

ANALISI DI UNA TRAVE LIGNEA INFLESSA RINFORZATA MEDIANTE TESSUTI IN FRP

Claudio Carino, Letizia M.A. Rinallo

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia - Via Ferrata, 3 – 27100 PAVIA

1. INTRODUZIONE

L'evoluzione nell'ambito delle costruzioni rappresenta il frutto di numerosi fattori concomitanti, fra i quali il materiale assume un ruolo preminente. Oggi come ieri nuovi materiali sostituiscono ovvero si associano ai materiali preesistenti. Con specifico riferimento all'organismo strutturale, è possibile individuare due categorie di materiali: i materiali tradizionali ed i materiali innovativi. Per materiale tradizionale si intende un materiale il cui uso è ormai consolidato: di esso si ha, quindi, una conoscenza sufficientemente approfondita ed una lunga e vasta esperienza applicativa. Possono essere annoverati fra i materiali tradizionali ad uso strutturale la muratura, il legno, il calcestruzzo semplice ed armato, il calcestruzzo armato precompresso, l'acciaio. Per materiali innovativi si intendono invece non tanto quelli realizzati in tempi più recenti, quanto i materiali cosiddetti progettabili, i cui livelli di prestazione possono essere fortemente elevati per soddisfare esigenze specifiche. Pertanto, l'uso di materiali innovativi implica anche un diverso approccio progettuale: il materiale è progettato in modo da renderlo idoneo a garantire la prestazione richiesta e non già controllato a posteriori, in funzione delle esigenze progettuali. I materiali strutturali innovativi, trattati in questo lavoro, sono materiali già attualmente impiegati nel settore delle costruzioni e per i quali i continui risultati della ricerca e le diverse esperienze applicative lasciano intravedere una possibilità di impiego in settori sempre più vasti. In particolare, si fa riferimento ai materiali compositi fibrorinforzati a matrice plastica (FRP). Tali materiali, già utilizzati con successo in altri settori dell'ingegneria, destano interesse nell'ambito dell'ingegneria civile: nell'ultimo ventennio sono state infatti messe in luce le potenzialità degli FRP, principalmente per l'utilizzo come rinforzo, sia nell'ambito delle nuove costruzioni, sia per il recupero e/o l'adeguamento di strutture esistenti.

Il legno è stato storicamente il materiale da costruzione per eccellenza; il suo impiego è rimasto predominante fino alla metà del XIX secolo: risponde bene alla sfida del tempo, se ben mantenuto e correttamente lavorato ed utilizzato, come dimostrano le tante strutture rimaste a testimonianza dei secoli passati. In questo lavoro si vuole porre l'attenzione sull'impiego di tessuti in materiale fibrorinforzato nel consolidamento di strutture lignee esistenti, attraverso tre parti principali: nella prima di esse vengono delineate le caratteristiche salienti dei materiali compositi fibrorinforzati; nel successivo paragrafo ci si sofferma su una tipologia di tessuti in FRP e sui relativi parametri fisico-meccanici; l'ultima parte, oltre a descrivere l'applicazione del rinforzo, racchiude l'analisi ad elementi finiti di un componente strutturale ligneo e dello stesso componente rinforzato con tessuto monoassiale in fibra di carbonio. Viene mostrato in particolare il significativo beneficio in termini di sforzi e deformazioni, ottenuto con l'applicazione del rinforzo.

2. MATERIALI COMPOSITI FRP

Negli ultimi decenni diversi studi si sono concentrati sull'utilizzo di materiali alternativi a quelli tradizionali per il recupero e il rinforzo delle strutture esistenti. Ciò per la crescente esigenza di garantire livelli di sicurezza più elevati per quelle costruzioni che, sempre più numerose, manifestano segni di degrado e di inadeguatezza rispetto alle prestazioni attese. Molta attenzione è stata dedicata all'uso di fibre rinforzate con polimeri. Questo materiale, ad alta resistenza, leggerezza, resistenza alla corrosione e neutralità elettromagnetica, rende il rinforzo con fibre un candidato adatto alle molteplici applicazioni strutturali, tra cui il ripristino e il rinforzo di componenti lignei. Tuttavia, accanto ai vantaggi menzionati, è necessario evidenziare alcuni aspetti a valenza negativa: il costo ancora elevato, il legame costitutivo di tipo elasto-fragile, la scarsa resistenza a compressione.

Gli FRP appartengono alla vasta famiglia dei "compositi strutturali", ossia di quei materiali costituiti da due o più fasi di cui almeno una, il rinforzo presente in forma discontinua, è caratterizzata da elevate prestazioni meccaniche, mentre l'altra, la matrice, è identificabile come un elemento continuo e, di solito, meccanicamente più debole. Più in generale si può definire materiale composito un materiale solido polifasico

per il quale non esistono trattamenti che permettano la mutua trasformazione di una fase nell'altra e che presenta proprietà non esibibili né singolarmente da ciascuna delle fasi, né dalla semplice somma di queste. Un materiale composito è costituito da: i) la matrice, che, bloccando le fibre, trasferisce loro il carico esterno e le protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio; ii) il materiale di rinforzo che viene aggiunto sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particellari e iii) l'interfaccia tra il materiale di rinforzo e la matrice. Si possono distinguere materiali compositi particellari, fibrosi e laminati.

I compositi particellari sono costituiti da particelle di piccole dimensioni, annegate in una matrice di materiale differente. Per detti compositi la geometria del rinforzo è tale che nessuna dimensione prevale sulle altre; essi vengono normalmente utilizzati per migliorare alcune proprietà fisiche del materiale di base. Un esempio tipico di composito particellare è quello a matrice metallica, in cui le particelle hanno un effetto di irrigidimento impedendo il libero movimento delle dislocazioni. Le particelle vengono, in genere, utilizzate per modificare le proprietà della matrice, quali la conducibilità termica ed elettrica, il comportamento alle alte temperature, la resistenza all'usura, etc.

I compositi fibrosi sono costituiti da un rinforzo sotto forma discontinua (filamenti), con una dimensione nettamente prevalente sulle altre, e da una fase continua (matrice). In questo caso la presenza del rinforzo comporta un miglioramento delle proprietà meccaniche. Le proprietà di tali materiali dipendono da numerosi fattori: il tipo di fibre e di matrice, le loro percentuali in volume, la forma, la distribuzione e l'orientamento delle fibre, il comportamento all'interfaccia fibra-matrice.

I compositi laminati sono realizzati sovrapponendo due o più lamine di diverse caratteristiche. La tecnica della laminazione è utilizzata allo scopo di sfruttare al meglio le qualità di ciascuna lamina, ottenendo un prodotto finale di elevate prestazioni.

I materiali compositi a cui si fa riferimento nel presente lavoro appartengono alla categoria dei compositi fibrosi e sono costituiti da fibre di carbonio (meglio dettagliate nel successivo sottoparagrafo) e da una matrice polimerica. Essi sono ulteriormente classificati in relazione alla lunghezza ed alla distribuzione delle fibre. Si distinguono, pertanto, i compositi fibrosi a singolo strato o multistrato a seconda che le fibre abbiano o meno tutte lo stesso orientamento. Inoltre, i compositi fibrosi si definiscono continui quando la lunghezza delle fibre è nettamente elevata rispetto alle dimensioni della sezione trasversale, si definiscono discontinui quando le fibre pur presentando una lunghezza preponderante rispetto alle altre dimensioni, determinano proprietà del composito dipendenti dalla lunghezza delle fibre medesime.

2.1 Fibre

Le fibre hanno nel materiale composito la funzione portante e devono possedere buone proprietà meccaniche sia a lungo che a breve termine. Esse hanno in genere un legame costitutivo di tipo elastico-lineare. Le fibre più comunemente usate sono quelle in carbonio, vetro ed aramide.

Le fibre in vetro sono le meno costose, mentre le fibre in carbonio sono caratterizzate da elevati valori di resistenza e rigidezza. Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo le fibre sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono: a filamento, con elemento base con dimensioni di circa 10 mm di diametro; a cavo di filatura, che è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio di un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia); a filo o filato, cioè a filo formato da fibre attorcigliate a trefolo ed avvolte; a filo assemblato, con fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

I materiali FRP realizzati utilizzando fibra di carbonio, cui si fa riferimento nel presente lavoro, sono, come detto, caratterizzati da elevata resistenza meccanica e rigidezza (elevato modulo elastico).

Le principali proprietà meccaniche delle fibre di carbonio sono riassunte in Tabella 1.

Proprietà in direzione longitudinale	
Modulo elastico	290 ÷ 400 GPa
Resistenza a trazione	2400 ÷ 5700 MPa
Deformazione ultima	0,3% ÷ 1,8%

Tabella 1 – Proprietà meccaniche delle fibre di carbonio

2.2 Matrice

La matrice ha il compito di tenere unite le fibre, proteggerle da danneggiamenti accidentali e dalla corrosione e, in particolare, permette il trasferimento degli sforzi dalle fibre direttamente caricate (più esterne) a quelle non direttamente caricate (più interne), nel modo più uniforme possibile. Esistono tre grandi famiglie di matrici: ceramiche, metalliche e polimeriche. Quelle polimeriche (in particolare, le termoindurenti basate su resine epossidiche) sono di seguito trattate nel dettaglio, essendo utilizzate per la realizzazione dei materiali compositi oggetto del presente studio.

Le matrici polimeriche si suddividono in termoindurenti e termoplastiche. Con il nome di termoindurenti si indica una vasta schiera di materiali plastici che hanno in comune le proprietà di divenire infusibili ed insolubili dopo essere stati portati a fusione e successivamente raffreddati. In seguito alla polimerizzazione si genera, infatti, a livello molecolare, un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami covalenti che rendono il processo irreversibile. Tali matrici presentano bassa viscosità, buona stabilità termica, buona resistenza chimica e meccanica; inoltre, rispetto alle matrici termoplastiche, hanno minore attitudine allo scorrimento viscoso, una più bassa deformazione a rottura e una minore resistenza agli urti. Le matrici termoindurenti sono, senza dubbio, quelle più comunemente usate nelle applicazioni strutturali dei materiali compositi.

Una classificazione di tali resine può essere fatta in base al campo di temperature alle quali le matrici dovranno lavorare; in particolare, le matrici termoindurenti basate su resine epossidiche sono utilizzate per temperature minori di 250°C; queste sono le più importanti, dato che risultano avere proprietà meccaniche migliori di altri polimeri, ottima adesione alle fibre, buona resistenza chimica, basso ritiro e quindi bassi valori di sollecitazioni residue, il tutto associato ad una notevole stabilità termica.

3. TESSUTI

I tessuti costituiscono probabilmente la forma più diffusa e più varia di utilizzo dei materiali FRP nel settore del rinforzo strutturale. Vengono realizzati per mezzo di telai analoghi a quelli utilizzati nella realizzazione dei prodotti tessili più comuni e possono essere prodotti secondo una gamma pressoché infinita di configurazioni e caratteristiche, a seconda dei materiali utilizzati e della disposizione che assumono nel piano del tessuto i vari fasci di fibre che lo compongono. Dal punto di vista della configurazione geometrica si suole distinguere tra tessuti monoassiali, biassiali e multiassiali.

I tessuti monoassiali sono costituiti da fibre o fasci di fibre disposte tutte parallelamente tra loro e tenute assieme da una trama di filamenti. I tessuti biassiali, invece, vengono ottenuti intrecciando fasci di fibre secondo due direzioni ortogonali, mentre i tessuti multiassiali vengono ottenuti, mediante speciali tecniche di tessitura, disponendo le fibre secondo più direzioni tra di loro variamente inclinate.

Nei tessuti monoassiali, di cui ci si occupa nel presente lavoro, la trama non assolve alcuna funzione statica ma ha semplicemente il compito di evitare che ci siano perdite di fibre, scorrimenti o perdita di allineamento tra le stesse prima che il tessuto venga impregnato con la resina che costituirà la matrice. Qualunque modifica dell'andamento rettilineo delle fibre prima del "congelamento" nella loro posizione attraverso l'impregnamento e la successiva solidificazione della resina, infatti, comporterebbe una riduzione delle caratteristiche meccaniche del composito rispetto a quelle attese. Per realizzare la trama, vengono utilizzati filamenti in nylon, in poliestere o in altro materiale di basso costo e scarse prestazioni meccaniche. Normalmente la trama viene intessuta in direzione ortogonale alle fibre. In alcuni tipi di tessuto monoassiale presenti in commercio, però, per legare le fibre longitudinali viene utilizzata una doppia trama intessuta con angoli di $\pm 60^\circ$ rispetto alla direzione delle fibre. Questo tipo di collegamento garantisce una maggiore stabilità delle fibre evitando scorrimenti relativi fra le stesse durante le operazioni di taglio e le manipolazioni dei pezzi di tessuto che avvengono durante la posa in opera.

Nelle tecniche di rinforzo strutturale per incollaggio di FRP sulla superficie esterna degli elementi da rinforzare i tessuti monoassiali trovano impiego in tutti i casi in cui è noto a priori l'andamento delle isostatiche di trazione, ossia delle linee di involuppo delle tensioni principali di trazione. In questi casi i tessuti vengono posti in opera disponendo le fibre dell'ordito nella direzione del massimo sforzo di trazione.

Nei casi in cui non è nota a priori la direzione delle sollecitazioni massime di trazione oppure quando questa può variare lungo l'elemento da rinforzare o in funzione dei carichi esterni applicati, o, infine, quando nello stato tensionale della struttura da rinforzare esistono due direzioni principali di trazione, si potrà

comunque procedere al rinforzo utilizzando tessuti di tipo monoassiale, avendo però l'accortezza di disporre più strati di tessuto orientati secondo le diverse direzioni.

3.1 Parametri fisico-meccanici dei tessuti FRP

Normalmente la scheda tecnica di un tessuto da utilizzare nel rinforzo strutturale contiene i seguenti dati:

- Il tipo di fibra, cioè il materiale o i materiali costituenti le fibre con cui è prodotto il tessuto. Nel caso di tessuti ibridi (realizzati impiegando tipi diversi di fibre) viene normalmente indicato il tipo di fibre in funzione dell'angolo di inclinazione delle stesse rispetto alla direzione di svolgimento del rotolo, ad esempio: "0° carbonio ad alta resistenza", "90° Kevlar".
- La grammatura, cioè il peso, espresso in grammi, di un metro quadrato di tessuto; costituisce una indicazione del quantitativo complessivo di fibra presente nel tessuto. Normalmente si fa riferimento ad una grammatura nominale arrotondata per motivi pratici alla decina o al centinaio di grammi, diversa dalla grammatura effettiva che costituisce il peso effettivo per unità di area.
- La larghezza, ovvero semplicemente la dimensione del tessuto trasversalmente alla direzione di svolgimento del rotolo. I produttori di tessuti tendono a rendere disponibili varie larghezze commerciali di uno stesso tipo di tessuto. Per quanto attiene ai tessuti monoassiali, le larghezze commerciali più diffuse vanno dai 10 ai 40 cm. Per i tessuti multiassiali, in genere, si utilizzano larghezze maggiori per consentire un sufficiente sviluppo alle fibre poste in direzione inclinata rispetto alla lunghezza.
- La sezione resistente unitaria, cioè la sezione complessiva delle fibre di un tessuto aventi una determinata direzione, riferita all'unità di larghezza. È un parametro che viene calcolato dividendo il peso delle fibre espresso in grammi, per il peso specifico assoluto del materiale di cui il tessuto è costituito.
- Nelle schede tecniche di alcuni prodotti commerciali, in luogo o in aggiunta alla sezione resistente unitaria, viene riportato il cosiddetto "spessore fittizio del tessuto". Questo parametro è definito come il rapporto tra la sezione complessiva delle fibre e la larghezza del tessuto e rappresenta lo spessore che avrebbe una lastra ipotetica costituita del solo materiale che costituisce le fibre (senza resina) e di larghezza pari a quella nominale del tessuto.
- La resistenza meccanica a trazione, definita come l'ordinata dell'estremo superiore del segmento di retta che individua il comportamento del tessuto.
- L'allungamento a rottura, definito come l'ascissa dell'estremo superiore del segmento di retta che individua il comportamento del tessuto.
- Il modulo elastico a trazione, definito come la tangente dell'angolo compreso tra il suddetto segmento e l'asse delle deformazioni.

Per quanto riguarda gli ultimi tre parametri descritti, la loro determinazione viene effettuata attraverso una prova di trazione diretta che viene condotta secondo le direttive della norma americana ASTM D3039. Tale norma richiede che le prove di trazione sui tessuti non vengano eseguite direttamente sul rinforzo, in quanto sarebbe praticamente impossibile distribuire gli sforzi in maniera sufficientemente omogenea su tutte le fibre, ma su una provetta di composito appositamente realizzata impregnando il tessuto con resina epossidica. Per realizzare la provetta vengono utilizzati accorgimenti atti ad assicurare un perfetto allineamento tra le fibre e uno spessore costante del campione.

La norma ASTM D3039 prescrive che la tensione di rottura e il modulo elastico del tessuto vengano determinati dalla prova di trazione riferendosi alla sola sezione trasversale delle fibre, trascurando quindi l'apporto irrigidente esercitato dalla resina. Ciò è dovuto al fatto che nelle condizioni operative di cantiere è assolutamente impossibile determinare con sufficiente esattezza il quantitativo di resina impiegato per impregnare un tessuto. Trascurare la resina nei calcoli della tensione di rottura e del modulo elastico non comporta comunque grossi errori, date le prestazioni estremamente diverse dei due materiali.

4. APPLICAZIONI ALLE STRUTTURE LIGNEE

Il legno strutturale è annoverato nella normativa tecnica italiana fra i materiali da costruzione idonei ad assolvere funzioni portanti per un tempo indefinito: ha infatti una lunga storia applicativa testimoniata dall'elevata durabilità di strutture adeguatamente progettate e realizzate. Nella gran parte delle città italiane sono numerosi gli esempi di edifici secolari con coperture e solai in legno, ancora perfettamente efficienti a fronte della sola manutenzione ordinaria.

L'esigenza principale che negli ultimi anni ha spinto verso una sperimentazione sempre più intensa nel campo delle strutture composte legno-FRP è stata pertanto quella di conferire maggiore resistenza e rigidità agli elementi strutturali in legno, rispetto alle prestazioni che il materiale ligneo da solo è in grado di offrire. I materiali compositi fibrorinforzati presentano alcuni evidenti vantaggi, prestandosi ad applicazioni di semplice realizzazione e di estrema versatilità, sia per il recupero dell'esistente, sia per la progettazione di nuovi elementi. Il sodalizio del legno con i materiali polimerici fibrorinforzati si presenta particolarmente riuscito in termini di compatibilità e complementarietà nelle rispettive caratteristiche. Basti pensare ad una delle peculiarità più apprezzate del legno, la leggerezza, che non viene in modo assoluto intaccata da un intervento di rinforzo con FRP. L'impiego più diffuso è indubbiamente quello relativo al rinforzo di elementi lignei prevalentemente inflessi, come singole travi, solai o singoli elementi di sistemi strutturali più complessi, quali capriate e telai. Vale la pena sottolineare come, in ogni caso, l'estetica di un elemento rinforzato possa essere facilmente salvaguardata tramite una semplice mascheratura, ottenuta ad esempio mediante rivestimento di una lamina sottile dello stesso materiale ligneo costituente la struttura.

I vantaggi nell'utilizzo degli FRP nel consolidamento di elementi lignei possono dunque essere così schematicamente riassunti:

- aumento di resistenza ultima;
- aumento della rigidità;
- nessun aggravio di peso;
- nessun impatto estetico;
- facilità di modellazione dei materiali in fase di calcolo;
- assenza di fenomeni di ossidazione;
- maggiore durabilità della struttura;
- rapidità d'intervento.

Tra i vari studi svolti sull'argomento, possono esserne di seguito menzionati alcuni, tra quelli maggiormente citati in lavori successivi.

Nel lavoro [1] viene stabilita una tecnica per rinforzare gli elementi in legno che prevede l'incollaggio di tessuto in FRP sulle zone di trazione. Viene presentato un modello analitico che stabilisce una relazione tra le sollecitazioni e lo sforzo nel legno. Questo modello considera il legname con un comportamento elastico-lineare a trazione ed un comportamento elasto-plastico a compressione, considerando la fibra come un materiale elastico-lineare. Le travi in legno sono valutate sperimentalmente, rinforzate con tessuto unidirezionale in fibra di carbonio, fissato a sua volta con adesivo epossidico. Viene mostrato come la parte strutturale rinforzata abbia avuto un incremento di circa il 20-30% della capacità di carico.

In [2] viene presentata un'analisi teorica ottenuta dal confronto, in termini di sforzo, fra travi lignee rinforzate con FRP rispetto a quelle non rinforzate. Per la distribuzione dello sforzo nella sezione trasversale della trave rinforzata, in fase di collasso, si ritiene che ogni area agisca con la massima resistenza. La sezione sopra l'asse neutro si caratterizza per una massima resistenza a compressione, mentre sotto l'asse neutro vi è una distribuzione lineare della tensione.

In [3] sono valutate travi rinforzate con fibra aramidica applicata nella direzione longitudinale della venatura del legno. Come risultato della sperimentazione si è osservato un aumento del 21,5% della resistenza e del 4,69% della rigidità, rispetto ai risultati ottenuti con travi senza rinforzo.

Dagher [4] ha mostrato come i problemi principali del rinforzo dipendano generalmente da alcune incompatibilità esistenti tra il legno e il materiale in FRP. Le differenti rigidità del legno [5] e del materiale di rinforzo possono portare alla separazione della colla o al collasso torsionale nel legno a contatto con la colla.

Borri, Corradi e Speranzini, infine, hanno compiuto diversi studi ([6] [7] [8], tra gli altri) riguardanti sperimentazioni effettuate su travi lignee rinforzate con diversi tipi di fibra, giungendo a differenti risultati - di volta in volta confrontati con gli output di simulazioni numeriche - circa l'incremento della capacità portante.

5. RINFORZO ED ANALISI DI UNA TRAVE LIGNEA

Viene analizzata, come descritto di seguito, una trave preesistente realizzata in abete rosso e semplicemente appoggiata in estremità. Eseguita un'analisi dei carichi, la trave viene dapprima esaminata nella situazione attuale e, successivamente, viene introdotto un rinforzo costituito da più strati di tessuto in FRP, incollati al materiale ligneo tramite resina epossidica, al fine di ottenere una riduzione, come evidenziato da una nuova analisi, degli sforzi presenti all'interno del materiale ligneo, trasferendoli al contempo verso il materiale di rinforzo.

La trave risulta di lunghezza pari a m 4,00 ed ha sezione quadrata di lati 0,40 m. Per il materiale ligneo vengono assunte le seguenti proprietà:

– Resistenza a trazione parallela alla fibratura (MPa) :	17
– Resistenza a compressione parallela alla fibratura (MPa) :	23
– Modulo elastico medio parallelo alle fibre (GPa) :	11,71 [5]
– Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre (GPa) :	4,94 [5]
– Massa volumica media (Kg/m ³) :	415

Si suppone che la trave lignea sia sottoposta ad un carico uniformemente distribuito intenzionalmente elevato (dovuto ad esempio ad una modifica della destinazione d'uso della struttura) che, sommato al peso proprio, fornisce un valore in input di 80 kN/m, in corrispondenza del quale si ha una pressione equivalente sulla superficie all'estradosso pari a 0,2 MPa.

La trave lignea viene discretizzata in 1250 elementi solidi di tipo *Brick* a 8 nodi per l'analisi ad elementi finiti. Il numero elevato di elementi rappresenta una scelta voluta, in vista dell'opportunità di cogliere pur minime variazioni di sforzo all'interno delle varie zone dell'elemento. La discretizzazione della trave è riportata in Fig.1, insieme al riferimento globale assunto ed ai vincoli di carrello e cerniera schematizzati in estremità.

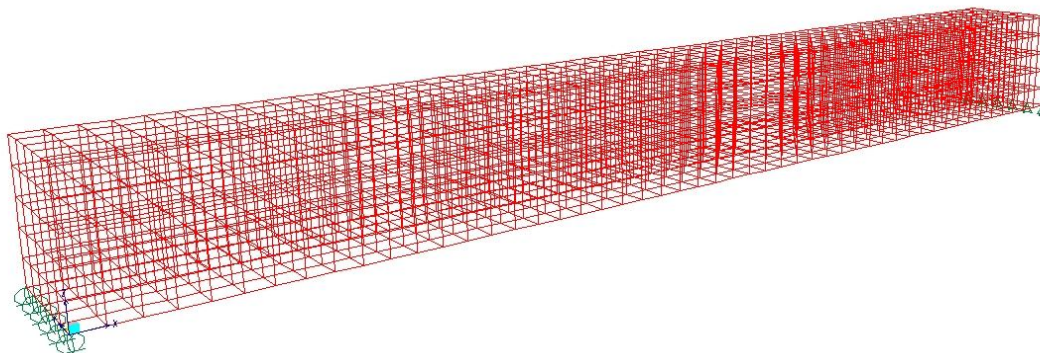


Fig. 1 – Il modello discreto ad elementi finiti solidi

Facendo riferimento a quanto riportato in [5] e, contemporaneamente, alla manualistica del software ad elementi finiti adottato, vengono introdotti, in fase di input per gli elementi solidi, 3 coefficienti di Poisson che tengono conto della ortotropia del materiale. Essi possono essere descritti, per il legname di conifera

utilizzato, dal vettore $\{0,041, 0,033, 0,35\}$. Viene inoltre fatto riferimento ad un ulteriore modulo elastico, in direzione radiale, pari a 0,83 GPa, secondo le indicazioni riportate nel testo [5] stesso, dando così luogo al vettore $\{11,71, 0,83, 4,94\}$ dei moduli di Young, con i rispettivi elementi del vettore rappresentati nell'ordine prescritto dal software agli elementi finiti, ai fini dell'assemblaggio della matrice di rigidità.

Definito con X l'asse del riferimento cartesiano globale come da Fig.1, viene rappresentata in Fig.2a, a seguito dell'elaborazione agli elementi finiti, la distribuzione degli sforzi normali in direzione X, nella configurazione deformata della trave. Analoga rappresentazione, con particolare evidenziazione dell'intradosso, è mostrata in Fig.2b. Entrambe le figure, in cui la scala cromatica è rappresentata in MPa, mostrano chiaramente valori non accettabili, in prospettiva di una verifica di sicurezza, per quanto riguarda gli sforzi di trazione all'intradosso.

Le Fig.3a e 3b, analoghe alle precedenti, si riferiscono invece alla distribuzione degli sforzi di Von Mises, che inglobano l'effetto tagliante, oltre a quello flettente. La Fig.3b, in particolare, mostra tensioni non accettabili, oltre che all'intradosso, anche in corrispondenza degli appoggi, mentre all'estradosso, in zona compressa, risulta evidente un maggior margine di ammissibilità.

Per quanto riguarda la verifica di funzionalità in esercizio, gli spostamenti massimi risultano dell'ordine di 11 mm, per i quali è auspicata una riduzione, data la luce limitata, con l'applicazione del tessuto.

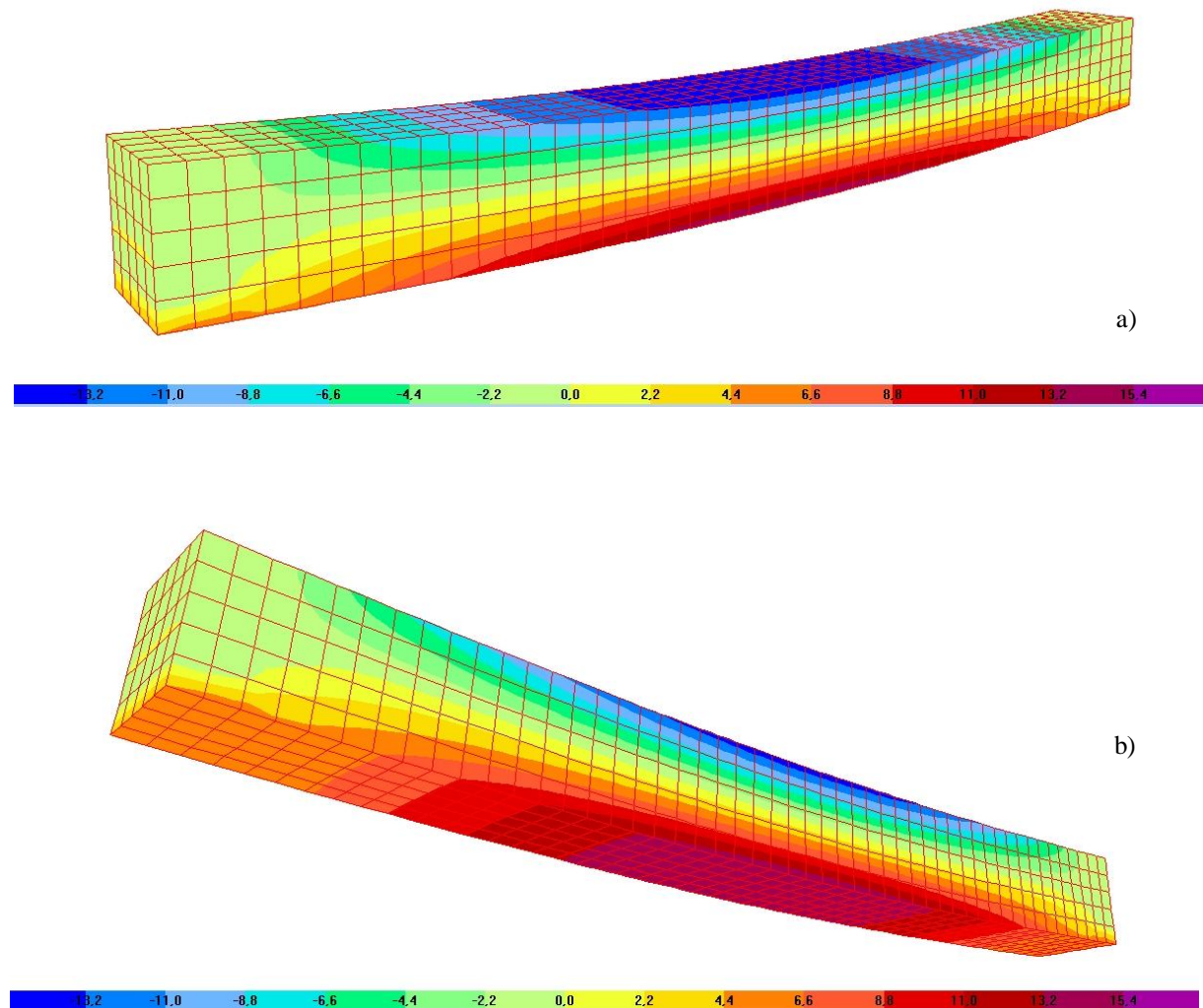


Fig. 2 – a) Trave lignea non rinforzata: andamento degli sforzi normali in direzione dell'asse;
b) Particolare all'intradosso

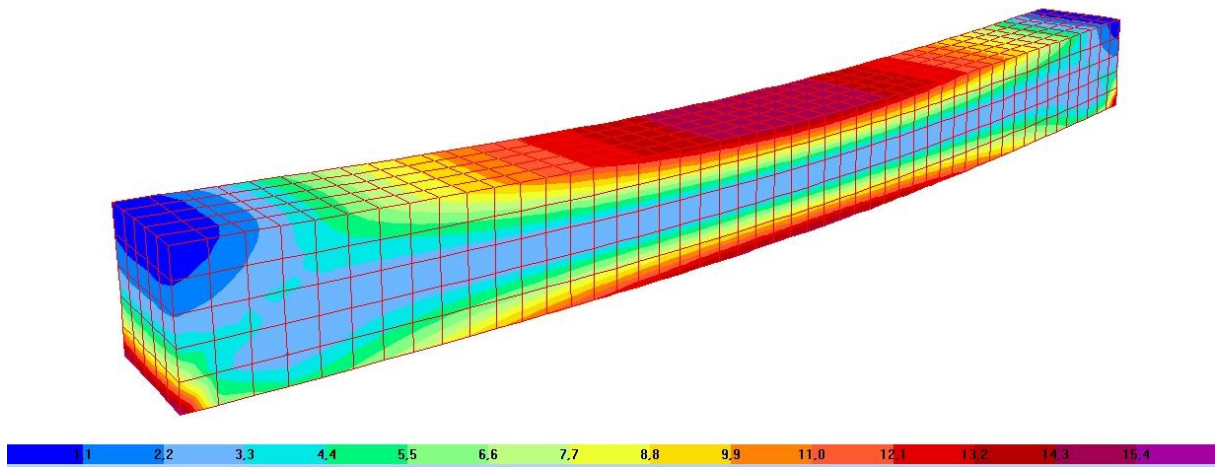


Fig. 3a – Trave lignea non rinforzata: andamento degli sforzi di Von Mises

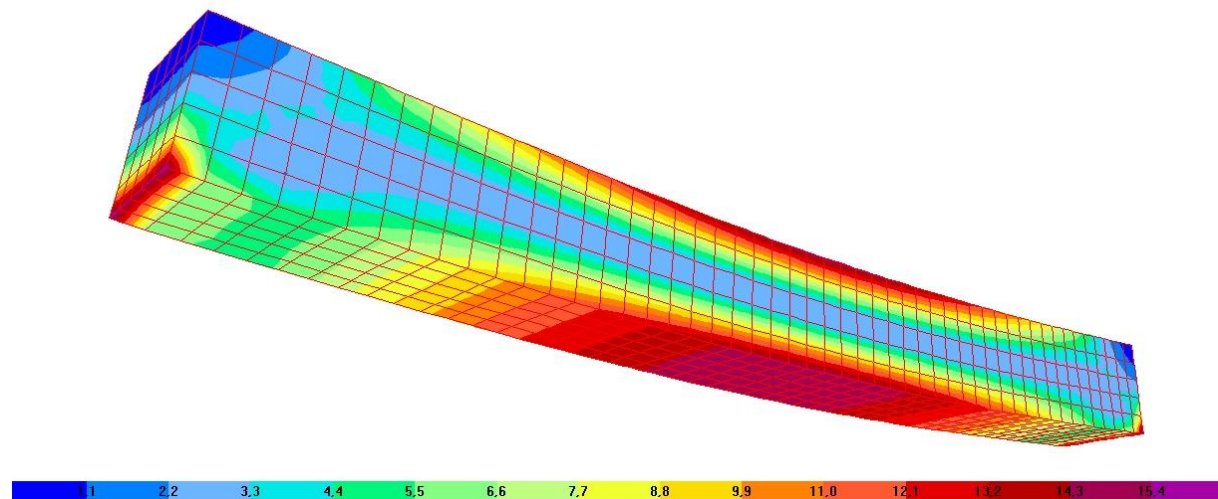


Fig. 3b – Trave lignea non rinforzata: andamento degli sforzi di Von Mises
(particolare all'intradosso e sugli appoggi)

La stessa trave viene successivamente analizzata in presenza del rinforzo, applicato con adesivo epossidico all'intradosso, ove le fibre sono tese. Il suo spessore complessivo viene ipotizzato pari a 1 mm, mentre vengono assunti i seguenti valori caratteristici del materiale:

- Modulo di Young 330 GPa
- Coefficiente di Poisson 0,2
- Resistenza a trazione 3500 MPa

All'interno della modellazione ad elementi finiti, il tessuto in FRP viene discretizzato in elementi di tipo *Shell*, con comportamento a membrana, escludendo quindi qualsiasi funzionamento di tipo flessionale. In particolare, i nodi che definiscono questi elementi vanno a sovrapporsi, per realizzare il contatto, ai nodi inferiori dell'ultimo strato di elementi solidi in cui è stata discretizzata la trave lignea.

L'analisi ad elementi finiti fornisce nelle Fig.4a e 4b un primo risultato in termini di sforzi normali in direzione X, all'interno della sola trave lignea: all'intradosso vi è una riduzione degli sforzi di circa il 30% rispetto al caso della trave non rinforzata, ed anche all'estradosso gli sforzi di compressione beneficiano del

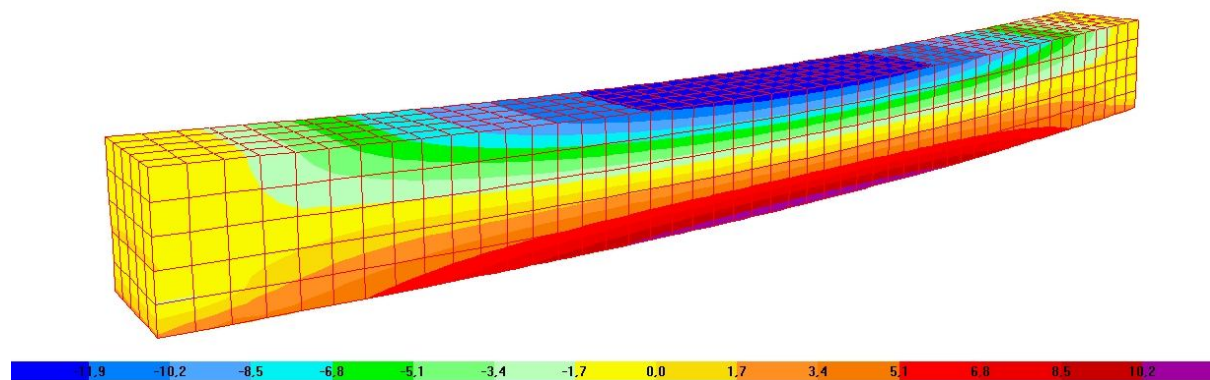


Fig. 4a – Trave lignea rinforzata: andamento degli sforzi normali in direzione dell'asse

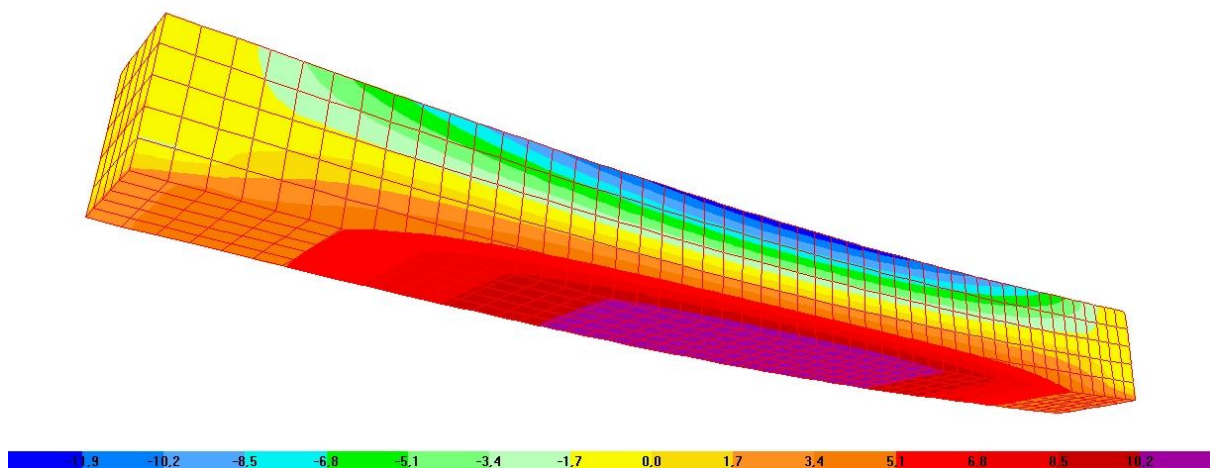


Fig. 4b – Trave lignea rinforzata: andamento degli sforzi normali in direzione dell'asse (particolare all'intradosso)

rinforzo, mostrando una riduzione, sebbene meno significativa, dei loro valori. Questi risultati confermano, grosso modo, quanto riportato in [1] e in [3] dal punto di vista sperimentale. Osservazioni analoghe possono essere fatte dall'esame della Fig.5, in cui sono rappresentati gli sforzi di Von Mises, con particolare riguardo all'intradosso. Tuttavia, da quest'ultima figura emerge come, in corrispondenza dell'appoggio sulla faccia laterale più esterna della trave, persista uno sforzo che, per quanto inferiore rispetto a quello corrispondente ottenuto nella trave non rinforzata, si trova al limite di una possibile verifica di sicurezza. Tale concentrazione di sforzo, comunque, risulta in parte falsata dalla necessità di adottare un modello per sua natura approssimato, che prevede di situare il vincolo all'estremità del primo elemento solido all'intradosso.

In Fig.6, infine, è rappresentato l'andamento degli sforzi di Von Mises all'interno dei soli elementi *Shell* che discretizzano il tessuto in FRP. Si può osservare come il rinforzo abbia assolto al suo compito precipuo di ridurre le tensioni nel materiale ligneo, pur raggiungendo valori di sforzo ancora molto lontani rispetto ai valori limite ammessi. Gli spostamenti massimi al contatto legno-tessuto, inoltre, risultano ridotti di circa il 20% rispetto ai valori riscontrati all'intradosso della trave non rinforzata.

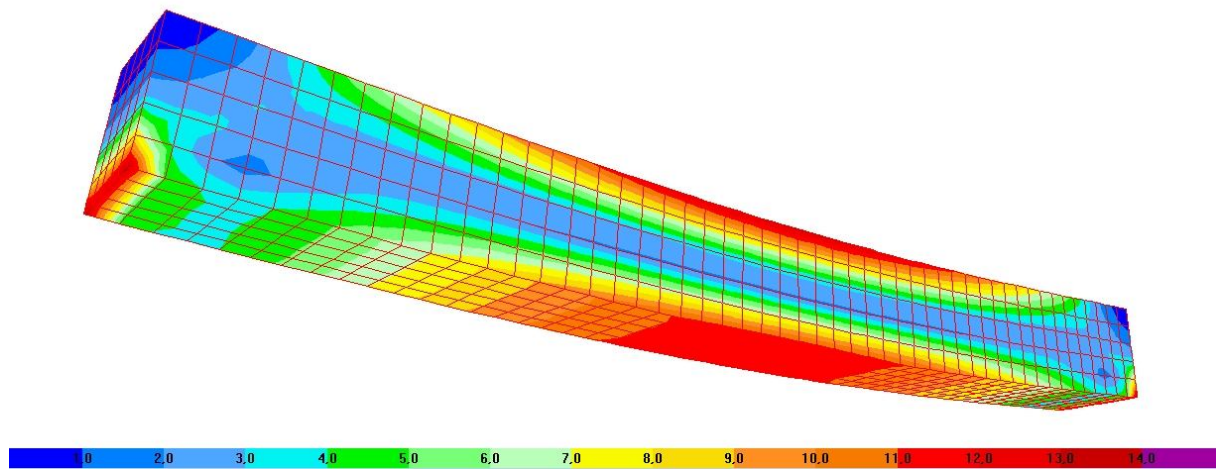


Fig. 5 – Trave lignea rinforzata: andamento degli sforzi di Von Mises (particolare all'intradosso e sugli appoggi)

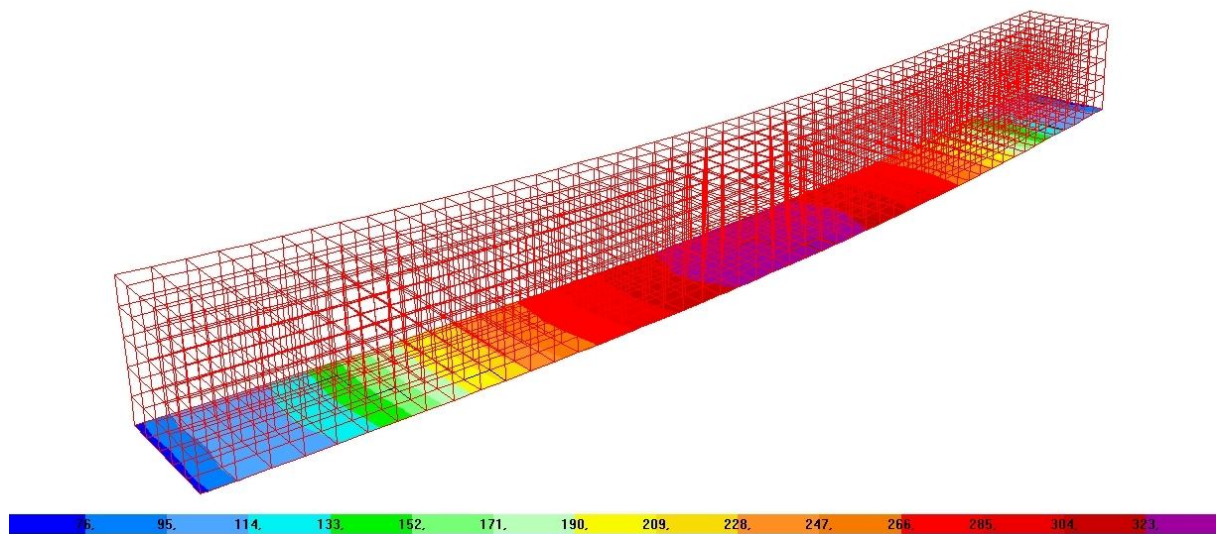


Fig. 6 - Andamento degli sforzi di Von Mises all'interno del solo tessuto di rinforzo in FRP

6. CONCLUSIONI

E' stata analizzata nel presente lavoro una trave lignea semplicemente appoggiata e caricata all'estradosso, in due possibili configurazioni: la prima, senza alcun rinforzo, che, con i carichi assegnati, non fornisce valori ammissibili in termini di verifica di sicurezza; la seconda, con l'applicazione di tessuto FRP all'intradosso, che dà luogo ad una sostanziale riduzione sia delle tensioni che degli spostamenti nella zona più sollecitata. In particolare, è possibile osservare una migrazione degli sforzi dalla zona lignea al tessuto, che è in grado di produrre valori più soddisfacenti nelle fibre inferiori del materiale ligneo, pur comportando uno sfruttamento solo parziale delle capacità di resistenza del materiale fibrorinforzato. A questo proposito, apparirebbe utile, in studi successivi, parametrizzare la dimensione del tessuto, sia in termini di spessore che in termini di larghezza (è possibile disporre, oltre che di rotoli di tessuto, anche di nastri di più ridotte dimensioni trasversali), in modo da minimizzare contemporaneamente gli sforzi all'interno dell'elemento strutturale ed il costo del materiale di rinforzo impiegato.

7. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato effettuato con il contributo finanziario del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Triantafillou, T.C., Deskovic, N., Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior, *J. Eng Mech*, ASCE, 117(7), pp.1652–72, 1991.
- [2] Belperio, R., Grad, I.E., The Performance of Glulam Beams Reinforced with Carbon Fibre, Pacific Timber Engineering Conference, New Zeland, Anais. v. 2, pp. 99-106, 1999.
- [3] Tingley, D., Kent, S., Structural Evaluation of fiber reinforced hollow wood beams, 2001 IABSE Conference, Lahti, International Association For Bridge And Structural Engenneering, 2001.
- [4] Dagher, H.J., High Performance Wood Composites for Construction, VII EBRAMEM, São Carlos, Brasil, 2000.
- [5] Piazza, M., Tomasi, R., Modena, R., Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee, Ed. Hoepli, 2005.
- [6] Borri, A., Corradi, M., Speranzini, E., Travi in legno rinforzate con barre o con tessuti in fibra di carbonio, *L'Edilizia*, Editrice De Lettera, 8–9, agosto-settembre, anno XV, Milano, pp. 48–56, 2001.
- [7] Borri, A., Corradi, M., Grazzini, A., A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites*, 2004.
- [8] Speranzini, E., Agnetti, S., Travi in legno rinforzate con fibre naturali, Proc. of XIV Conference “L'ingegneria sismica in Italia” (ANIDIS 2011), Bari, 2011.