

INNOVAZIONI CHE PORTERANNO AD UN USO PIU' ECONOMICO DEI POLIMERI RINFORZATI CON FIBRE DI CARBONIO (CFRP) NELLA TECNICA DELLE COSTRUZIONI

Urs Meier, Iwan Stöcklin, Giovanni Pietro Terrasi e Andreas Winistörfer

Sommario

La necessità urgente di un miglior uso economico dei polimeri rinforzati con fibre di carbonio (CFRP) per applicazioni strutturali ha portato alla realizzazione di numerose innovazioni tecniche.

Prima innovazione: Nel passato la produzione di nastri CFRP era limitata dal processo relativamente lento di indurimento delle resine epossidiche. Un ritmo lento determina costi di produzione elevati. Questo ostacolo può essere superato utilizzando una matrice polimerica termoplastica invece di un sistema di resina a matrice termoindurente.

Seconda innovazione: Oggi, il post-consolidamento di strutture con nastri CFRP incollati esternamente fa parte delle tecniche più avanzate. Per sfruttare al meglio questo costoso materiale, conviene applicare i nastri in condizione pre-tesa. Ciò elimina le sollecitazioni dei rinforzi interni in acciaio e reduce le ampiezze delle fessure e le deformazioni. A causa della limitata resistenza al taglio del calcestruzzo, gli elevati sforzi di taglio alle estremità dei nastri non possono essere trasferiti nella struttura. Per impedire un deterioramento prematuro del sistema, i nastri devono essere ancorati tramite dispositivi speciali. Questi sono costosi, difficili da installare e spesso soggetti a corrosione. Ecco le ragioni principali per cui i nastri CFRP pretesi, incollati esternamente, non hanno ancora trovato nella pratica un largo impiego. Per superare questi problemi di ancoraggio, la forza di pre-tensionatura può essere ridotta gradualmente verso entrambe le estremità del nastro. Il risultato è un'augmentata lunghezza di sviluppo della forza di pre-tensionatura che fa in modo che gli sforzi di taglio che si verificano restino entro i limiti ammessi dal calcestruzzo. Ciò è stato possibile grazie all'uso di un dispositivo di pre-tensionatura innovativo, messo a punto appositamente, che consente di incollare i nastri di CFRP alla struttura in calcestruzzo tramite un approccio graduale.

Terza innovazione: Lo scopo del terzo argomento presentato riguarda la produzione di alti piloni in calcestruzzo centrifugato, preteso, di CFRP, come sostegno per le linee elettriche di alta tensione e per i pali di illuminazione. Il rinforzo in CFRP viene al tempo stesso utilizzato come un sistema economico di monitoraggio della salute strutturale.

Quarta innovazione: Viene introdotto un nuovo concetto di trasferimento del carico per un sistema di cavi di precompressione in fibre di carbonio per

rinforzare e ripristinare le strutture di ingegneria civile esistenti utilizzando nastri non laminati caricati su perno.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, i polimeri rinforzati con fibre di carbonio (CFRP) hanno ottenuto un ruolo importante nel post-consolidamento strutturale. Tuttavia, tali applicazioni non sono riuscite finora a sfruttare appieno le caratteristiche di elevata resistenza e di impiego polivalente dei composti CFRP. Inoltre, il loro potenziale per le strutture di nuova costruzione non è stato ancora ampiamente riconosciuto. Malgrado il clamoroso successo tecnico ottenuto dai progetti pilota in tutto il mondo, l'impatto commerciale di questi (eccetto che per il post-consolidamento) è rimasto modesto. Questo documento fa delle proposte su un migliore utilizzo delle moderne tecniche di processo e della resistenza e della multi-funzionalità dei composti CFRP per i futuri progetti edilizi.

2. Comportamento a lungo termine dell' aderenza dei CFRP termoplastici

Nel passato la velocità di produzione dei nastri di CFRP era limitata dal processo relativamente lento di indurimento dei sistemi a matrice di resina epossidica. Un ritmo lento implica elevati costi di produzione. Grazie ad un nuovo processo di fabbricazione, questo ostacolo può essere rimosso, utilizzando una matrice polimerica termoplastica invece di un sistema di resine a matrice termoindurente. C'era uno svantaggio. I sistemi a matrice epossidica termoindurente avevano dimostrato nel passato un eccellente comportamento a lungo termine dell'aderenza con adesivi epossidici. Non era chiaro quale sarebbe stata la migliore aderenza fra una matrice PA 11 termoplastica e l'adesivo epossidico. Il metodo di sovrapposizione tempo-temperatura consente di valutare la resistenza sui lunghi periodi, grazie a prove di resistenza eseguite in tempi più brevi ma a temperature più elevate.

Per indagare sul comportamento a lungo termine alle alte temperature ed umidità di tale calcestruzzo rinforzato con laminato CFRP termoplastico, due travi post-rinforzate, in cemento armato con acciaio, con una campata di 2,3 m sono state esposte a carichi di flessione elevati in una camera climatica. La temperatura e l'umidità sono state aumentate per un periodo di sette mesi. Dopodiché, queste sono state mantenute costanti a 45°C e a circa il 90% di umidità relativa. È stato adottato un sistema completo di misurazione per registrare la deformazione e lo spostamento. I dati di prova hanno consentito di trarre conclusioni sul comportamento deformativo e sulle condizioni climatiche limitanti per i sistemi di consolidamento in CFRP. Un laminato era basato su un sistema epossidico, l'altro su un sistema a matrice PA 11.

Gli esperimenti di scorrimento plastico sono iniziati nel febbraio 2000. I risultati per il sistema a matrice termoplastica sono perfino migliori di quelli del sistema termoindurente. L'aderenza nel febbraio 2004, dopo quattro anni di carico continuo, era ancora perfetta.

3. Nastri CFRP tesi

Il metodo di post-consolidamento sviluppato negli anni '80 [1] per il rifacimento di strutture utilizzando nastri CFRP incollati esternamente con resine epossidiche è ora, come menzionato precedentemente, di uso comune. I nastri di CFRP furono applicati per la prima volta nel 1991 per rinforzare il Ponte Ibach vicino a Lucerna. Il consumo di materiale in quel periodo aveva totalizzato appena 6-kg all'anno. Lo scorso anno, in Svizzera, sono state vendute oltre 100 tonnellate di composti CFRP per essere utilizzati nelle attività di post-consolidamento. L'eccellente resistenza alla corrosione del materiale, l'elevatissima robustezza, l'elevata rigidità, il buon comportamento alla fatica ed il basso peso specifico apparente gli hanno già consentito di soppiantare l'acciaio in queste applicazioni, in molti paesi dell'Europa Occidentale. Nella maggior parte dei casi, 1 kg di CFRP può corrispondere da 30 a 35 kg di acciaio, in termini di resistenza. La bassa densità del materiale rende la sua applicazione così semplice rispetto all'acciaio che i costi aggiuntivi (i composti CFRP sono a volte dieci volte più costosi per unità di volume) sono più che recuperati dai risparmi sul costo della manodopera, grazie all'estrema facilità di manipolazione. Le caratteristiche del materiale di prima qualità sono date per soprammarchato, come premio aggiuntivo. Preferibilmente i nastri di composto CFRP devono essere applicati come "carta da parati strutturale" utilizzando un rullo in gomma; contrariamente alle lastre di acciaio incollate esternamente, non necessitano di supporto o pressione di contatto mentre la resina indurisce.

Per le evoluzioni future, l'attenzione dovrebbe concentrarsi su come sfruttare meglio il potenziale offerto dai composti CFRP. Il prezzo delle fibre di carbonio dovrebbe scendere nel corso di un periodo che va da uno a tre anni. I moderni processi di produzione dei nastri ottenuti tramite termoplastica, come illustrato precedentemente [2] piuttosto che con i sistemi a matrice termoindurente, contribuiranno allo stesso modo a contrarre i costi in modo significativo.

Tuttavia, malgrado le favorevoli tendenze dei prezzi, il CFRP resta molto costoso rispetto ai materiali da costruzione tradizionali, e non possiamo permetterci di utilizzare soltanto il 10-15% dell'elevata resistenza (3.000-3.300 MPa) offerta dal materiale, come avviene attualmente con i nastri incollati non precompressi. Il lavoro svolto da Deuring [3] dimostra in modo convincente come la precompressione può, in linea di massima, fornire una risposta al problema. Sebbene varie soluzioni quadro siano state esaminate in condizioni di laboratorio e prove pilota [4], il loro impatto nella pratica è stato finora trascurabile. Tutti i concetti elaborati fino ad oggi non sono economici a causa degli elaborati sistemi di ancoraggio finale richiesti.

I positivi risultati ottenuti con l'ancoraggio "a scala decrescente" dei cavi CFRP a fili paralleli [5] ha portato l'EMPA a contemplare la possibilità di sviluppare un sistema di ancoraggio simile per i nastri precompressi. A tale scopo, è stato elaborato un metodo per consentire variazioni della precompressione del nastro. Questo a sua volta permette di applicare il nastro con una riduzione graduale della precompressione a zero, alle estremità, escludendo il rischio di taglio del cemento, risolvendo la necessità di sistemi elaborati di aggancio o torrette.

Il relativo sistema di tensionatura, sviluppato presso EMPA [6] comprende due unità di tensionatura collegate l'una all'altra, nella lunghezza richiesta,

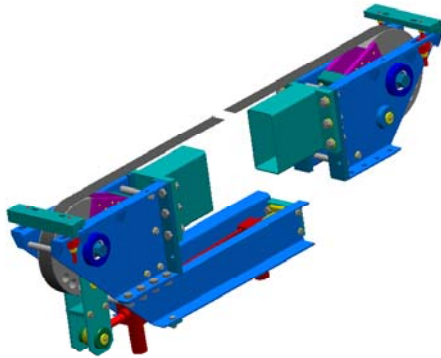


Figura 1

tramite un telaio. La Figura 1 mostra una vista in 3D del telaio di reazione attuale, con una massima forza di tensionatura di 100 kN ed una lunghezza massima di 10 m. Tuttavia, nel futuro, questi valori potranno essere raggiunti molte volte. Come mostrato nella Fig 2, circa tre quarti del nastro (1) sono portati intorno ai rulli di tensionatura (2) e le estremità sono fissate in posizione (3). Il nastro può essere teso al livello richiesto, girando (4) uno dei rulli. Questo metodo offre importanti vantaggi. Mentre il nastro giace sulla sommità della parte superiore del dispositivo di tensionatura, questi può essere presentato direttamente all'elemento strutturale che deve essere rinforzato. La frizione di avvolgimento del nastro sul rullo riduce enormemente lo sforzo di tensionatura residuo dei dispositivi di fissaggio (3) alle estremità del nastro. Dato che la trasmissione dello sforzo al nastro non è un fattore critico, non sono necessari preliminari elaborati, come l'adesione del nastro alla testa del tirante. L'adesivo viene applicato al nastro teso (Fig 3), che viene presentato al substrato preparato. Il nastro viene fatto aderire con una scala decrescente di precompressione, vale a dire, la precompressione del nastro diminuisce gradualmente fra il centro e l'una o l'altra estremità. Ciò viene ottenuto (Fig 3) facendo aderire prima un tratto interamente preteso (6) nel centro del nastro, per poi ridurre leggermente la forza di tensionatura del sistema (5) e far aderire i tratti adiacenti (7). La forza di tensionatura viene quindi ridotta ancora leggermente (5), ed un altro tratto viene fatto aderire ad entrambe le estremità (8). Questo processo viene ripetuto finché non viene raggiunta la scala decrescente di precompressione richiesta. Viene utilizzato un sistema di riscaldamento elettrico per accelerare l'indurimento dell'adesivo nei tratti incollati e consentire l'aderenza dei tratti successivi, entro la durata limite di lavorabilità dell'adesivo.

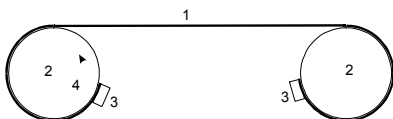


Figura 2

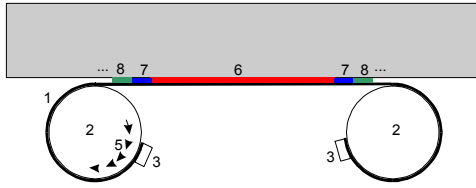


Figura 3

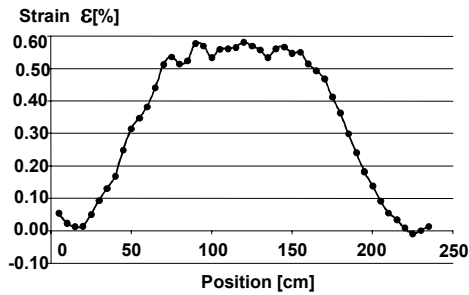


Figure 4

Negli ultimi due anni l'uso del riscaldamento a resistenza elettrica é diventato la norma. [7]. Dato che il nastro presenta una conduttività termica relativamente bassa, questo metodo consente una presa molto selettiva dell'adesivo lungo il tratto di incollaggio.

CARBO-LINK Ltd (un'impresa 'spin-off' di EMPA) ha i campi di reazione operativa sopra menzionati. Gli esperimenti iniziali con precompressione a scala decrescente in condizioni di laboratorio hanno dato risultati molto positivi. La Figura 4 mostra la deformazione ϵ su un tratto di nastro CFRP, spesso 1 mm e largo 50-mm, incollato al cemento con una scala decrescente di precompressione. La Figura 5 mostra il confronto fra i risultati di prove di carico di travi non post-rinforzate, post-rinforzate con un laminato CFRP non teso e con un laminato teso dello stesso tipo e sezione. Gli anni ci diranno se questi risultati possono essere sfruttati nella pratica e se l'uso di nastri in composto CFRP con un'elevata precompressione (1.000-2.000 MPa) si dimostrerà un successo commerciale. Il nuovo metodo consentirà almeno di sfruttare appieno l'elevata resistenza del materiale.

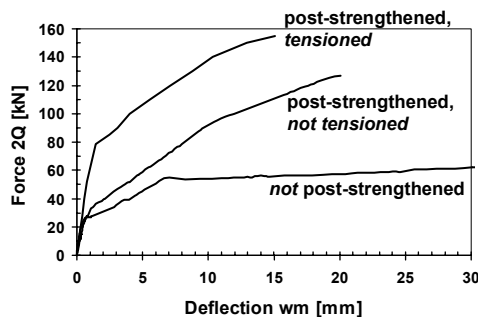


Figura 5

4. Pali in cemento precompressi con cavi di CFRP per una rete di alta tensione a 110 kV

Il lavoro di preparazione di base di questo progetto viene descritto da Terrasi [8]. Il vantaggio fondamentale della concezione del palo mostrato nella figura consiste nella possibilità di produrre pali più leggeri utilizzando rinforzi in CFRP di grande robustezza, leggeri e resistenti alla corrosione, incorporati in una matrice di cemento ad elevata resistenza, realizzato per colata centrifuga. La copertura in cemento del rinforzo in CFRP può essere ridotta al minimo, ben al di sotto della copertura in cemento di 30-50 mm di spessore necessaria per il rinforzo in acciaio. La dimensione della copertura viene determinata sulla base di considerazioni meccaniche (accettazione delle sollecitazioni di compressione dovute alla flessione e ai carichi di rottura dirompenti nella zona di ancoraggio delle armature) e della variazione del coefficiente di dilatazione termica menzionato al punto [8].

I pali sono progettati come elementi soggetti essenzialmente a flessione. Il fattore di sicurezza di flessione totale per i pali è normalmente compreso fra 1.6 e 1.8, a seconda della norma considerata. Non esiste preferenza fra le due modalità possibili di flessione che comportano la frantumazione del cemento o la rottura da trazione dei cavi CFRP, dato che entrambe sono fratture fragili. Il controllo della modalità di rottura dipende dalla geometria del tratto, dalla resistenza del cemento, dalla configurazione delle armature (attualmente è il fattore che determina il costo) e dal livello di precompressione. Quest'ultimo è determinato dalla funzionalità che risulterà dalla totale precompressione del pilone per i carichi di lavoro. Inoltre, si dovrà verificare con molta cura l'ancoraggio dei cavi CFRP ad elevata precompressione.



Figura 6

Nella maggior parte di casi, il progetto è regolato in base alla risposta dei criteri di funzionalità. In particolare, le deformazioni sotto carichi di servizio

possono essere limitate con una precompressione totale. La formazione di fessure da flessione viene evitata, cosicché il momento d'inerzia di tutta la sezione trasversale è disponibile per ricevere il momento di servizio. Il momento di servizio massimo definisce il momento di fessurazione minimo che deve essere garantito in corrispondenza della sezione trasversale critica del palo. Questo può essere calcolato tenendo conto di una parte della resistenza alla trazione $f_{c,bt}$ del calcestruzzo ed è regolato principalmente dall'altezza della forza di precompressione centrale totale. Per fare un uso razionale degli ancora costosi cavi CFRP, questi dovrebbero essere precompressi ad un rapporto effettivo di precompressione del 60%-70% della loro resistenza alla trazione garantita ($2'000 \text{ MPa} < \sigma_{\text{CFRP}, t=0} < 2'400 \text{ MPa}$). I diametri consigliati dei cavi CFRP sono piccoli (normalmente 2-6 mm) in modo da ottenere un trasferimento regolare delle forze di precompressione, evitare distacchi e fessure di compatibilità termica. Un requisito particolare da soddisfare da parte del design prescelto del palo è il raggiungimento di una deformazione elevata alla rottura (vale a dire allo stadio di fessurazione), che può essere interpretato come un avvertimento da parte del sistema, se caricato ad un livello elevato non previsto. Inoltre, il basso tasso di smorzamento del cemento interamente precompresso, richiede un'analisi dinamica del palo leggero per i casi di carico, come l'urto o le vibrazioni, nel senso trasversale del vento indotti dalla scia vorticoso.

La realizzazione dei criteri di progettazione qui sopra elencati permette di ridurre il peso fino al 40% rispetto alla concezione del palo in cemento armato tradizionale. La Figura 6 mostra il pilone in cemento precompresso ad alta resistenza CFRP, in prima mondiale, per la trasmissione di tensioni a 110 kV. Il pilone, alto 27 m, 6.000 kg di peso, è precompresso da 40 cavi CFRP con $\varnothing = 5 \text{ mm}$ ad un livello di precompressione del cemento di $\sigma_{c,i} = 10 \text{ MPa}$ (base) - 16 MPa (sommità). La conicità del pilone è dell'1,175%, che determina una variazione del diametro esterno da 850 mm (base) a 530 mm (sommità) con uno spessore nominale di parete costante di soli 40 mm.

Il monitoraggio dell'integrità delle strutture rinforzate con fibre di carbonio tramite la misurazione del comportamento elettrico viene largamente usato, dato che la resistenza elettrica delle fibre di carbonio dipende dalle sollecitazioni applicate. La resistenza elettrica dei nastri di CFRP dipende anche dalle forze trasversali e dagli effetti interlaminari e può rendere difficile valutare la sollecitazione. Nei cavi CFRP unidirezionali tuttavia, tutte le fibre sono allineate lungo l'asse del cavo. Questa semplice geometria consente di definire la relazione fra la deformazione di tipo tensile del CFRP e la resistenza elettrica.

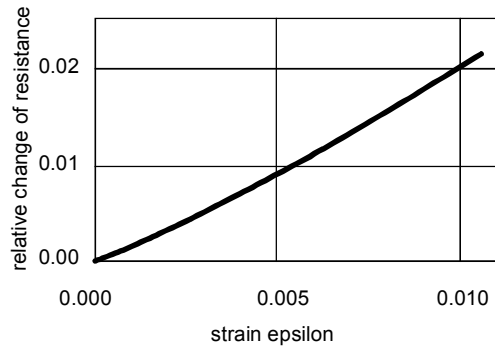


Figura 7

La dipendenza della resistenza elettrica dalla deformazione tensile dei cavi CFRP è stata misurata in una macchina di prova di trazione. Il cambiamento di resistenza relativo $[\{R(\varepsilon) - R(0)\}/R(0)]$ è mostrato nella Fig 7 in funzione delle sollecitazioni applicate ε . Il comportamento può essere descritto in modo sufficientemente preciso tramite un'espressione quadratica. La dipendenza della resistenza elettrica dalla temperatura ed umidità è stata misurata in una camera climatica. E' stato rilevato, Terrasi [8], che nell'intervallo di temperatura compreso fra -20°C e 60°C il cambiamento di resistenza relativa, $\{R(T) - R(O)\} / R(O)$ dipende dalla temperatura T come segue:

$$\frac{R(T) - R(0)}{R(0)} = \frac{-0.000436}{[^{\circ}\text{C}]} \times T[^{\circ}\text{C}] + \frac{1.81 \times 10^{-7}}{[^{\circ}\text{C}]} \times T^2 [^{\circ}\text{C}]$$

Un $^{\circ}\text{C}$ corrisponde grosso modo ad una deformazione tensile di $200 \mu\text{m}/\text{m}$. La forte dipendenza dalla temperatura deve essere compensata da mezzi adeguati. Questo metodo viene usato per monitorare la deformazione di otto dei quaranta cavi di precompressione del pilone (Fig 6). Il rilevamento di un possibile scorrimento plastico dell'aderenza, nella zona di ancoraggio dei cavi di precompressione CFRP del pilone, è un avvertimento essenziale. La resistenza elettrica viene misurata in diversi tratti in modo da osservare il possibile decadimento della deformazione dovuta a trazione nei cavi, prima che questa raggiunga la sezione critica.

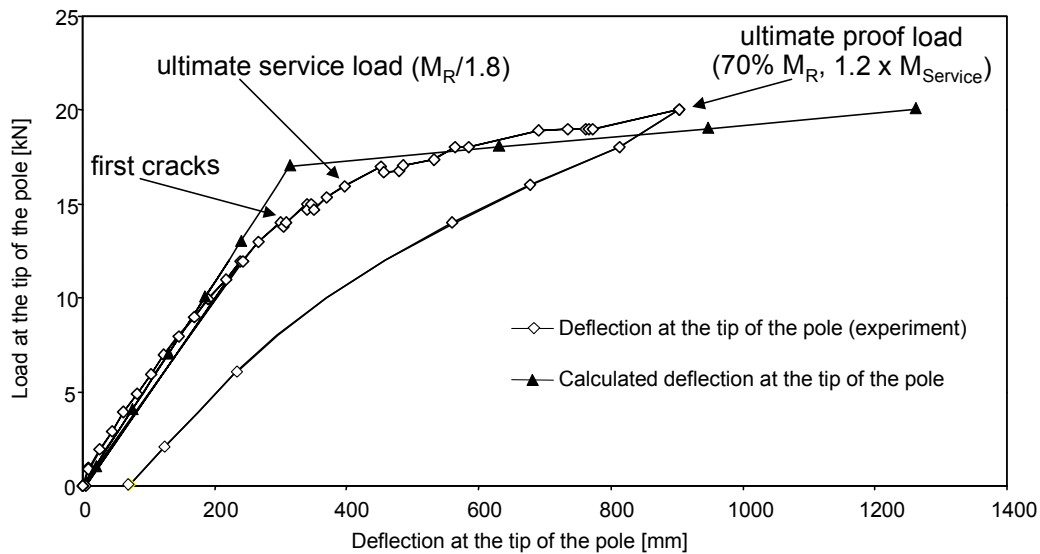


Figura 8

Per compensare l'influenza della temperatura, viene utilizzato un cavo CFRP non deformato come cavo fittizio.

Questo sistema di monitoraggio esegue misurazioni ad intervalli regolari ed i dati ottenuti vengono scaricati tramite un sistema remoto. Quest'ultimo dovrebbe rilevare le condizioni critiche. Se tale condizione si verifica, il sistema emette automaticamente dei messaggi di allarme.

La fattibilità della produzione di sezioni di pali sottili, leggeri e durevoli, in calcestruzzo centrifugato a resistenza elevata, precompresso in CFRP, è stata dimostrata dalla Società SACAC. Le sezioni mostrano una capacità rotazionale al taglio ed alla flessione, sufficiente a compensare la mancanza di plasticità delle armature fragili. La modellazione analitica descrive il comportamento flessionale e torsionale a breve termine della sezione, così come il comportamento flessionale e di compressione a lungo termine, in modo abbastanza preciso [9]. La prova di scorrimento plastico sotto carichi elevati, nella compressione assiale e flessionale, mostra deformazioni relativamente stabili. La compatibilità termica dei cavi CFRP con la matrice in calcestruzzo è un problema da prendere in considerazione nella progettazione dei pali durevoli proposti. Una concezione che considera l'ottimizzazione del peso delle sezioni grazie ad una precompressione completa dei pali per i carichi di servizio consente una notevole riduzione del peso rispetto ai progetti classici in cemento armato in acciaio per pali realizzati per colata centrifuga.

Il primo pilone del mondo in calcestruzzo precompresso ad alta resistenza per la trasmissione di tensioni a 110 kV è stato prodotto da SACAC nel settembre del 2000. La Figura 8 mostra i risultati di una prova di carico flessionale del palo di 27-m nel laboratorio strutturale dell'EMPA.

5. Elementi a nastro caricati su perno per un miglioramento attivo dello sforzo di taglio

Un nastro laminato caricato su perno, rinforzato con fibre di carbonio, come mostrato nella Fig 9a, può fornire un elemento di tensione pratica per il miglioramento allo sforzo di taglio delle strutture in calcestruzzo. Tale elemento può essere composto da un polimero rinforzato in fibre unidirezionali, con una frazione di volume di fibra di circa il 60%, avvolto intorno a due perni cilindrici in acciaio a forma di pista. Non viene richiesta nessuna lavorazione di fori per fare il nastro. Il nastro viene applicato in uno stato precompresso, esternamente alla struttura; due perni adeguati trasferiscono il carico di trazione fra la struttura e il nastro completamente consolidato.

I nastri laminati hanno le caratteristiche auspicabili come leggerezza, facile manipolazione, bassa conduttività termica e, soprattutto, una durata molto elevata. Una serie di esperimenti di laboratorio e di modellazione analitica di Winistörfer [10] hanno dimostrato come esistano forti concentrazioni di sollecitazioni nella zona dove il nastro ed il perno si incontrano. La resistenza tensile alla trazione del nastro è pertanto limitata solo al 40 fino al 60 % della resistenza unidirezionale prevista del materiale. Ciò è attribuito alle concentrazioni delle sollecitazioni, che portano a rotture premature.

Un nuovo approccio progettuale che diminuisce le concentrazioni indesiderate di sollecitazioni, supera le difficoltà di fabbricazione e riduce il costo, prevede l'uso di un sistema a nastri non laminati. Il principio è illustrato nella Figura 9b.

I nastri in CFRP ora comprendono un certo numero di strati rinforzati unidirezionalmente, formati da un unico nastro termoplastico continuo con uno spessore di circa 0.13 mm. Il nastro è avvolto intorno a due perni e solo l'estremità dello strato più esterno è incollato per fusione al successivo strato più esterno per formare un anello chiuso.

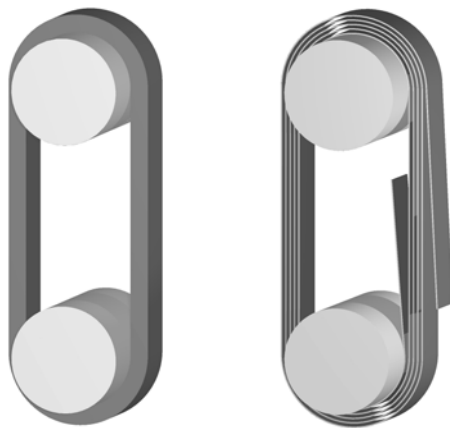


Figure 9a (sinistra) e 9b (destra)

L'elemento nastro non laminato consente ai singoli strati di spostarsi l'uno in relazione all'altro; ciò consente un livellamento delle forze negli strati quando il nastro viene messo in tensione. [10]. Le concentrazioni di sollecitazioni vengono ridotte dato che la nuova forma strutturale è più adeguata rispetto a quella equivalente laminata. Il controllo del processo iniziale di tensionatura riduce le

resistenze di taglio interlaminare in modo che sia possibile ottenere una distribuzione più uniforme delle deformazioni in tutti gli strati. Questo approccio consente di avere una maggiore flessibilità in termini di geometria del cavo di precompressione, e può essere realizzato sul posto. Inoltre, questa concezione sarà meno costosa dato che non è necessario alcun processo di consolidamento. Tali nastri non laminati sono attualmente immessi sul mercato dalla Società CARBOLINK.

6. Conclusioni

Nel settore delle costruzioni, attualmente, il volume d'affari annuale delle fibre di carbonio ammonta a circa 1.500 tonnellate in tutto il mondo. Questo corrisponde approssimativamente a tre quarti della quantità utilizzata nel settore aerospaziale e aeronautico. Si dovrebbe tuttavia ricordare che, ad oggi, l'uso di questo materiale nell'industria edilizia è quasi esclusivamente limitato al post-consolidamento di strutture esistenti, dove la quota delle nuove costruzioni resta trascurabile. Applicazioni come quelle descritte qui sopra aiuterebbero a sfruttare le elevate resistenze e la multi-funzionalità del CFRP. Per esempio, l'uso di CFRP, come cavi tesi di ormeggio di una piattaforma offshore ancorata ad una profondità di 1.100 m avrebbe bisogno di 600-tonnellate per piattaforma. Allo stesso modo, un ponte con una campata di 8 km, che utilizzi composti CFRP, costruito sullo stretto di Gibilterra (una prospettiva finora irrealistica) richiederebbe 105.000 tonnellate di materiale [11]. L'uso di composti CFRP per le piattaforme offshore – certo previsto per i prossimi anni – fornirebbe una spinta importante nelle applicazioni di nuova costruzione.

7. Bibliografia

- [1] U. Meier, "Brückensanierungen mit Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen", *Material und Technik*, 1987, Vol. 15, p.125 ... 128.
- [2] T. Ulaga and U. Meier, "Long-term behaviour of CFRP-laminate-strengthened concrete beams at elevated temperatures", 5th Int. conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures (FRPRCS-5), Cambridge, UK, 16.-18. Juli 2001, p. 147-155.
- [3] M. Deuring, "Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen", 1993, EMPA report no. 224.
- [4] U. Meier et al., 1997, United States Patent Number 5,617,685.
- [5] U. Meier et al., 1998, United States Patent Number 5,713,169.
- [6] I. Stöcklin and U. Meier, "Strengthening of concrete structures with pre-stressed and gradually anchored CFRP strips" 5th Int. conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures (FRPRCS-5), Cambridge, UK, 16-18 July 2001, 1: 291-296.
- [7] H. Meier and A. Bleibler, "The latest R&D in Structural Strengthening with Bonded CFRP Laminates", 1999, Proceedings of the Conference on Structural Faults and Repair, London.
- [8] G. P. Terrasi, Pylons made of high-strength spun concrete and prestressed with carbon fibre reinforced plastic for high power transmission lines, Proc ACUN-3 "Technology

Convergence in Composites Applications", UNSW, Sydney, Australia 6-9 February 2001; Eds. S. Bandyopadhyay et al, ISBN 0 7334 0791 9, pages 137-146.

- [9] G. P. Terrasi, Mit Kohlenstoffasern vorgespannte Schleuderbetonrohre, 1998, EMPA Bericht Nr., 240.
- [10] A. Winistoerfer (1999), Development of non-laminated advanced composite straps for civil engineering applications, Ph.D. Thesis, University of Warwick, May 20, 1999.
- [11] U. Meier, Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site, 1987, Proc Instn Mech Engrs Vol 201 B2, IMechE, p 73-78.

Indirizzi ed autori:

Prof. Urs Meier, EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Research,
Ueberlandstrasse 129
CH 8600 Dübendorf

Dr. Andreas Winistörfer and Dipl. Ing. ETH Iwan Stöcklin, CARBO-LINK GmbH, CH
8600 Dübendorf

Dr. Giovanni Pietro Terrasi, SACAC Schleuderbetonwerk AG, Im Lenzhard, CH 5600
Lenzburg