

*L'adeguamento sismico mediante fasciatura in CFRP delle pile di un ponte ferroviario esistente nella tratta Plovdiv-Svilengrad della linea ad Alta Velocità: le problematiche e l'intervento realizzato*

## LA FERROVIA AD ALTA VELOCITÀ SOFIA-ISTANBUL

Alberto Grandi\*  
Marco Arduini\*\*

L'applicazione di materiale composito fibroso a matrice polimerica (Fiber Reinforced Polymer), ormai molto diffuso in Italia, comporta un incremento di resistenza senza modifiche sostanziali sulle rigidezze, sulle masse e sulle dimensioni dell'opera.

Questi particolari vantaggi possono essere felicemente impiegati per la riabilitazione statica e sismica di edifici ed infrastrutture. Nel caso descritto nel presente articolo si evidenzia un intervento di incremento di resistenza al taglio sulle pile di un ponte esistente nella tratta Plovdiv-Svilengrad, in Bulgaria, sulla costruenda ferrovia ad Alta Velocità Sofia-Istanbul. Si tratta, più in dettaglio, dell'adeguamento sismico a taglio delle pile in conformità alle indicazioni della Normativa europea - Eurocode 8-2. Data la forma delle pile si è fatto ricorso a fasciature con tessuti unidirezionali impregnati in situ (dry-system). In questo articolo si descrive la problematica e l'intervento realizzato.



Figura 1 - Un'immagine dell'opera

prodotto che rende questi interventi versatili ma soprattutto veloci. I prodotti disponibili sul mercato sono i tessuti da impregnare e gli elementi preformati.

I tessuti possono essere di varia grammatura (il più diffuso è comunque quello da 300 g/m<sup>2</sup>), modulo elastico e filamento. Attualmente ol-

### Un'introduzione ai materiali compositi

Com'è noto a molti addetti del settore, da qualche decennio i materiali compositi hanno fatto la loro felice comparsa in edilizia come alternativa ai tradizionali interventi eseguiti quasi sempre con pesanti e deteriorabili carpenterie metalliche. Sotto il nome di materiali compositi o meglio ancora con l'acronimo FRP (Fibre Reinforced Polymers), si identificano tutti quei prodotti composti da lunghe fibre sintetiche - quali vetro, carbonio, arammide, basalto, ecc. - impregnate fra loro grazie a una "matrice" il più delle volte di natura epossidica anche se ultimamente alcune Case Produttrici propongono con successo matrici di natura cementizia.

I motivi più evidenti che spingono il Progettista al loro utilizzo nel nostro settore sono le loro elevate prestazioni tecniche quali l'alto valore di resistenza a trazione - un valore di rottura a trazione superiore ai 3.000 MPa -, il modulo elastico calibrabile in funzione della tipologia di struttura da riparare - dai 160 fino ai 300 GPa -, il comportamento lineare fino alla rottura, il tutto unito ad un basso peso specifico del



Figura 2



tre al carbonio sta avendo larga diffusione il basalto che unisce le prestazioni elevate del carbonio (a volte fin troppo elevate) con un prezzo più contenuto tipico del vetro. Al contrario le matrici sono quasi sempre di natura epossidica bi componente con un primer d'aggrappo in grado di permettere una buona penetrazione della resina nel sottofondo. La resina svolge un ruolo fondamentale nel ciclo, in quanto tutto il sistema di rinforzo "ruota" sulla perfetta adesione tra la fibra e il sottofondo. Per quanto riguarda gli elementi preformati in FRP, il noto documento tecnico DT 200/2004 del CNR, mette l'Utilizzatore di fronte alla possibilità di due prodotti preformati ben precisi: i preformati ottenuti per laminazione e quelli ottenuti per pultrusione. E' chiaro che un prodotto industriale ottenuto per pultrusione offra al Progettista maggiore sicurezza in termini di errori di posa, inoltre il rapporto tra resina e fibra è calibrato a monte e pertanto sono note già in fase di progettazione - al contrario dei laminati - le caratteristiche meccaniche del prodotto di rinforzo. Al contrario, la laminazione in cantiere o in stabilimento non offre le stesse garanzie sul prodotto pertanto il DT 200/2004 inserisce opportunamente dei coefficienti di sicurezza.

## La descrizione dell'opera

L'opera da adeguare è parte del sistema ferroviario ad Alta Velocità che collega le città di Plovdiv - Svilengrad in Bulgaria, finanziato in parte dalla Comunità Europea che diventerà operativo nel prossimo 2014.

Si tratta di un ponte a tre campate e due vie di corsa separate (Figura 1), con travi prefabbricate semplicemente appoggiate. Due coppie di pile e due coppie di spalle alle estremità. I progettisti hanno svolto attività preliminari di indagine non distruttiva con identificazione delle geometrie, delle armature interne, della qualità del calcestruzzo e dello stato di degrado di quest'ultimo.



Figura 3 - Le indagini sul livello di degrado sul conglomerato cementizio

Sostanzialmente le risultanze sperimentali mettono in evidenza che:

- ◆ esiste carbonatazione generalizzata nel calcestruzzo delle pile per uno spessore medio di 2 cm;
- ◆ la resistenza a compressione caratteristica cilindrica del calcestruzzo è pari a 21,6 MPa, la densità media 2.150 kg/m<sup>3</sup>;
- ◆ le armature interne verticali hanno diametro 32 mm con tensione di snervamento  $f_{yk} > 370$  MPa, rottura  $f_{tk} > 560$  MPa, allungamento a rottura  $A > 10\%$ ;

- ◆ le staffature orizzontali interne hanno diametro 16 mm con tensione di snervamento  $f_{yk} > 470$  MPa, rottura  $f_{tk} > 650$  MPa, allungamento a rottura  $A > 8\%$ ;

Al termine del processo progettuale, l'opera si dimostrava essere adeguata ai carichi flessionali, ma non a quelli taglianti di tipo sismico nella direzione trasversale. Contro una richiesta di stato limite ultimo di 4.217 kN/pila la reazione interna calcolata era pari a 3.474 kN/pila.

## L'intervento di adeguamento sulle pile

Preso atto della profondità del degrado del conglomerato, il primo intervento necessario per garantire la durabilità dell'opera è quello della sostituzione del copriferro carbonatato con malta cementizia di elevata adesione al supporto, compatta e stabile volumetricamente nel tempo. Per garantire l'adesione tra supporto e nuova malta si è praticata una idrodemolizione fino ad ottenere una rugosità macro ( $\pm 5$  mm). Su questa superficie ruvida si è spruzzata malta con espansione in aria in spessore tale di riportare ad una superficie leggermente convessa la pila. Il tessuto, infatti, deve trovarsi applicato su una superficie perfettamente planare o convessa, ma mai su una superficie concava, altrimenti si vanifica il suo effetto benefico in quanto, all'assorbimento di una forza di trazione, i filamenti si allineano staccandosi dal supporto stesso.

Dato il carattere di primaria importanza dell'opera, il dimensionamento del contributo a taglio del rinforzo fibroso è operato in modo tale da limitare il regime deformativo sul conglomerato in modo che quest'ultimo, non superi le sue massime potenzialità.

E' noto, infatti, che la resistenza al taglio di un elemento strutturale esistente in calcestruzzo armato è dato dalla somma di tre contributi:  $V_{rdc}$  (contributo in stato limite ultimo a taglio - trazione del conglomerato),  $V_s$  (contributo in stato limite ultimo a taglio - trazione delle staffe),  $V_f$  (contributo in stato limite ultimo a taglio-trazione delle fibre FRP).

Tale somma, però, non rende conto dell'evoluzione del fenomeno tagliante. In una prima fase, di piccole deformazioni, è il conglomerato a farsi carico del taglio, se l'entità dell'azione tagliante non supera una definita deformazione non si manifesta il fenomeno fessurativo e l'acciaio e le fibre esterne forniscono modesti contributi. Se, al contrario, l'entità della deformazione è tale da fessurare il calcestruzzo allora si instaura il cosiddetto "traliccio" resistente, il contributo dell'acciaio interno e delle fibre esterne diventa prevalente perché, oltre un certo limite deformativo, il contributo reagente a taglio del calcestruzzo scende fino ad annullarsi.

La sommatoria dei tre effetti, quindi, è corretta fino ad una non ben definita soglia oltre la quale  $V_{rdc}$  non dovrebbe essere tenuto in considerazione. La definizione di questa soglia non è ancora stata chiarita nella Normativa e nelle raccomandazioni internazionali, anzi, per

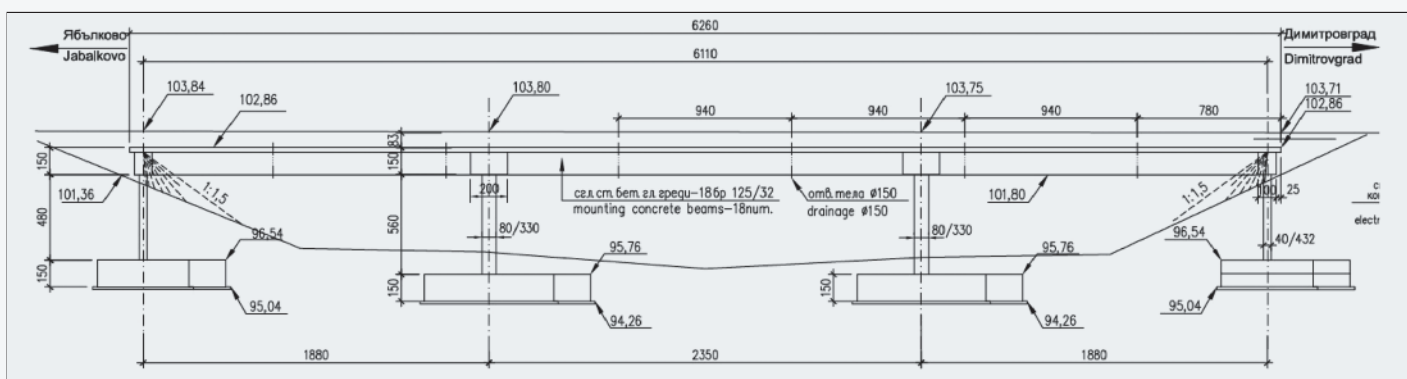


Figura 4 - Il prospetto dell'opera, sezione longitudinale

Le nuove costruzioni in calcestruzzo armato, il legislatore del Testo Unico 2008 ha deciso di eliminare il contributo di  $V_{rdc}$  per evitare calcoli complessi.

Nel documento CNR DT 200, documento di riferimento per il calcolo dei rinforzi esterni con materiali FRP, la tensione di lavoro delle fibre per taglio-trazione applicate in continuo avvolgimento attorno ad una sezione rettangolare con spigoli arrotondati viene calcolato con l'espressione:

$$f_{std} = f_{std} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_c \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{st} - f_{std}) \cdot \left[ 1 - \frac{l_c \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right]$$

Nel caso di sezione circolare completamente avvolta, invece, la tensione di lavoro delle fibre per taglio-trazione viene calcolata così:  $f_{std} = 0.005 E_f \cdot (2)$ .

Ovviamente deve anche essere verificato che il contributo a taglio-compressione del conglomerato sia superiore all'azione esterna, altrimenti si verifica la crisi del "puntone" di calcestruzzo.

Se osserviamo le Formule (1) e (2) ci accorgiamo che esse sono indipendenti dal tipo di conglomerato. Le proprietà del supporto entrano in  $f_{std}$  (che però è aggiunto e sottratto) e in  $l_c$  (che però, per sezioni grandi assume un valore piccolo). Tant'è che, se dovessimo impiegare un tessuto di carbonio ad alta resistenza con  $f_{tk} = 3.000$  MPa, potremmo contare su un regime tensionale della fibra (per il caso in esame secondo (1)) di 1.038 MPa, che corrisponde ad una deformazione di  $1.038/230.000 = 0,0045$ .

Dalle risultanze sperimentali di letteratura, però, emergono dati differenti. In un recente lavoro di Lee, Choi e Kim (ACI Structural Journal 2012) si mostrano i diagrammi di Figura 4, relativi ad una cinquantina di dati sperimentali di dimensioni al vero. Da questi diagrammi si evince che esiste una soglia oltre la quale il conglomerato si rompe a taglio-trazione prima della rottura a trazione della staffatura. Tale soglia dipende dalla qualità del conglomerato e dalla disposizione del rinforzo al taglio. Con travi di calcestruzzo aventi resistenza a compressione di 30 MPa, alcuni test hanno mostrato la crisi prematura della trave a taglio prima del raggiungimento della tensione di 800 MPa.

Sulla base delle evidenze sperimentali, al fine di evitare il superamento della soglia deformativa di  $800/200.000 = 0,004$ , si è limitata la deformazione di lavoro del rinforzo fibroso a 0,0038% applicando una fasciatura continua di 4 strati di tessuto MBrace CFRP (BASF CC Italia) di 500 g/m<sup>2</sup> per strato. In questo modo, in presenza di sisma di massima intensità, la deformazione sul conglomerato resterà contenuta entro una soglia di resistenza, ciò al fine di evitare la non agibilità dell'opera dopo tale evento.



Figure 6A, 6B e 6C - Le fasi dell'intervento.

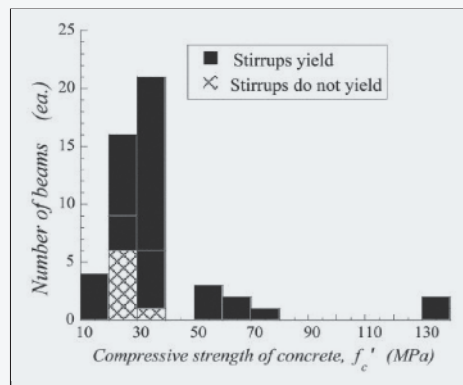
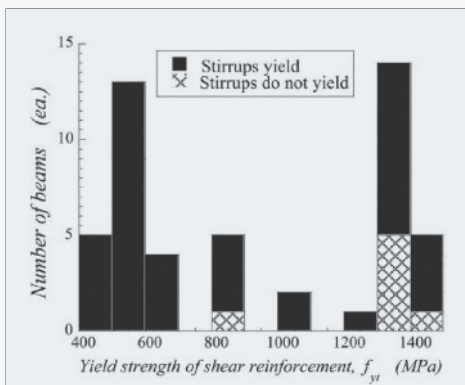


Figure 5A e 5B - I dati bibliografici da Lee, Choi e Kim (ACI Structural Journal 2012)

## L'applicazione del sistema di rinforzo

I lavori sono stati eseguiti dalla Alga di Milano - Società specializzata negli adeguamenti sismici e rinforzi strutturali - nel mese di Luglio 2011.

Tra i vantaggi principali di questa tecnologia sta proprio il fatto di poterla applicare velocemente e facilmente in opera con maestranze qualificate e di numero limitato.

La Figure 6A, 6B e 6C riporta alcune immagini delle operazioni di posa.



La prima operazione consiste nella idroscarifica del conglomerato per rimuovere il materiale carbonatato che non svolge più azione protettiva passivante sulle armature. Le zone con le armature corrose sono state sabbiare per riportare l'acciaio a metallo bianco.

Saturato il supporto con acqua si procede allo spruzzo di malta cementizia tixotropica espansiva in aria per stabilità volumetrica a tempo infinito. Completata la stagionatura si rimuovono bave o discontinuità e si applicano le fasciature orizzontali di tessuto. La sovrapposizione orizzontale per chiudere la cintura su se stessa è di almeno 20 cm.

Il tessuto viene tagliato a misura applicato a strisce ed impregnato in situ con speciale resina epossidica che svolge la duplice funzione di incollaggio al supporto e impregnazione dei filamenti

Dopo 48 ore di stagionatura il sistema FRP è efficace al sostentamento dei carichi. Per la sua durabilità nel tempo si deve prevedere una verniciatura anti UV, che lo nasconde completamente alla vista.

## La verifica del rinforzo con le fibre

La tecnologia FRP si basa sulla applicazione di materiale inerte al grado in aderenza con il supporto nella direzione richiesta dal progetto. I parametri da controllare sono quindi:

- ◆ L'effettiva resistenza a trazione del prodotto pronto per la sua applicazione
- ◆ L'aderenza al supporto
- ◆ Il numero effettivo di strati applicati
- ◆ La direzione di stesa del filato.

Il primo aspetto viene garantito con un duplice controllo. Il Produttore del sistema deve accompagnare la vendita con una certificazione delle resistenze a trazione, del modulo elastico e della grammatura (o dello spessore di filo secco presente nel prodotto) del lotto di provenienza del materiale fornito in cantiere. In cantiere, inoltre, si preleva un campione per la verifica delle resistenze presso un laboratorio indipendente qualificato.

Il secondo aspetto può essere controllato in situ con tre modalità:

- ◆ prove sonore di battitura;
- ◆ prove termografiche;
- ◆ prove di pull-out: secondo ACI 440.3R-04 denominate "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures".

Le prime due prove sono considerate di tipo non distruttivo, perché non deturpano la superficie rinforzata, esse individuano zone di di-

Figure 7A e 7B - Tipiche rotture per prove di pull-out



Campione	Pull-off forza	Tensione di rottura	Modalità di rottura	ACI 440.3R-04 Normativa
n°	kN	MPa	Tipo	Si/No
1	4,23	2,16	C	Si
2	4,4	2,24	C	Si
4	4,1	2,09	C	Si
5	4,2	2,14	C	Si
6	4,1	2,09	C-A	Si
8	4,8	2,45	C-A	Si
9	4,5	2,29	C-A	Si
10	4,7	2,4	C-A	Si

stacco, vuoti d'aria agendo per rilievo di parametri acustici o termici. La prova di pull-out è di tipo distruttivo, ovvero, nella zona dove si realizza la prova si ha una distruzione locale del rinforzo. Essa consiste nell'incollare un tassello metallico circolare (diametro 50mm) o quadrato (lato 40 mm) sulla superficie rinforzata con FRP e di praticare una incisione lungo il perimetro dello stesso tassello con carotiere o sega circolare fino a raggiungere il calcestruzzo di supporto. Il tassello, così isolato dal resto del rinforzo viene sottoposto a forza di trazione fino a staccarlo dal supporto stesso.

Nel caso in esame la Committenza ha eseguito una decina di prove di strappo (Figure 7A e 7B), nelle posizioni dove l'effetto cerchiante della fasciatura era meno necessario.

Le prove di pull-out sono state eseguite dopo due mesi dall'applicazione del sistema di rinforzo. I risultati (riportati nella tabella in basso) hanno confortato la Direzione Lavori sulla perfetta posa dell'intero composto. La rottura, infatti, si è localizzata nel calcestruzzo (rottura tipo C) o all'interfaccia adesivo-calcestruzzo (rottura tipo C-A) comunque ad un carico paragonabile a quello della rottura nel materiale di supporto.

Il terzo aspetto lo si controlla proprio con le risultanze delle prove di pull-out. Il moncone di tessuto rimasto attaccato all'estrattore viene scaldato oltre 400°C per far sciogliere la resina.

## Conclusioni

In questo articolo si è presentato un intervento di adeguamento al taglio di alcune pile condotto nel luglio 2011 su un ponte ferroviario sulla linea ad Alta Velocità che collegherà Sofia con Istanbul, mediante l'impiego di tessuti unidirezionali in composito fibroso FRP.

Si sono evidenziate le problematiche progettuali, le modalità di applicazione e le procedure di controllo. Si è, in particolare, focalizzata l'attenzione sulla necessità di contenere i regimi deformativi del calcestruzzo quando si trova soggetto ad azioni di questo tipo, in quanto le raccomandazioni di progetto italiane paiono poco cautelative, se comparate con dati sperimentali diretti recuperati dalla bibliografia. ■

\* Direttore Commerciale Italia di Alga SpA

\*\* Progettista del Composite for Civil Engineering Srl

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. M. Arduini, A. Nicoletti, P. Corrado - "Il rinforzo con materiali compositi fibrosi FRP", Maggioli Ed. 2010.
- [1]. AA.VV. Assoc. Mondiale della strada AIPCR-PIARC - "Metodologie di intervento per il rinforzo statico e sismico dei ponti in esercizio", XXVI Convegno Naz. Stradale, Roma, 2010.
- [1]. A. Castellani, P. Negro, A. Colombo, A. Grandi, M. Castellani - "Carbon Fiber reinforced polymers (CFRP) for strengthening and repairing under seismic actions", ISPRA, Ottobre 1998.