata sull'elemento hanno mostrato un comportamento flessionale caratterizzato da una fase iniziale rigida con sezione interamente reagente e da una successiva fase post-fessurazione caratterizzata dalla deformazione elastica delle barre di precompressione.

Si sono osservati un'ottima capacità di distribuzione di fessure con conseguente piccola apertura dovuta alla presenza delle fibre in polipropilene e una significativa capacità di recupero della deformazione imposta con conseguente richiusura delle fessure fino a un carico pari circa l'80% di quello ultimo. Lo stato limite ultimo è stato raggiunto per crisi sezionale della flessione di mezzzeria, avvenuta in corrispondenza di un valore di freccia pari a circa 1/50 della luce per rottura fragile delle barre al lembo teso, confermando l'efficacia dei tralicci di rinforzo a taglio, anch'essi in armatura composita.