



Innovazione

Rinforzi Strutturali

Il cemento? Ora è d'acciaio

UN TESSUTO DI FIBRE D'ACCIAIO AD ALTISSIMA RESISTENZA IMMERSO IN UNA MATRICE ORGANICA (SRP) MA ANCHE, CON ULTERIORI VANTAGGI, INORGANICA (SRG). È L'ULTIMA FRONTIERA - SONDATA, SPERIMENTATA E ANCHE APPLICATA - IN FATTO DI RINFORZI DI STRUTTURE COME PONTI, VIADOTTI O VOLTE DI GALLERIE BISOGNOSE DI CURE MANUTENTIVE PER MIGLIORARE SICUREZZA E DIFESE ANTISISMICHE. DI SEGUITO, NE APPROFONDIAMO UNA TIPOLOGIA, SVILUPPATA DA UN'AZIENDA MADE IN ITALY A FORTE VOCAZIONE HIGH-TECH.

Mauro Armelloni

Irinforzi strutturali impiegati sotto forma di tessuti in acciaio ad altissima resistenza UHTSS immersi in una matrice organica (SRP) e inorganica (SRG) rappresentano una tecnologia versatile, di peso e spessori contenuti, che consente consolidamenti strutturali di elementi in calcestruzzo, c.a. o c.a.p. funzionali alla piena riqualificazione, nonché al miglioramento sismico di strutture debolmente armate, dissestate e ammalorate. Questa tecnica, proposta nel mercato nazionale negli ultimi anni, consente infatti di ottenere un miglioramento generale delle caratteristiche meccaniche delle strutture, soprattutto se ammalorate e soggette ad azioni sismiche, attraverso un rinforzo con fibre in acciaio e con elevata resistenza ortogonale alle stesse, progettato e commisurato alle azioni sollecitanti agenti in particolare modo per flessione, taglio e confinamento. Un esempio di questa soluzione tecnica è il sistema Steel Net, sviluppato da G&P Intech, che può essere adottato per il rinforzo di elementi costruttivi in calcestruzzo, c.a. e c.a.p., come evidenziato, nell'ambito di strutture quali pannelli murari, volte, pile, pilastri e impalcati. Quelle strutture, sostanzialmente, che abbiano manifestato vari gradi di ammaloramenti e dissesti e che è necessario mettere in sicurezza, in questo caso impiegando una tecnologia poco invasiva, di ridotto spessore e compatibile con le diverse esigenze del consolidamento strutturale. G&P Intech ha condotto e sta conducendo di-

verse indagini e sperimentazioni finalizzate a comprovare la validità del sistema. Oltre al quale, gestori di infrastrutture, imprese e progettisti possono contare su un servizio di consulenza e assistenza ingegneristica che si avvale anche di software dedicati. Ultima notazione prima di entrare nel vivo di questa soluzione tecnica innovativa: l'importanza di questo genere di tecnologie è stata anche riconosciuta dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti che nel 2012 ha istituito un'apposita commissione ministeriale, tuttora al lavoro, per la definizione di Linee Guida per l'impiego di materiali di rinforzo alternativi (rispetto per esempio ai più tradizionali FRP, Fiber Reinforced Polymer).

Matrici e vantaggi

Un primo approccio alle fibre in acciaio per il rinforzo strutturale deve portare con sé, come abbiamo accennato nell'*incipit*, una distinzione di matrici tra "organiche" e "inorganiche". Nel caso di Steel Net - realizzate in acciaio sia ottonato sia galvanizzato - le principali matrici organiche (SRP) sono Resin Primer, Resin 90 e Resin 75 (conformi alla norma UNI EN 1504-4). Il tessuto Steel Net 310, per esempio, è utilizzato esclusivamente con matrici organiche.

Le principali matrici inorganiche (SRG), invece, sono:

- Concrete Rock V2: malta cementizia bicomponente reattiva specifica per bassi spessori, elevata resistenza e adesione al supporto, resistente ai solfati (conforme alla UNI EN 1504-3, classe R4);

1. Ponte San Giuliano a Mestre (gestore Veneto Strade). Per la riqualificazione della spalla è stata adottata una soluzione in fibre d'acciaio con matrice inorganica

2. Il tessuto in fibre d'acciaio prima dell'applicazione

- Concrete Rock S: malta a reattività pozzolanica (conforme alla UNI EN 1504-3, classe R2).

- Limecrete: malta in calce e pozzolana M15 di elevata resistenza meccanica e adesione al supporto (conforme alla UNI EN 998-2).

Tra gli interventi recenti di rinforzo strutturale attraverso l'impiego di questo genere di tecnologia registriamo quello a cui si riferiscono le figg. 1, 2, 3 (pag. precedente) a illustrazione di questo articolo, commissionato da Veneto Strade e riguardante una spalla del ponte di San Giuliano, a Mestre.

Si è trattato, nello specifico, di un intervento di rinforzo del calcestruzzo armato che ha previsto l'impiego di Steel Net G 80 e G220 con malte speciali bicomponenti Concrete Rock V2 e connettori in acciaio SFIX G12 galvanizzato inghisati con adesivo Resin 75-90.

Passiamo quindi a riportare in modo più sistematico gli ambiti d'impiego e i vantaggi di Steel Net. Per quanto riguarda i primi, si tratta di:

- Rinforzo di elementi in calcestruzzo, calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso quali travi, pilastri, soalai, muri di sostegno, superfici voltate (per esempio volte di gallerie).

- Incremento di resistenza di pannelli murari portanti, pilastri, archi, volte in muratura;

- Rinforzo a pressoflessione e taglio di pannelli murari.

- Confinamento di elementi strutturali.

- Realizzazione di cordoli in muratura armata.

- Collegamenti di elementi collaboranti alle azioni esterne, anche a mezzo pretensionamento

I vantaggi, invece, possono essere così riassunti:

- Elevata resistenza a trazione e taglio, miglioramento della duttilità della struttura.

- Elevata resistenza ortogonale alla direzione delle fibre.

- Possibilità di pretensionare la fibra in acciaio.

- Ridotti spessori, peso e invasività per le opere da consolidare e per gli edifici storici.

- Data la versatilità del sistema Steel Net impiegato con matrici organiche e inorganiche per i diversi substrati, possibilità di ottenere superfici rinforzate con superiore adesione, minimi spessori, elevata traspirabilità.

- Elevata resistenza agli impatti quali urti, esplosioni, azioni ortogonali alla direzione della fibra.

- Applicabilità su superfici anche irregolari con ridotti oneri di livellamento in particolare con l'impiego di matrici inorganiche (SRG).

- Migliore resistenza al fuoco con l'impiego di matrici inorganiche (SRG).

- Elevata resistenza alla corrosione in ambiente alcalino (fibre in acciaio galvanizzato).

- Compatibilità e reversibilità del sistema in ambito Beni Culturali.

- Minori oneri di cantiere.

Questo genere di tessuto unidirezionale in acciaio UHTSS (ottonato e galvanizzato) è prodotto in grammature e dimensioni standard e specificatamente Steel Net 310 di 3056 g/m², 190 di 1910 g/m², 150 di 1528 g/m² (serie in acciaio ottonato); quindi Steel Net G 300 di 3000 g/m², G 220 di 2200 g/m², G 80 di 700 g/m² (serie in acciaio galvanizzato).



Ricerca sperimentale

Sono state condotte varie sperimentazioni presso i laboratori G&P Intech e Università al fine di determinare alcuni parametri tecnici fondamentali per le caratteristiche tecnologiche del sistema, per un corretto impiego della tecnologia e per la rispondenza dei dati ai fini della modellazione strutturale. È infatti necessario - spiegano da G&P Intech - conoscere ai sensi delle raccomandazioni in materia di materiali compositi (Linee Guida sugli FRP - C.S.LL.PP. 24/7/2009 e succ.) quali siano le deformazioni ultime (ϵ_{fd}) del tessuto in acciaio UHTSS valide ai fini del calcolo che possiamo identificare in generale nelle deformazioni per delaminazione o per altri sistemi di crisi. Un parametro che in ogni caso è fortemente influenzato dallo stato del supporto, dalle condizioni reali di interfaccia, dal tipo di rinforzo e matrice impiegata, nonché dagli eventuali ancoraggi. In particolare citiamo qui di seguito un'importante sperimentazione su scala reale condotta presso il Laboratorio Ponti e Strade della facoltà di Ingegneria (dipartimento DICEA) dell'Università di Padova e i cui risultati sono og-

3. Stesa del sistema Steel Net G Concrete Rock V2

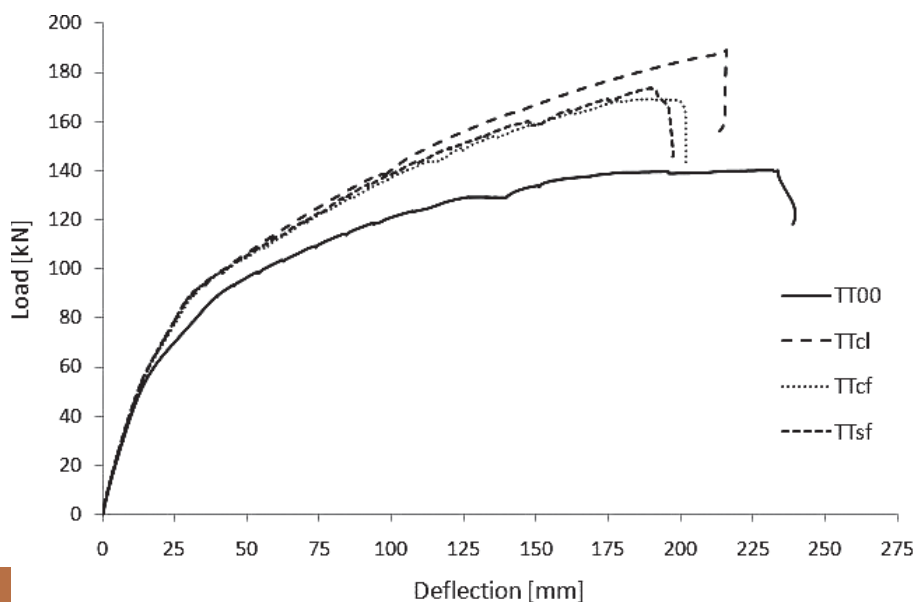
4. Curva carico-abbassamento in mezzeria per le travi in cap

5. Rottura della trave di controllo non rinforzata TT00

6. Rottura della trave TTcl con lamelle CFK in carbonio

7. Rottura della trave TTcf con reti in carbonio e malte

8. Rottura della trave TTsf con tessuto in acciaio UHTSS e malte





getto di pubblicazione scientifica in campo internazionale. Ai fini del presente contributo tecnico-giornalistico riportiamo più in dettaglio i soli dati relativi al rinforzo con acciaio Steel Net 190 in matrice inorganica reattiva Concrete Rock V2, specificatamente formulata per tali impieghi. L'obiettivo della ricerca è stato quello di determinare e confrontare l'efficacia dei sistemi compositi a matrice cementizia FRCM ed SRG rispetto ai classici sistemi FRP, nell'am-

bito del rinforzo flessionale di elementi strutturali in scala reale. L'oggetto della sperimentazione riguardava quattro elementi strutturali binervati in cap a cavi pretesi con sezione doppio T di dimensioni 40x194 cm e lunghi 11,67 m, prodotti nel 1999 e ricavati da una copertura piana di uno stabilimento in fase di ristrutturazione. La scelta di elementi così ingombranti è stata dettata dal fatto che campioni in scala ridotta non conducono spesso a risultati sperimentali sufficientemente realistici per quelle che sono le applicazioni dei rinforzi sulle opere di edilizia esistente. Sono state testate a confronto tre tipologie di rinforzo progettate con pari capacità resistente: TT-02 con rinforzo classico in materiale composito CFRP (Lamella CFK pultrusa in carbonio installata con adesivo omologato Resin 90) e due tipi di rinforzo FRCM e SRG (TT-03 con doppia rete in carbonio unidirezionale C-NET 200U e TT-04 con fibra in acciaio UHTSS Steel Net 190, entrambi in matrice inorganica fibrorinforzata reattiva a elevata capacità adesiva Concrete Rock V2). Le sezioni di rinforzo sono state progettate sviluppando un modello analitico nell'ambiente di calcolo Wolfram Mathematica 8.0, con la possibilità di modificare secondo le esigenze i dati di input, implementare leggi costitutive non lineari dei materiali e risolvere equazioni di equilibrio in diversi casi di integrazione. I risultati allo Stato Limite Ultimo relativi alla trave non rinforzata, sono stati poi verificati con il freeware Vca-Slu. Il modello analitico finale implementato con i dati sperimentali dei tests di laboratorio ha dimostrato un buon allineamento tra i risultati di calcolo e i dati sperimentali, con uno scarto del $\pm 5\%$, imputabile ai parametri meccanici che non è stato possibile determinare in modo completo sperimentalmente.

I risultati sperimentali complessivi allo SLU sono riportati nel sottostante diagramma carico-freccia (fig. 4) e in tabb. 1, 2, 3. Le figg. 5, 6, 7, 8 riportano le immagini dei test condotti.

TABELLA 1 RISULTATI SPERIMENTALI

Sezione di mezzeria	TT_01	TT_02	TT_03	TT_04
Carico massimo al martinetto - $P_{max} =$	139,987 kN	189,088 kN	169,235 kN	173,628 kN
Freccia a $P_{max} - f_{med} =$	238,26 mm	214,50 mm	200,87 mm	196,33 mm
Deformazioni a P_{max}	$\epsilon_{min} =$	-1,859‰	-1,085‰	-1,030‰
	$\epsilon_{max} =$	+10,340‰	+8,319‰	+7,568‰

TABELLA 2 CONFRONTO TRA DEFORMAZIONI IN MEZZERIA

Trave	ϵ_c (‰)	ϵ_f (‰)	Utilizzo cls (%)	Utilizzo fibre (%)	σ_c (MPa)	σ_f (MPa)
TT_01	-1,859	-	93,0	-	-77,7	-
TT_02	-1,085	8,319	54,3	50,4	-45,4	1.397,6
TT_03	-1,030	7,568	51,5	43,2	-43,0	1.816,3
TT_04	-0,973	7,081	48,7	42,1	-40,7	1.345,4

TABELLA 3 INCREMENTO MOMENTO ULTIMO M

Trave	Carico a rottura C_u (kN)	Incremento di C_u (%)	Momento a rottura M_u (kNm)	Incremento di M_u (%)
TT_01	139,987	-	290,857	-
TT_02	189,088	35,08	378,944	30,29
TT_03	169,235	20,89	343,328	18,04
TT_04	173,628	24,03	351,209	20,75

Obiettivo affidabilità

I risultati allo SLU ottenuti sperimentalmente hanno confermato l'efficacia di tutti i sistemi di rinforzo testati, che hanno permesso di ottenere considerevoli incrementi di resistenza a flessione e rigidità rispetto alla trave di controllo con modeste variazioni in rapporto al tipo di rinforzo. In particolare la trave TT_04 rinforzata con fibra in acciaio Steel Net 190 ha registrato un incremento del carico ultimo del 24%, un forte incremento della rigidità della trave rinforzata e ha presentato una rottura più duttile (al pari della rete in carbonio) rispetto al sistema CFRP. La freccia in mezzeria a parità di carico è risultata decrementata del 60% rispetto alla trave di controllo. Il quadro fessurativo delle travi rinforzate, se rapportato al carico di rottura di ciascun campione, mostra miglioramenti in termini di ampiezza e di distanza media tra le fessure, segno che i rinforzi hanno agito ricucendo le fessure nel calcestruzzo al lembo teso. La profondità delle fessure risulta minore, testimoniando un assetamento dell'asse neutro più vicino al baricentro della sezione, e il quadro fessurativo risulta in generale più esteso nella zona di luce al taglio, testimoniando che il rinforzo ripartisce la sollecitazione esterna in maniera più uniforme, richiamando riserve di resistenza a flessione anche all'esterno della zona a momento costante. In tab. 2 sono riportate le deforma-

zioni ultime del calcestruzzo compresso e del rinforzo teso nella sezione di mezzeria ottenute sperimentalmente e le percentuali di utilizzo dei materiali rispetto alle deformazioni ultime ottenute in laboratorio con le relative tensioni corrispondenti. In particolare si rileva nella TT_04 la deformazione limite a delaminazione $efd = 7,081\%$ del sistema Steel Net 190 impiegato con malta reattiva Concrete Rock V2.

In conclusione sulla base dei test sperimentali condotti su strutture in c.a. e c.a.p., confrontabili con analoghi risultati ottenuti da G&P Intech e in campo internazionale, si può affermare che il sistema Steel Net in matrice inorganica reattiva Concrete Rock V2 può essere considerato un affidabile sistema di rinforzo delle strutture con alcuni evidenti vantaggi operativi quali minori oneri di preparazione dei supporti, spessori e pesi contenuti, traspirabilità, maggiore resistenza al calore e al fuoco, agli urti, resistenza in direzionale ortogonale alla fibra. Analogamente per diversi tipi di supporto il sistema Steel Net può essere impiegato anche con adesivi epossidici Resin 90 e con matrici inorganiche in calce e pozzolana Limecrete per il settore murario. ■■



9

9. Tessuto in acciaio Steel Net

10. Rinforzo travi in c.a.p.

11. La copertina del Quaderno AIPCR CT 4.3 - Ponti Stradali

Dal carbonio all'acciaio: il tema dei rinforzi al centro del lavoro della comunità tecnica AIPCR

Nel vivo della ricerca. Quella basata su un serrato lavoro di squadra, al di qua e al di là delle Alpi, che ha avuto tra gli esiti più recenti, i Quaderni AIPCR presentati nel corso del Convegno Nazionale di Roma 2014, che ha riunito la comunità tecnica italiana anche in vista dell'importante appuntamento del Congresso mondiale di Seoul. Il tema delle riparazioni e dei rinforzi, in particolare, è stato affrontato nell'ambito del Comitato Tecnico 4.3 - Ponti Stradali (presieduto dal professor Michele Mele, dell'Università La Sapienza di Roma) e, tra gli altri, dal Gruppo di Lavoro 3 "Riparazioni e rinforzi". Coordinatore del gruppo specifico dedicato alle strutture è stato l'ing. Giorgio Giacomini, membro di associazioni e

comitati tecnici nazionali e internazionali (IABMAS, RILEM, CNR DT 200/2004 e SUCC.) che ha lavorato a stretto contatto dei professori Carlo Pellegrino e Tommaso D'Antino, del DICEA (Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale) dell'Università di Padova. Le ricerche sviluppate hanno avuto il merito di poter presentare, nell'ambito del quaderno, un quadro teorico-sperimentale di rilevante profilo tecnico. Le attività hanno riguardato in particolare la riparazione e il rinforzo strutturale di ponti e viadotti con l'impiego dei CFRP, compositi fibrorinforzati a matrice polimerica, anche pretesi (fibre lunghe in carbonio ad alta resistenza e a matrice organica), nonché proprio dei tessuti in acciaio UHTSS in matrice organica (SRP) e della più recente tecnologia dei materiali compositi a matrice inorganica cementizia (FRCM-SRG) con l'impiego di trefoli tessuti in acciaio UHTSS. Il carbonio, come è noto, risulta oramai una tecnologia di comune utilizzo nell'ambito delle applicazioni pratiche come soluzione efficace e a basso grado di invasività per il rinforzo strutturale. Più recente è, invece, l'approccio manutentivo basato sull'acciaio. Tra i suoi vantaggi: la possibilità di ricorrere a un materiale "tradizionale" come la matrice inorganica cementizia (a differenza delle matrici organiche usate nei CFRP) capace di trasferire il carico e mantenere le principali caratteristiche meccaniche anche in caso di elevate

temperature. Il sistema è inoltre applicabile in condizioni climatiche di temperatura e di umidità meno favorevoli, ha una migliore stabilità delle caratteristiche meccaniche se esposto a radiazioni UV, è traspirante al vapore d'acqua, è di più rapida e agevole applicazione su supporti spesso irregolari e scabrosi. I Quaderni di Roma sono consultabili sul sito Internet www.aipcr.it



10



11