



ELEMENTI PULTRUSI IN FRP

Il rinforzo di solai lignei

di Antonio Borri
Università degli Studi di
Perugia (borri@unipg.it)
Andrea Giannantoni
Servizi di Ingegneria, Foligno
(andrea.giannantoni@
serviziingegneria.com)

Varie e molteplici possono essere le motivazioni per un intervento di rinforzo di un solaio ligneo. Tra queste, le più frequenti sono legate ad incrementi di carichi accidentali, comuni in edifici storici in caso di variazioni di destinazione d'uso o di adeguamento a nuove normative tecniche, a diminuzioni delle sezioni resistenti a causa di ammaloramento (attacchi di agenti biotici, quali funghi, insetti, etc.), alla necessità di recuperare l'efficienza funzionale per eccessive deformazioni delle membrature lignee, o a seguito di eventi traumatici, quali urti, incendi, etc.

In alternativa alle tecniche tradizionali, che utilizzano, per il rinforzo, materiali di apporto quali l'acciaio, il calcestruzzo armato o altro legno, l'uso di materiali compositi (lamine, barre, o profilati veri e propri in pultruso) presenta alcuni vantaggi evidenti quali il minor peso e la minore invasività. Tale soluzione si può inserire tra le tecniche di rinforzo "leggero", che possono consentire, tra l'altro, di limitare l'intervento sulla sovrastante struttura, con evidenti vantaggi dal

punto di vista dei tempi di realizzazione, e, non in ultimo, nell'ottica della conservazione del patrimonio edilizio storico. Inoltre, a differenza di altri materiali "tradizionali", gli FRP non presentano problemi di corrosione e creep, e la compatibilità fisico-chimica tra legno ed FRP è migliore di quella tra legno ed acciaio.

In precedenti articoli comparsi su questa stessa rivista [1-2-3] sono state illustrate alcune sperimentazioni condotte su elementi lignei rinforzati con tessuti o con barre in FRP, mostrando come l'incremento di prestazioni in termini sia di rigidità che di resistenza sia interessante ma comunque contenuto.

Nel presente lavoro sono riassunti i risultati di alcune recenti esperienze di rinforzo di elementi lignei con pultrusi in FRP costituiti da lamine o da profilati veri e propri, caso quest'ultimo per il quale gli incrementi di prestazioni assumono un particolare rilievo. Si rinvia a [4] e [5] per un quadro completo e per quanto concerne le metodologie di calcolo e il dimensionamento di tali rinforzi.

NUOVE SPERIMENTAZIONI

Sono qui riassunti i risultati di alcune prove sperimentali condotte di recente nel Laboratorio Strutture della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia (Sede di Terni), ed anche in situ su strutture reali, che hanno riguardato travi rinforzate con lamelle o con profilati pultrusi in FRP.

Indagine sperimentale n. 1

La sperimentazione è relativa al consolidamento con lamelle in CFRP di un solaio ligneo di un fabbricato della Società SIAZ a Trevi (Foligno) (figure 1 e 2). Si riassumono qui alcuni risultati della sperimentazione eseguita, rimandando a [5] per la descrizione completa dell'intervento.

Al primo piano dell'edificio è presente un ampio vano (oltre 260 mq) destinato a magazzino per le granaglie. Il fascino strutturale di questo vano è dovuto alla natura del solaio di calpestio, realizzato con una tripla orditura di travi lignee (legno di abete in buone condizioni) di grande luce, ben conservate ed oggetto di vincolo da parte della Soprintendenza. Il problema è stato quello dell'adeguamento delle strutture ai rilevanti carichi di esercizio, con problemi sia di resistenza che di eccessiva deformabilità. La verifica di una delle travi in legno dimostra, infatti, come già con i carichi dello stato attuale vengano abbondantemente superati i limiti ammissibili. Per il rinforzo di questi elementi strutturali si è optato per l'uso di lamelle pultruse in CFRP, disposte sia in zona tesa che in zona compressa, confinate all'interno della sezione lignea mediante resina epossidica. Le lamelle, disposte lateralmente come indicato in figura 3, hanno dimensioni (mm 80 x 1.2) tali da consentire un intervento poco invasivo e ben poco visibile, almeno rispetto ai tradizionali rinforzi e/o sostituzioni.

Per verificare l'efficacia dell'intervento di rinforzo sono state effettuate alcune prove sperimentali, sia statiche che dinamiche, su una trave principale ed una secondaria; prove condotte sia prima che dopo l'applicazione degli elementi in materiale composito. L'entità dei carichi che è stato possibile applicare ha consentito di investigare, per ovi motivi, esclusivamente la fase elastica (carichi di esercizio).

Per le prove statiche le travi sono state strumentate con flessimetri centesimali posizionati nella mezzera, ad L/4 ed agli appoggi. Le prove dinamiche sono state realizzate mediante l'impatto di una massa di 100 kg lasciata cadere da una quota di 1,60 m sul pavimento sovrastante le travi strumentate. L'impulso generato dalla caduta del grave è stato acquisito mediante un vibrometro laser (basato sull'interferometria laser-Doppler di perturbazioni ondose) e, contemporaneamente, anche da un sistema di fibre ottiche incollate sulle travi e strumentate con reticoli di Bragg (Fiber Bragg Grating), che rilevano le variazioni di lunghezza d'onda del segnale ottico durante la perturbazione dinamica.

Dalla lettura dei flessimetri e del vibrometro laser sono state ottenute informazioni sull'andamento degli spostamenti sia in fase statica che in quella dinamica. Con le fibre ottiche dotate di reticolo di Bragg sono state invece acquisite informazioni sulle deformazioni sul legno e sul composito.

Le successive figure mostrano due fasi della preparazione dei rinforzi con le lamelle: l'esecuzione delle linee di incasso per le lamelle in CFRP (figura 4); l'inserimento della lamella in CFRP (figure 5 e 6). Per brevità vengono qui sinteticamente riassunti solo i risultati più significativi ottenuti per la trave secondaria (la più deformabile).

Gli abbassamenti relativi alla sezione di mezzera hanno evi-

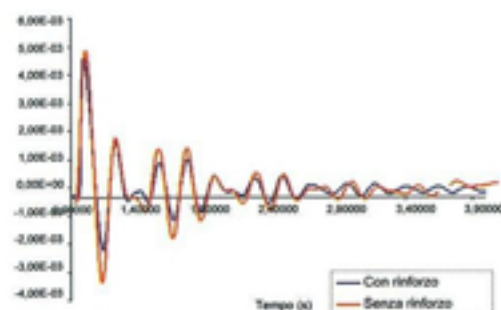
1. Solaio ligneo dell'edificio SIAZ. 2. Particolare dell'orditura secondaria. 3. Posizionamento delle lamelle in FRP. 4. Esecuzione delle linee di incasso per le lamelle in CFRP. 5. Inserimento della lamella in CFRP. 6. Rinforzo sulla trave principale (particolare).



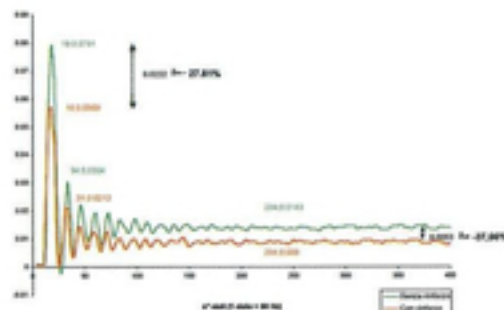
1, 2, 3



4, 5, 6



7



8

7. Andamento degli spostamenti (mm) in mezzera rilevati con il vibrometro laser. 8. Variazione della lunghezza d'onda del segnale generato dalla perturbazione dinamica nella fibra intradosale della trave secondaria.

denziato una diminuzione della freccia dell'ordine dell'11%, in pieno accordo con quanto previsto con una analisi numerica condotta preventivamente. Si noti che lo stesso modello numerico prevede per tale trave un incremento del carico ultimo del 41% in virtù del rinforzo con FRP.

Le prove dinamiche hanno evidenziato un decremento dei valori di picco (figura 7) degli spostamenti nel tempo a seguito del rinforzo in composito.

Le letture nelle fibre ottiche con reticolo di Bragg disposte su legno hanno mostrato una sensibile riduzione della lunghezza d'onda del segnale generato dalla perturbazione dinamica (correlato direttamente con la deformazione delle fibre monitorate) (figura 8), mentre quelle disposte sulle lamelle in composito (sia quelle in zona tesa che quelle in zona compressa) hanno dimostrato il buon funzionamento dell'incollaggio tra legno e lamelle, evidenziando l'atteso coinvolgimento nella deformazione delle fibre del composito.

Indagine sperimentale n. 2

La sperimentazione rientra nel progetto di consolidamento di un edificio situato ad Azzano, nel Comune di Spoleto, destinato a civile abitazione. La struttura portante dell'immobile è in muratura di pietrame, mentre i solai sono realizzati con doppie orditure lignee, massetto di calce dello spessore di 4-5 cm e pavimento di piastrelle in cotto. I solai hanno orditure

principali costituite da travi a sezione quadrata (circa 28x28 cm), mentre le orditure secondarie sono formate da elementi di luce di circa 260 cm, con sezione di 10x10 cm, disposti ad un intervallo di 38 cm.

A causa di problemi di eccessiva deformabilità nelle sole orditure secondarie, e visto il vincolo della Soprintendenza per alcuni solai di calpestio, il progetto di intervento ha previsto l'utilizzo di lamelle pultruse in fibra di carbonio, inserite dall'intradosso all'interno della sezione lignea.

Per sondare l'efficacia dell'intervento sono state eseguite alcune prove di carico statiche. Anche in questo caso l'entità dei carichi che è stato possibile applicare ha consentito di investigare esclusivamente la fase elastica. I carichi sono stati applicati mediante un gommone per il collaudo di solai, sistemato nell'area compresa tra la trave principale e il muro perimetrale laterale su cui appoggiano le orditure secondarie. La prova ha interessato tre travetti posizionati al centro dell'area caricata, in modo da avere meno interferenze possibili con i bordi del solaio. Le orditure secondarie sono state strumentate con flessimetri centesimali. Tali misuratori sono stati posizionati nella mezzera, ad L/4, ed agli appoggi.

Le prove sono state svolte in due fasi: nella prima sono state misurate le deformazioni dei travetti allo stato attuale, incrementando il carico con valori tali da non arrecare alcun danno alla struttura; una volta raggiunto il picco massimo, si è

9. Solaio non rinforzato.
10. Fase di taglio.
11a,b. I tagli pronti e l'inserimento delle lamelle.
12. Travetti rinforzati.



9



10

11a,b



12



poi proceduto alla fase di scarico, fino a riportare le sollecitazioni a valori pressoché nulli. E' stato poi realizzato il rinforzo, attraverso le seguenti fasi di lavorazione: in una prima fase sono state posizionate le guide metalliche ai lati dell'elemento da tagliare, per l'esecuzione dell'incasso delle lamelle in CFRP; si è poi inserita la resina epossidica all'interno dei tagli, fino a raggiungere la saturazione degli stessi; si è quindi passato uno strato di resina sulle due facce delle lamelle ed infine si sono inserite queste ultime all'interno dei tagli.

Il rinforzo degli elementi lignei è stato effettuato con lamelle in CFRP con sezione rettangolare di dimensioni pari a 0.012x2.50 cm, e modulo elastico pari a 1.500.000 Kg/cmq (figure 9-11). Si è scelto di rinforzare due travetti nella zona centrale dell'area soggetta a carico, per ridurre al minimo il disturbo provocato dalle condizioni al contorno: il travetto n. 1 è stato consolidato con una sola bandella posta nella parte tesa in posizione verticale all'interno della sezione, mentre al travetto 2 sono state applicate, sempre inserite nella sezione dall'intradosso, due bandelle disposte ancora verticalmente.

Confrontando i risultati ottenuti nella prova effettuata prima del rinforzo con quella ottenuta rinforzando la trave con una lamella in zona tesa, disposta verticalmente, si è riscontrato un incremento di rigidità di circa il 22% (figura 12). Un incremento maggiore (31%) si riscontra applicando due bandelle. Tale risultato è paragonabile, come efficacia in termini di rigidità, a quello che si avrebbe con un intervento di consolidamento mediante una soletta in c.a. all'estradosso.

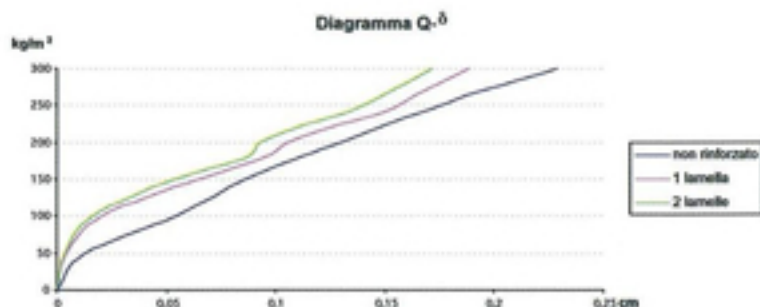
Può essere interessante confrontare gli oneri di questa tipologia di intervento con quelli di un intervento di tipo tradizionale (soletta in c.a. estradosale), anche se, nel caso in questione, tale soluzione non sarebbe stata comunque possibile, dato il vincolo della Soprintendenza che escludeva lo smontaggio del pavimento.

Da un'analisi dei prezzi si desume un costo di circa 80 euro/ml di trave per il rinforzo intradosale con una lamella in CFRP che, per il caso in esame ($80 \times 100/38 = 210$ euro/mq), è di poco superiore ai circa 200 euro/mq del consolidamento estradosale con c.a. Il confronto economico diventa decisamente a vantaggio degli FRP nel caso di travetti disposti ad interesse maggiore (ad esempio in presenza di un tavolato).

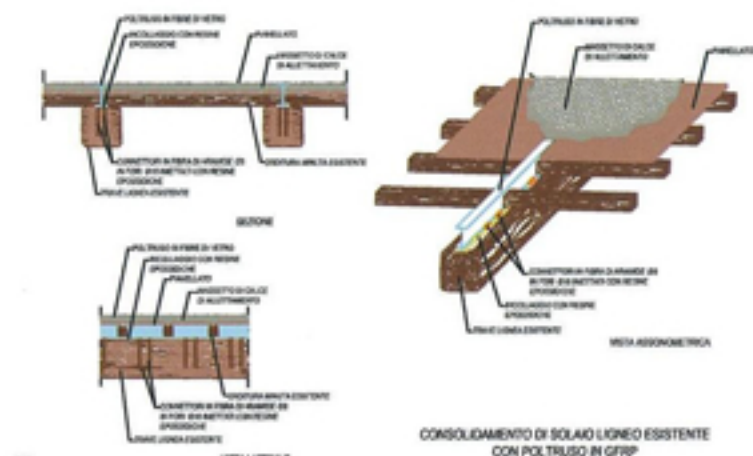
Indagine sperimentale n. 3

Sono state eseguite nel Laboratorio Strutture della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia (Sede di Terni) alcune nuove sperimentazioni che riguardano il rinforzo flessionale di elementi lignei con profilati pultrusi in fibra di vetro disposti all'estradosso. Di questa esperienza si vogliono qui anticipare alcuni degli elementi più significativi che appaiono di notevole interesse, rimandando ad un successivo articolo la presentazione dettagliata dei risultati ottenuti per le varie tipologie di travi in GFRP utilizzate (IPE, HE, o C accoppiate).

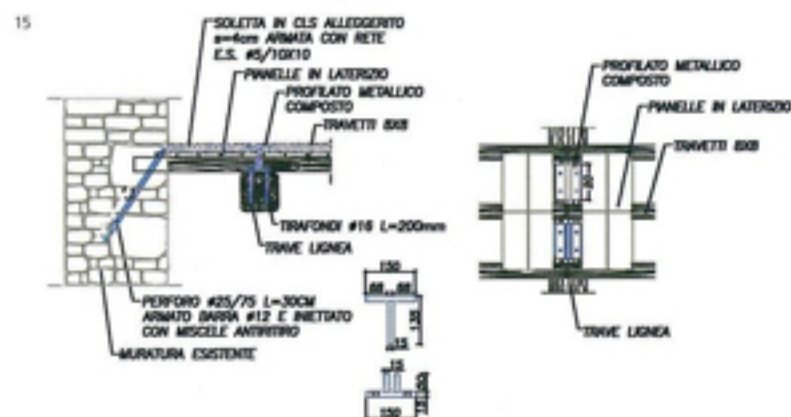
I vantaggi dell'utilizzo di una trave in FRP rispetto alla analoga soluzione con una trave di acciaio sono molto rilevanti e consistono nella maggiore leggerezza e soprattutto nella semplicità di lavorazione del pultruso nel cantiere per adattarlo alla situazione del solaio esistente.



13



14



15

La finalità principale della prima sperimentazione condotta ha riguardato proprio la verifica dell'effettiva operatività di un intervento del tipo riportato in figura 14, dove si può vedere come la trave in GFRP, posta sull'estradosso della trave lignea, deve essere adeguatamente ritagliata in cantiere per poter mantenere i travetti nella loro posizione senza doverli smontare. E' evidente che nel caso di una trave di acciaio questa lavorazione risulta molto onerosa, anche prevedendo una soluzione con travi a T completate in opera con l'aggiunta, nella parte inferiore, dell'ala mancante tra un travetto e l'altro (figura 15).

Le prove effettuate in laboratorio hanno mostrato come sia invece molto semplice, attraverso un semplice trapano, un se-

13. Grafico carico-spostamento. 14. Intervento di rinforzo di un solaio ligneo con una trave pultrusa in GFRP. La trave può essere sagomata in opera con facilità, inserita senza smontare l'orditura secondaria, e collegata alla trave mediante incollaggio con resina epossidica e connettori (p.es.: chiodi in GFRP). 15. Intervento analogo al precedente, eseguito con una trave in acciaio.

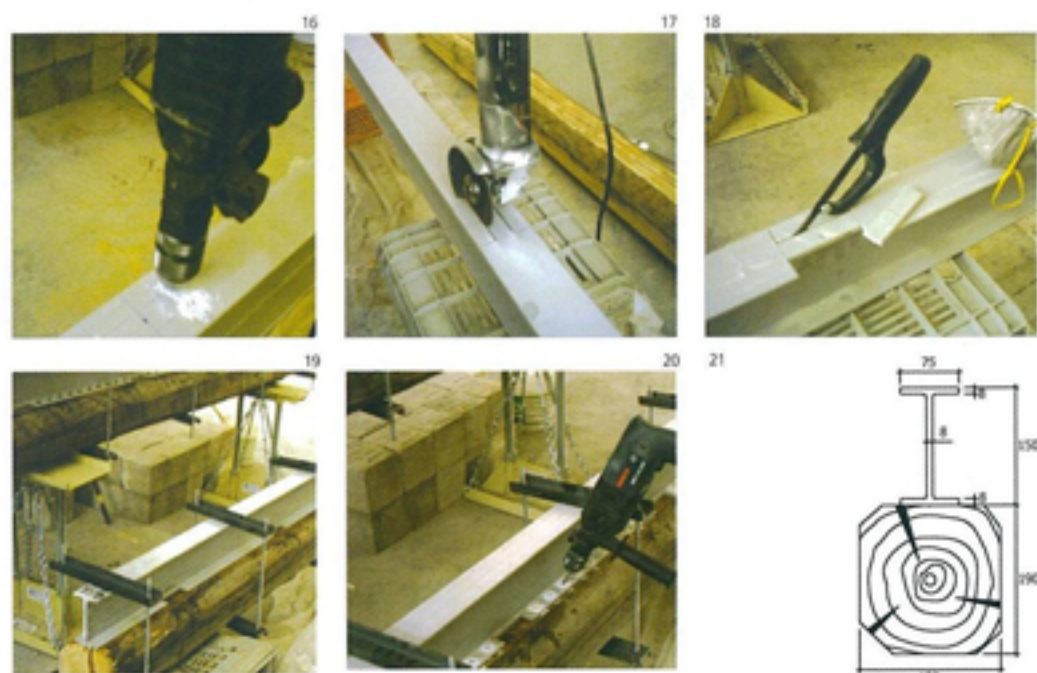
RINGRAZIAMENTI

Hanno collaborato alle sperimentazioni riassunte nel presente lavoro: l'ing. Roberto Becchetti, l'ing. Marco Corradi e l'ing. Antonio Trimboli, le società MAXFOR e ECT, e le imprese edili Filippucci, Ediltecnica e dell'ing. Pompa.

ghetto manuale ed un "frullino", ritagliare le parti delle ali inferiori delle travi in GFRP (figure 16-21) per adattarle alle necessità del caso. Le sperimentazioni sulle travi hanno riguardato sia l'incremento di rigidità che di carico ultimo. Sono stati provati tre diversi tipi di collegamento con la trave lignea: fermo restando per tutte e tre le travi, l'incollaggio della trave in GFRP a quella lignea con resine epossidiche, sono state utilizzate per le connessioni meccaniche: a) viti autofilettanti; b) chiodi in GFRP; c) bulloni in acciaio.

Le figure 22 a,b,c mostrano alcuni tipici grafici forza-spostamento. Gli incrementi di rigidità ottenuti, variabili in funzione dei profili dei pultrusi utilizzati, sono molto consistenti (dal

60% al 200% e più) ed anche per il carico ultimo (figura 22 d) si sono avuti incrementi molto rilevanti (fino a 2-3 volte). Le prove sin qui effettuate hanno avuto risultati di notevole interesse, e dimostrano la grande efficacia del rinforzo con l'elemento in pultruso disposto in zona compressa. E' da citare, infine, che sono state riscontrate differenze rilevanti tra i valori indicati dalle ditte nelle schede tecniche dei loro prodotti ed i valori trovati sperimentalmente, molto probabilmente a causa di qualche diversità nelle modalità delle prove. Questo fatto sottolinea, ove ancora necessario, l'importanza di una normativa di riferimento comune a tutti gli operatori del settore.



16. Foratura degli angoli dell'intaglio mediante trapano. 17. Intaglio con frullino. 18. Completamento dell'intaglio con seghetto. 19. Connessione e serraggio con morse dopo l'incollaggio con resina. 20. Connessioni con la trave lignea: foratura con trapano. 21. Sezione tipo di una trave rinforzata con pultruso. 22. Grafici tipici delle prove di flessione: a,b,c) prove di rigidità sulle 3 travi rinforzate e non, con vari tipi di connettori; d) Prove a rottura.

