



# CRITERI PROGETTUALI E TECNICHE INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO: RINFORZO DI TRAVI LIGNEE MEDIANTE ELEMENTI PULTRUSI

di Antonio Borri<sup>a</sup> e Romina Sisti<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Già Ordinario di Scienza delle Costruzioni nell'Università di Perugia

<sup>b</sup> Ricercatrice t.d. nell'Università di Napoli – Federico II

**Parole chiave:** miglioramento sismico, edifici storici, interventi innovativi, rinforzo travi lignee, pultrusi.

L'articolo (suddiviso in tre parti) ripropone alcune tecniche per il miglioramento sismico di edifici storici, pensate e sperimentate negli ultimi anni da un gruppo di ricerca dell'Università di Perugia<sup>1</sup>.

Nella prima parte sono state riassunte alcune delle maggiori problematiche sismiche delle costruzioni storiche ed è stata ricordata la tecnica del *Reticolatus*, ideata da uno Spin Off dell'Università di Perugia.

Nella seconda parte sono state ricordate altre due tecniche rivolte al miglioramento sismico di manufatti storici: le travi cordolo in muratura armata e le volte tabicade armate.

In questa terza parte vengono richiamate le esperienze relative al rinforzo di travi lignee mediante elementi pultrusi.

## PROPOSTE DI METODOLOGIE E SOLUZIONI INNOVATIVE

Le metodologie di intervento basate sull'utilizzo di nuovi materiali e di tecnologie innovative possono contribuire a conciliare tra di loro le richieste di una conservazione consapevole delle aspettative di sicurezza con quelle di un consolidamento rispettoso delle esigenze della conservazione.

Come anticipato, questo articolo (suddiviso in tre parti per una più agevole lettura) ripropone e riassume alcuni dei contributi che sono stati forniti negli ultimi anni dal gruppo di ricerca dell'Università di Perugia, inseriti proprio nel filone di un consolidamento "consapevole" delle esigenze della conservazione.

Nella prima parte (Borri e Sisti, 2021a) sono state riassunte le ricerche svolte sulla tecnica del "Reticolatus", che consente di *migliorare il comportamento meccanico di murature faccia a vista conservandone l'estetica del paramento esterno e sul rinforzo di pilastri murari faccia a vista mediante rinforzi inseriti nei giunti di malta*.

Nella seconda parte (Borri e Sisti, 2021b) sono state ricordate altre due tecniche: quella delle travi cordolo sommitali in muratura di pietrame, indirizzate anche al riuso del materiale esistente e alla conservazione e quella delle volte laterizie in folio rinforzate e trasformate in volte "tabicade" armate.

In questa terza parte sono presentate alcune esperienze di rinforzo di elementi lignei inflessi mediante l'applicazione in zona compressa di elementi pultrusi in fibra di vetro.

## RINFORZO DI TRAVI LIGNEE INFLESSE MEDIANTE COMPOSITI PULTRUSI

Gli elementi pultrusi, utilizzati già da tempo per altre tipologie di costruzioni (idrauliche, elettriche, etc), sono caratterizzati da proprietà che possono risultare interessanti in numerose applicazioni civili. A questo scopo è stata condotta una ricerca per valutare l'utilizzo di elementi in composito come rinforzo di travi lignee inflesse. In particolare, gli elementi in composito, capaci di resistere in egual modo a compressione e a

<sup>1</sup> Alle varie ricerche, coordinate da Antonio Borri, hanno partecipato: Giulio Castori, Marco Corradi, Alessandro De Maria, Andrea Giannantoni, Chiara Quintaliani, Romina Sisti, Emanuela Speranzini e Riccardo Vetturini. Nei singoli lavori citati sono riportati, caso per caso, i relativi specifici riconoscimenti, sia alle persone che agli Enti e alle Aziende che hanno contribuito a questi studi.



trazione, vengono disposti in zona compressa, per incrementare le caratteristiche flessionali (di resistenza, ma anche e soprattutto di rigidezza) di travi lignee. Tali elementi non esonerano quindi l'elemento ligneo dal suo ruolo, ma ne incrementano le capacità attraverso la realizzazione di una struttura mista legno-composito.

I vantaggi dei pultrusi rispetto a soluzioni in acciaio non stanno solo nel minore peso (fatto comunque importante, specie se si opera ai piani alti in edifici storici che si trovano all'interno di centri storici) ma anche nella facile lavorabilità in cantiere: bastano semplici attrezzi (smerigliatrice angolare, trapano) per effettuare le lavorazioni che si rendono necessarie sul posto.

Nella campagna sperimentale condotta (Borri e Corradi 2004; Corradi e Borri 2007) sono state realizzate prove di flessione su tre e quattro punti su 13 travi in legno di castagno e di abete, rinforzate in zona compressa attraverso l'applicazione di pultrusi in GFRP. In particolare, sono state testate 7 travi di abete bianco (identificate nel seguito come A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7) e 6 di castagno (C1, C2, C3, C4, C5, C6). Tutte le travi testate (classificabili in 2<sup>a</sup> categoria) hanno sezione quadrata con lato di circa 180 mm, senza smussi, ed una lunghezza di 3050 mm (Tabella 1).

*Tabella 1. Caratteristiche geometriche e reologiche delle travi in legno utilizzate nella sperimentazione.*

| <b>identificativo<br/>trave lignea</b> | <b>Tipo legno</b> | <b>Categoria</b> | <b>Altezza<br/>[mm]</b> | <b>Base<br/>[mm]</b> | <b>Peso<br/>specifico<br/>[g/cm<sup>3</sup>]</b> | <b>Umidità<br/>[%]</b> |
|--|-------------------|------------------|-------------------------|----------------------|--|------------------------|
| A1                                     | Abete             | 2                | 179.0                   | 178.0                | 0.47   | 10.71                  |
| A2                                     | Abete             | 2                | 176.6                   | 175.8                | 0.38   | 10.86                  |
| A3                                     | Abete             | 2                | 178.0                   | 176.2                | 0.51   | 11.47                  |
| A4                                     | Abete             | 2                |                         |                      |  |                        |
| A5                                     | Abete             | 2                |                         |                      |  |                        |
| A6                                     | Abete             | 2                |                         |                      |  |                        |
| A7                                     | Abete             | 2                |                         |                      |  |                        |
| C1                                     | Castagno          | 2-3              | 176.6                   | 179.2                | 0.79   | 10.99                  |
| C2                                     | Castagno          | 2                | 173.2                   | 180.2                | 0.78   | 11.07                  |
| C3                                     | Castagno          | 2                | 175.0                   | 179.8                | 0.83   | 13.27                  |
| C4                                     | Castagno          |                  |                         |                      |  |                        |
| C5                                     | Castagno          |                  |                         |                      |  |                        |
| C6                                     | Castagno          |                  |                         |                      |  |                        |

Nove travi sono state rinforzate utilizzando profilati pultrusi in fibra di vetro (GFRP) della lunghezza di 2500 mm, di cui, 5 con sezione a doppio T (di seguito indicati come H1, H2, H3, H4, H5) e 4 ottenuti mediante l'accoppiamento, tramite incollaggio con resina epossidica, di 2 profilati a C (di seguito indicati come I1, I2, I3, I4). In (Figura 1) sono riportate le caratteristiche geometriche dei profili utilizzati nella sperimentazione, il cui peso specifico risulta rispettivamente pari a 1.81 g/cm<sup>3</sup> (serie H) e 1.77 g/cm<sup>3</sup> (serie I).

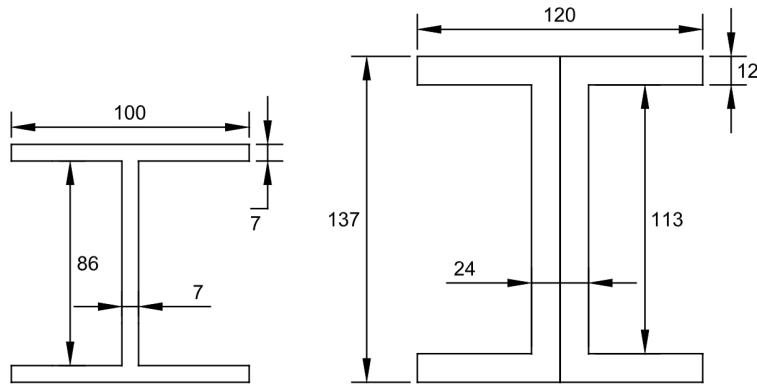


Figura 1. Dimensioni degli elementi pultrusi di tipo H (a sinistra) e tipo I (a destra).

La caratterizzazione meccanica delle travi lignee è stata effettuata mediante prove in campo elastico eseguite su tutte le 13 travi e mediante prove a rottura eseguite su 4 travi non rinforzate, assunte come riferimento (A1, A5, C1 e C4).

Per le prove in campo elastico si è fatto riferimento alla normativa UNI ISO 3349, eseguendo prove di flessione su 4 punti in cui la lunghezza libera di inflessione delle travi era di 3000 mm mentre i due carichi concentrati sono stati applicati in modo simmetrico rispetto alla mezzeria della trave, così da creare una zona centrale di 1000 mm di lunghezza caratterizzata da momento costante e taglio nullo (Figura 2).

In ciascuna prova sono stati effettuati 6 cicli di carico e scarico tra gli estremi di carico di 10 kN e 30 kN. La risposta delle travi ai carichi applicati è stata valutata misurando l'abbassamento in mezzeria mediante due trasduttori induttivi (LVDT) posizionati in prossimità dell'asse neutro ai lati opposti della trave, in modo da registrare eventuali rotazioni durante l'applicazione del carico.

Le prove hanno permesso di valutare il modulo elastico delle travi, risultato pari a 11426 MPa per le travi in abete bianco e 10251 MPa per le travi in castagno.

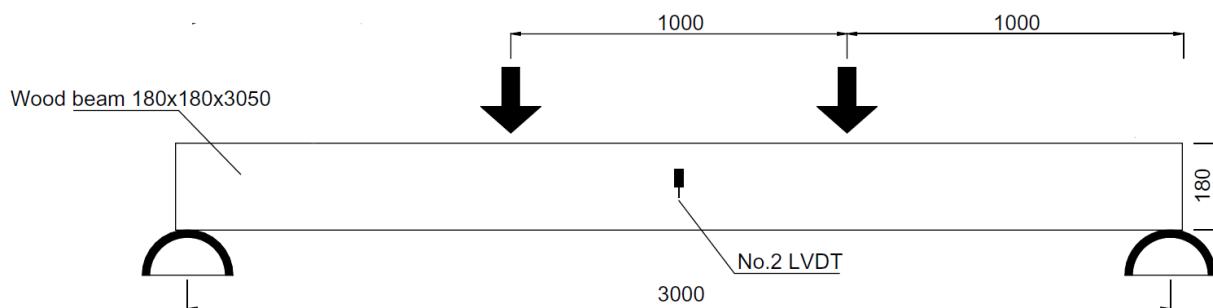


Figura 2. Schema della prova di flessione su quattro punti.

Nei test a rottura il setup di prova è analogo a quello delle prove in campo elastico; il carico però è stato applicato con una velocità costante di 0.2 kN/s fino al raggiungimento della rottura. È stato quindi possibile valutare la rigidezza considerando sia il valore del carico massimo  $P_{max}$  che il valore del carico pari a 1/3 del carico massimo, secondo le espressioni di seguito riportate:

$$k_u = \frac{P_{max} - P_i}{d_{max}}$$

$$k_{1/3} = \frac{P_{1/3} - P_i}{d_{1/3}}$$



dove  $P_i$  è il precarico pari a 3 kN,  $P_{max}$  è il carico massimo,  $P_{1/3}$  è pari a un terzo di  $P_{max}$ , mentre  $d_{max}$  e  $d_{1/3}$  sono i valori dell'abbassamento in mezzeria registrati al raggiungimento di  $P_{max}$  e  $P_{1/3}$ .

Le caratteristiche meccaniche dei profilati pultrusi sono state valutate in accordo alla EN 13706-2 (all. D e G) e alla ASTM D 695M. In particolare, sono state determinate le seguenti caratteristiche:

- Resistenza a compressione: sono state eseguite prove di compressione su 12 provini prismatici a sezione rettangolare costante aventi una altezza di 40 mm, una larghezza di 28 mm e uno spessore pari a quello dell'ala del profilato pultruso da cui il campione è stato estratto: 12 mm nel caso dei profilati di tipo I e 7 mm nel caso dei profilati di tipo H.
- Modulo elastico  $E_P$  e di taglio  $G_P$ : sono state eseguite prove di flessione su 3 punti con tre diversi valori della lunghezza di inflessione della trave (2.5 m, 2.0 m e 1.5 m). In accordo con quanto consentito dalle sopracitate norme, le prove sono state eseguite mediante 6 cicli di carico e scarico (ciascuno di 55 s) in controllo di spostamento verticale in mezzeria, rispettivamente tra 1 mm e 12 mm, 1 mm e 10 mm, 1 mm e 7.5 mm.
- Decremento della rigidezza flessionale  $k_P$  a seguito dell'esecuzione di intagli sui profili pultrusi: sono state eseguite prove di flessione su 4 punti con una lunghezza libera di inflessione della trave di 2.5 m, eseguendo 6 cicli di carico (ciascuno di 55 s) in controllo di spostamento verticale tra 1 mm e 12 mm. Le prove sono state realizzate sia sui profilati pultrusi in GFRP integri, che dopo aver realizzato degli intagli di 80x30 mm ogni 50 cm. Tali intagli simulano quelli che in una reale applicazione è necessario realizzare per accogliere i travetti lignei di un solaio e sono quindi stati realizzati su tutti i profili pultrusi prima della loro applicazione alle travi lignee (si veda Figura 3a e 3b).

In Tabella 2 sono riportati i risultati delle prove eseguite sulle due tipologie di pultrusi, che risultano avere simile modulo elastico  $E_P$  e modulo di taglio  $G_P$ , mentre la resistenza a compressione è maggiore per la tipologia H.

Come si può osservare dai risultati riportati in Tabella 3, l'esecuzione degli intagli ha determinato una riduzione della rigidezza degli elementi del 20.2% per la tipologia H e del 11.4% per la tipologia I.

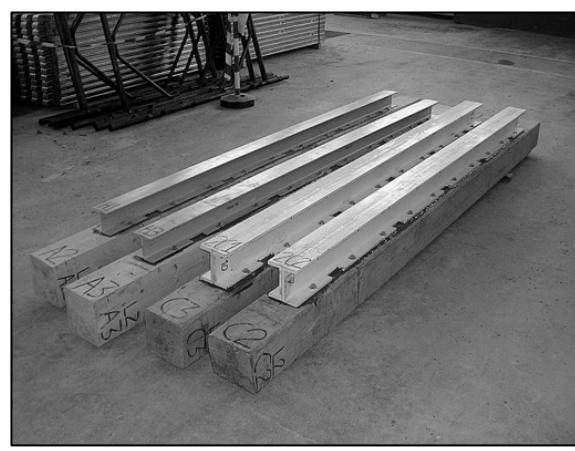


Figura 3. a) I profilati pultrusi con gli intagli praticati su una delle ali. b) Travi rinforzate con i profilati pultrusi intagliati per accogliere l'orditura secondaria di un solaio ligneo.



Tabella 2. Caratteristiche meccaniche dei profilati pultrusi.

| Tipologia | Resistenza a compressione [MPa] | Modulo elastico $E_p$ [MPa] | Modulo di taglio $G_p$ [MPa] | Peso specifico [g/cm³] |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|
| H         | 373.45 (dev. standard 27.89)    | 27031                       | 1640                         | 1.81                   |
| I         | 206.22 (dev. standard 12.94)    | 25407                       | 1340                         | 1.77                   |

Tabella 3. Rigidezza flessionale dei profilati pultrusi.

| Tipologia | Rigidezza flessionale $k_p$<br>(prima degli intagli)<br>[N/mm] | Rigidezza flessionale $k_p^*$<br>(dopo gli intagli)<br>[N/mm] | Decremento [%] |
|-----------|--|---|----------------|
| H         | 381  | 304   | 20.2           |
| I         | 1467   | 1300  | 11.4           |

L'applicazione dei pultrusi sulla parte superiore delle travi lignee è stata realizzata sia attraverso incollaggio con resina epossidica, sia con viti autofilettanti per legno, del diametro  $d=10$  mm e lunghezza  $L=80$  mm appartenenti alla classe 4.8. La realizzazione di tale collegamento si è articolata in varie fasi: 1) levigatura e pulizia accurata delle superfici da unire (legno e GFRP); 2) posizionamento e centratura del pultruso in GFRP sopra la trave lignea; 3) applicazione della resina epossidica per la realizzazione dell'incollaggio; 4) realizzazione del collegamento attraverso l'applicazione di viti autofilettanti con rondella.

Sulle travi A4 e C6 il collegamento fra trave e pultruso di rinforzo è stato realizzato tramite le sole viti autofilettanti, con l'obiettivo di valutare l'influenza dell'incollaggio con resina epossidica.

Dopo aver eseguito i rinforzi, le travi sono state sottoposte a nuove prove di flessione, così da determinare l'incremento di rigidezza e resistenza flessionale conseguibile con l'applicazione dei pultrusi in GFRP in zona compressa.

Analogamente alle prove di flessione realizzate sulle travi lignee non rinforzate, le prove in campo elastico sono state condotte utilizzando uno schema di carico su 4 punti, realizzando 6 cicli di carico e scarico tra 10 kN e 30 kN. Ogni pultruso, della lunghezza di 2500 mm, è stato applicato centralmente rispetto alla trave lignea della lunghezza di 3050 mm (Figura 4).

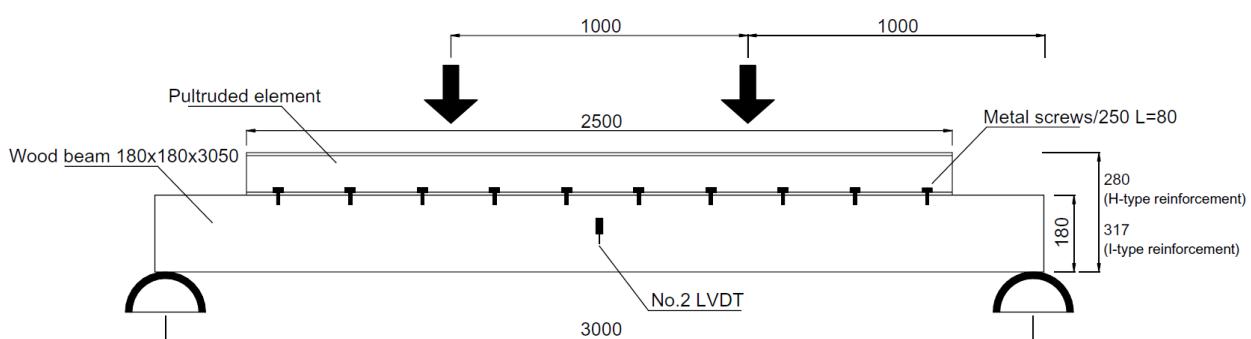


Figura 4. Schema della prova di flessione su quattro punti di una trave rinforzata.

Il confronto diretto tra la medesima trave lignea, prima e dopo il rinforzo, evidenzia in tutti i casi incrementi significativi della rigidezza flessionale (Tabella 4).

Si osservi come il maggiore incremento percentuale di rigidezza si è avuto per le travi rinforzate con pultrusi



di tipo I, cioè costituiti da 2 profili a C accoppiati (187% e 192%), con differenze trascurabili fra le travi in abete e quelle in castagno. Mentre il rinforzo di tipo H ha determinato un aumento medio di rigidezza dell'83% nelle travi in abete e del 58% nelle travi in castagno. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che la sezione del pultruso di tipo I ha un'area maggiore rispetto ai pultrusi di tipo H.

La (Figura 5) mostra il diagramma carico-abbassamento in mezzeria ottenuto dalle prove in campo elastico sulla trave prima (C3) e dopo il rinforzo con il pultruso (C3+I3).

Tabella 4. Risultati delle prove in campo elastico.

| Trave lignea non rinforzata |                           | Pultruso intagliato |                             | Trave lignea rinforzata |                           | Incremento  |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|
| campio ne                   | Rigidezza $k_E$<br>[N/mm] | campion e           | Rigidezza $k_P^*$<br>[N/mm] | campio ne               | Rigidezza $k_R$<br>[N/mm] | $k_R / k_E$ |
| A2                          | 1127                      | H1                  | 305                         | A2+H1                   | 2435                      | 2.16        |
| A3                          | 2439                      | H3                  | 291                         | A3+H3                   | 3935                      | 1.61        |
| A4                          | 2253                      | H2                  | 303                         | A4+H2                   | 3852                      | 1.71        |
| A6                          | 2356                      | I3                  | 1305                        | A6+I3                   | 6790                      | 2.88        |
| A7                          | 2442                      | I4                  | 1288                        | A7+I4                   | 6956                      | 2.85        |
| C2                          | 2153                      | I2                  | 1310                        | C2+I2                   | 6294                      | 2.92        |
| C3                          | 2252                      | I1                  | 1293                        | C3+I1                   | 6454                      | 2.87        |
| C5                          | 2345                      | H4                  | 311                         | C5+H4                   | 3701                      | 1.58        |
| C6                          | 2478                      | H5                  | 295                         | C6+H5                   | 3940                      | 1.59        |

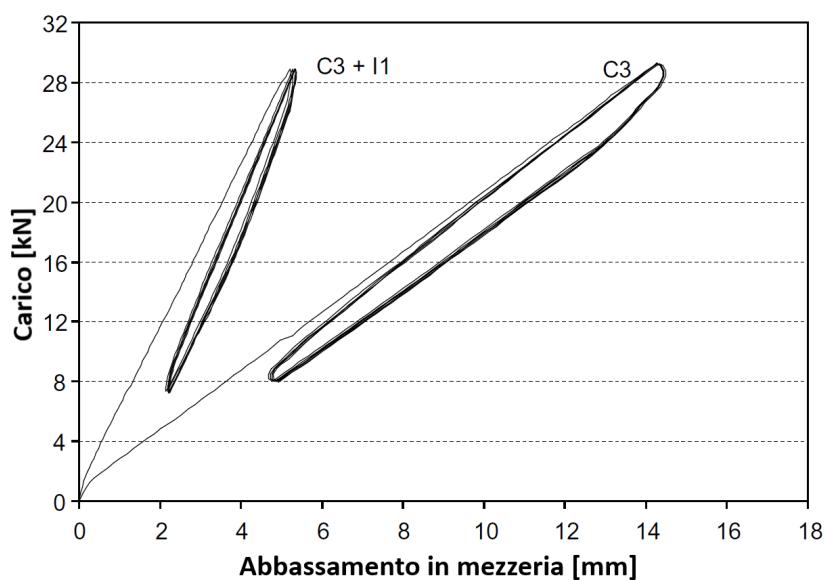


Figura 5. Prove in campo elastico: incremento di rigidezza per la trave lignea C3 a seguito dell'applicazione del rinforzo.



Dopo l'esecuzione delle prove in campo elastico, le travi rinforzate sono state portate a rottura in modo da valutare l'incremento di capacità e rigidezza rispetto ai risultati ottenuti per le travi lignee non rinforzate.

I risultati delle prove a rottura, riportati in Tabella 5, evidenziano che il maggior incremento di resistenza e rigidezza è stato osservato per le travi in castagno armate con elementi pultrusi di tipo I (incrementi medi di  $P_{max}$ ,  $k_{1/3}$  e  $k_u$  pari rispettivamente a 208%, 270% e 334%). Un'ottima efficacia del rinforzo con pultrusi di tipo I è stato osservato anche per le travi di abete (incrementi medi di  $P_{max}$ ,  $k_{1/3}$  e  $k_u$  pari rispettivamente a 142%, 242% e 275%).

Come possibile osservare dai grafici di Figura 6, tutte le quattro travi armate con elementi pultrusi di tipo I hanno mostrato un comportamento quasi completamente elastico lineare, come conseguenza dell'impossibilità del legno a plasticizzarsi in zona compressa per la presenza del pultruso, il cui comportamento è elastico lineare.

La trave lignea in abete A2 ha riportato un carico di rottura di 80.8 kN, molto inferiore rispetto a quello delle altre travi rinforzate. Le modeste proprietà meccaniche evidenziate dalla prova di flessione sono da ricondursi ai numerosi difetti presenti nella trave, emersi già dal rilievo geometrico (alto numero di nodi, fenditure e presenza di fibratura inclinata). Per questo motivo non è possibile effettuare un confronto con risultati ottenuti per le altre travi. Tuttavia, un confronto diretto tra il comportamento della trave A2 prima e dopo l'applicazione del rinforzo è mostrato in Fig. 7, dove è possibile notare il rilevante incremento di rigidezza a seguito dell'applicazione dell'elemento pultruso.

*Tabella 5. Risultati delle prove a rottura.*

| <b>campione</b> | <b><math>P_{max}</math><br/>[kN]</b> | <b>Incremento <math>P_{max}</math><br/>[%]</b> | <b><math>k_{1/3}</math><br/>[Nmm<sup>-1</sup>]</b> | <b>Incremento <math>k_{1/3}</math><br/>[%]</b> | <b><math>k_u</math><br/>[Nmm<sup>-1</sup>]</b> | <b>incremento <math>k_u</math><br/>[%]</b> |
|-----------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| A1              | 85.8                                 | -  | 1975   | -  | 1971   | -  |
| A5              | 78.0                                 | -  | 1988   | -  | 1547   | -  |
| A2+H1           | 80.8                                 | -2%  | 2393   | 21%  | 2307   | 31%  |
| A3+H3           | 173.2                                | 110%   | 3699   | 87%  | 3187   | 81%  |
| A4+H2           | 148.3                                | 80%  | 3944   | 99%  | 2284   | 30%  |
| A6+I3           | 193.0                                | 135%   | 6721   | 239%   | 6535   | 272%                                       |
| A7+I4           | 205.8                                | 150%   | 6827   | 245%   | 6647   | 278%                                       |
| C1              | 65.1                                 | -  | 1753   | -  | 1491   | -  |
| C4              | 67.2                                 | -  | 1829   | -  | 1470   | -  |
| C2+I2           | 183.5                                | 177%   | 5665   | 216%   | 5837   | 294%                                       |
| C3+I1           | 225.25                               | 241%   | 7591   | 324%   | 7011   | 374%                                       |
| C5+H4           | 137.2                                | 107%   | 3659   | 104%   | 3102   | 110%                                       |
| C6+H5           | 101.8                                | 54%  | 3190   | 78%  | 1816   | 23%  |

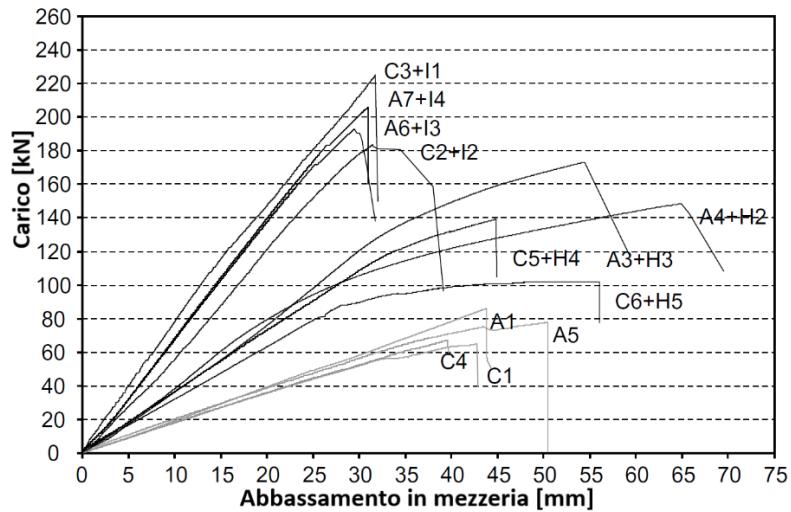


Figura 6. Prove a flessione su 4 punti fino al raggiungimento della crisi: confronto tra travi rinforzate e non rinforzate.

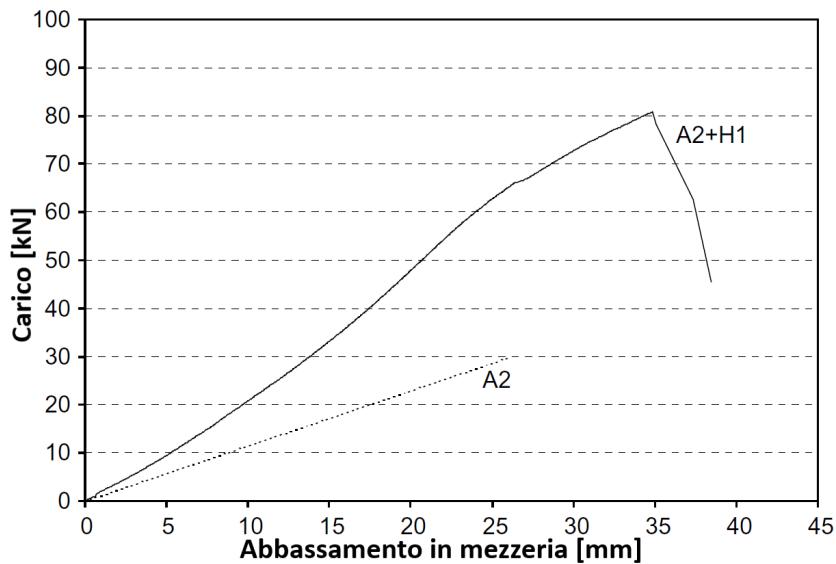


Figura 7. Comportamento flessionale della trave A2, prima e dopo il rinforzo con il pultruso.

Nelle travi A4 e C6 l'elemento pultruso di rinforzo di tipo H è stato solidarizzato alla trave tramite le sole viti senza applicare resina epossidica sulla superficie di contatto. Le prove di flessione hanno evidenziato che l'assenza della resina epossidica non ha compromesso l'efficacia del rinforzo. Le due travi A4+H2 e C6+H5 hanno infatti mostrato carichi massimi superiori (rispettivamente) dell'80% e del 78% rispetto ai valori medi del carico massimo delle travi non rinforzate. L'efficacia del rinforzo si può quindi ottenere anche mediante le sole viti metalliche.

Per tutte le travi si è verificata una rottura a trazione nell'area a momento costante in corrispondenza di un difetto della trave, come ad esempio la presenza di nodi (figura 8). La rottura ha provocato un improvviso calo della capacità della trave e la successiva rottura dell'elemento pultruso tra l'ala e l'anima.



Figura 8. Rottura della trave A3+H3.

## APPLICAZIONI PER IL RINFORZO DI SOLAI LIGNEI DI EDIFICI STORICI

La sperimentazione condotta ha mostrato che l'applicazione di elementi pultrusi in fibra di vetro negli interventi di rinforzo e di miglioramento sismico di costruzioni civili può costituire una valida alternativa alle tecniche tradizionali, in particolare per le costruzioni storiche, per le quali l'uso dei materiali compositi presenta caratteristiche positive in termini di reversibilità, efficacia, non-invasività e stabilità chimica. Un caso in cui questa applicazione presenta, oltre ai vantaggi prima elencati, anche quello di una maggiore semplicità esecutiva è rappresentato dal rinforzo di solai lignei per i quali non sia possibile la rimozione dell'orditura secondaria, o perché siano presenti decorazioni all'intadossso del solaio, o perché comunque lo smontaggio ed il successivo rimontaggio di tale orditura porterebbe modifiche non ammissibili dal punto di vista della conservazione.

Intervenendo come indicato in Figura 9, si può evitare tale smontaggio, semplicemente facendo degli intagli (operazione molto semplice grazie alle caratteristiche del materiale) sull'ala del pultruso in corrispondenza dei punti di appoggio dei travetti sulla trave lignea. In questo modo il pultruso (di altezza idonea a mantenere la quota del solaio esistente) può essere inserito sull'estradossso della trave lignea senza interferire con i travetti preesistenti.

Nelle figure 10, 11 e 12 sono riportate a titolo esemplificativo alcune immagini relative a casi di interventi che hanno fatto uso della tecnica prima descritta.

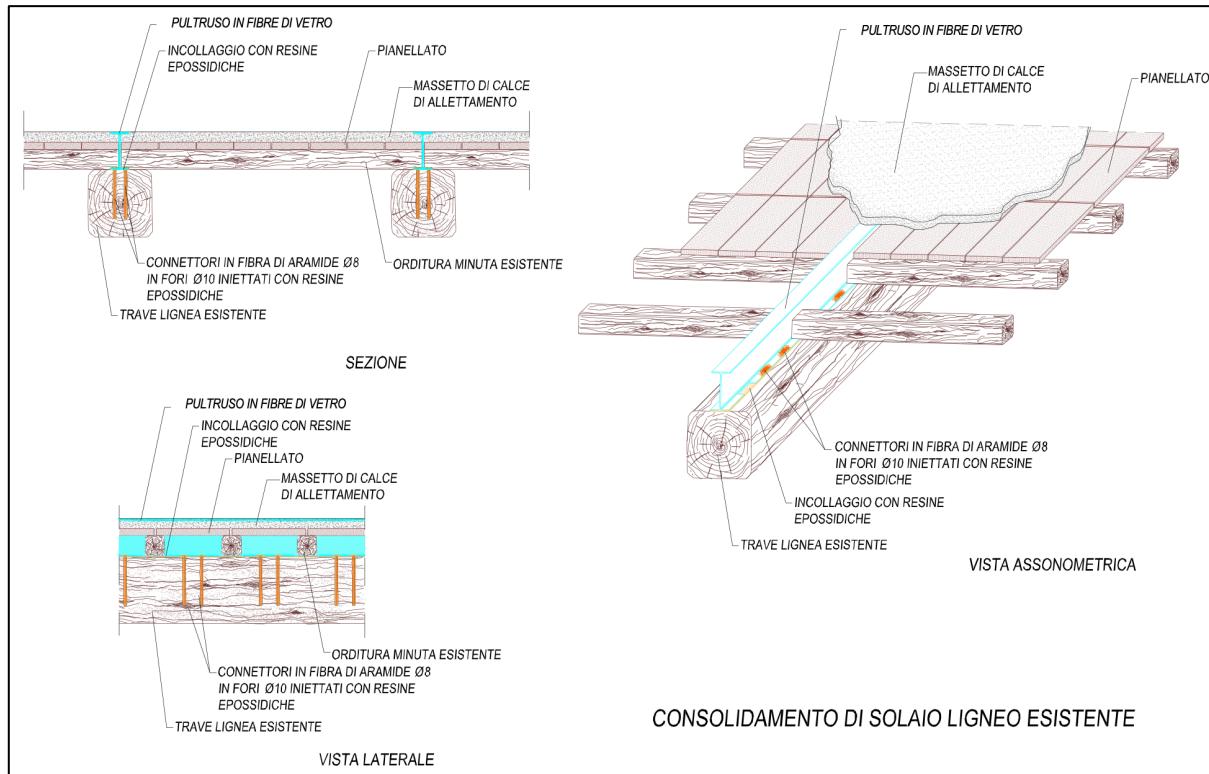


Figura 9. Rinforzo di un solaio ligneo mediante inserimento di un pultruso all'estradosso delle travi lignee, senza smontaggio dell'orditura secondaria.



a)



b)



c)



d)

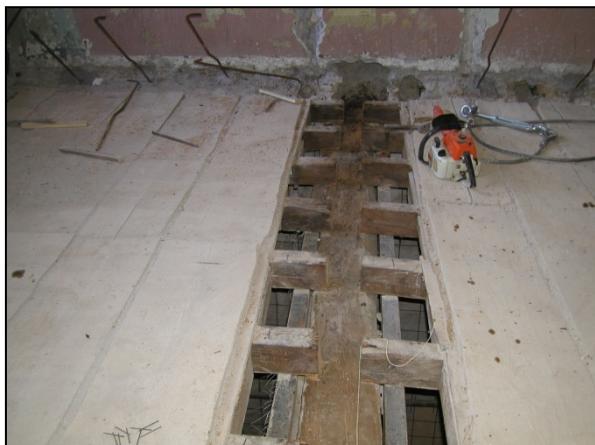
Figura 10. Intervento di rinforzo di un solaio ligneo (a) a Palazzo Collicola a Spoleto mediante inserimento di un pultruso all'estradosso delle travi lignee (Progetto e DL: Ing. Andrea Giannantoni). È stato il primo intervento con il quale si è sperimentata la tecnica descritta. Le immagini ne evidenziano i vantaggi principali: la leggerezza (b) e la facilità di lavorazione del materiale. Per ciascuna trave del solaio, è stato rimosso solo il tavolato sopra la trave, si è appoggiata la trave in pultruso sui travetti, sono state segnate le zone in cui l'ala del pultruso si appoggiava sui travetti per poi ritagliarle, in modo che il pultruso potesse essere inserito fino ad appoggiarsi sull'estradosso della trave lignea (c). I collegamenti poi sono stati effettuati sia per incollaggio con resina sia con spezzoni di barre in fibra di vetro (d).



a)



b)



c)



d)

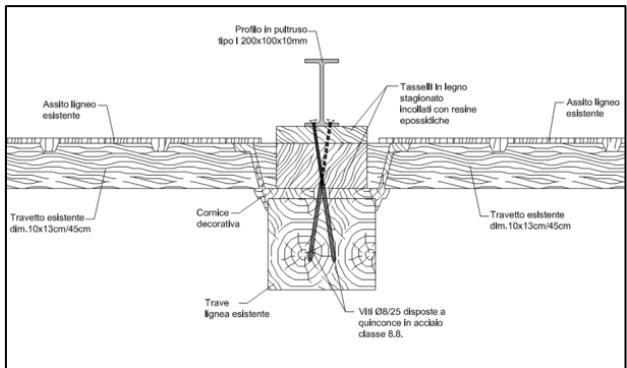
Figura 11. Intervento di rinforzo di un solaio ligneo in un edificio storico nel centro di Roma (Progetto e DL: Ing. Riccardo Vetturini). Anche in questo caso, la leggerezza del materiale e la sua lavorabilità hanno facilitato le operazioni di cantiere.



a)



b)



c)

Figura 12. Intervento di rinforzo dei solai lignei a Palazzo Mozzi-Bardini a Firenze (Progetto e DL: Arch. Fiorella Facchinetti; consulenza struttura: Ing. Andrea Giannantoni). In questo caso, date l'ampiezza delle luci, le travi lignee presentavano rilevanti inflessioni. Per collegare i pultrusi alla trave lignea sono stati usati dei tasselli di legno, opportunamente sagomati in senso longitudinale ed incollati sull'estradosso della trave lignea in modo da avere una superficie orizzontale di appoggio per il pultruso.

## CONCLUSIONI

Il filo comune che lega i contributi presentati in questo articolo e nei due precedenti (Borri e Sisti, 2021a) (Borri e Sisti, 2021b) è la ricerca e la sperimentazione di soluzioni che fossero poco invasive (e quindi proponibili per gli edifici storici) ma, allo stesso tempo, fossero capaci di fornire significativi miglioramenti alla risposta sismica degli elementi strutturali interessati.

L'auspicio è che la continua evoluzione, sia dei nuovi materiali, sia di tecnologie sempre più avanzate, possa riuscire a conciliare sempre di più tra di loro le esigenze della conservazione con quelle della sicurezza strutturale delle costruzioni storiche.



## BIBLIOGRAFIA

Borri A., Corradi M., 2004. *Rinforzo di travi lignee con elementi pultrusi in FRP*. Atti del Conv. Meccanica delle Strutture in Muratura Rinforzate con FRP-materials: Modellazione, Sperimentazione, Progetto, Controllo, 6-8 dicembre 2004, Venezia.

Borri A., Sisti R., 2021a. Miglioramento sismico degli edifici storici: problematiche, criteri progettuali e proposte innovative. Ingenio, 15 giugno 2021.

Borri A., Sisti R., 2021b. Criteri progettuali e tecniche innovative per il miglioramento sismico: cordoli in muratura e volte tabicade. Ingenio, 7 luglio 2021.

Corradi M., Borri A., 2007. *Fir and chestnut timber beams reinforced with GFRP pultruded elements*. Composites: Part B, 172–181.

## LEGGI ANCHE

<https://www.ingenio-web.it/31084-miglioramento-sismico-degli-edifici-storici-problematiche-criteri-progettuali-e-proposte-innovative>

<https://www.ingenio-web.it/31321-criteri-progettuali-e-tecniche-innovative-per-il-miglioramento-sismico-cordoli-in-muratura-e-volte-tabicade>

Fibre Net ringrazia il Prof. Ing. Antonio Borri e Ing. Romina Sisti per aver condiviso le proprie esperienze tecnico-progettuali rendendo disponibile il presente articolo.



## APPROFONDIMENTO PRODUZIONE PULTRUSI

La storia di FIBRE NET SpA inizia nel 2001 con una visione: sviluppare un prodotto del tutto nuovo non presente sul mercato, una rete in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Nasce così il best seller RI-STRUTTURA, la risposta evoluta alla classica rete elettrosaldata.

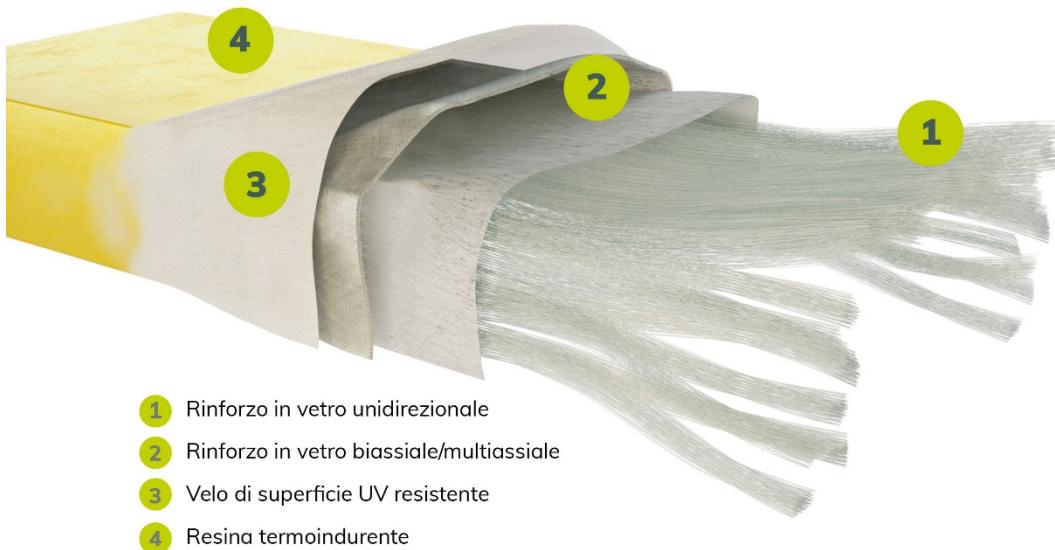
La sfida continua con l'ideazione e realizzazione della tecnologia per produrla, con la reale creazione di un mercato per il prodotto finito.

Oggi, a distanza di vent'anni, con lo stesso spirito innovatore sviluppa e produce in Italia prodotti e sistemi compositi fibrorinforzati dedicati al mondo dell'edilizia, dell'infrastruttura e dell'industria.

All'interno dell'ampia famiglia, FIBRE NET, **P-TREX** è la business unit che progetta e produce profili, grigliati, recinzioni e strutture con alto grado di complessità ed elevata durabilità.

FIBRE NET coniuga l'expertise nella lavorazione dei materiali compositi fibrorinforzati ad un radicato patrimonio di competenza ingegneristica dando vita al brand **P-TREX**, con cui identifica e sviluppa strutture e recinzioni composte da profili pultrusi e grigliati in PRFV: team, know how e linee di produzione dedicati garantiscono lo sviluppo di soluzioni certificate e personalizzate.

Le strutture e le recinzioni **P-TREX** si distinguono dai materiali tradizionali per assenza di corrosione, isolamento elettrico, elevata resistenza meccanica e leggerezza e rappresentano oggi la migliore soluzione tecnica ed economica per il settore industriale e infrastrutturale.



### Perché scegliere P-TREX?

Perché partiamo sempre dall'analisi del contesto, per sviluppare e offrire soluzioni efficaci e performanti. Ogni elemento viene prodotto con materie prime di alta qualità, testate durante ogni processo di realizzazione. Non tutti i profili sono uguali perché, a seconda delle esigenze, possono essere realizzati con fibre e resine differenti in grado di soddisfare le specifiche necessità.

Caratteristiche comuni delle linee di prodotto **P-TREX** sono resistenza alla corrosione, ai raggi UV, buone prestazioni meccaniche in rapporto al peso ridotto, isolamento elettrico e radio-trasparenza.

Inoltre, garantiscono una lunga vita utile e non necessitano di manutenzione.

[www.p-trex.it](http://www.p-trex.it)

