

# STUDIO DEL RINFORZO DI SISTEMI STRUTTURALI PORTANTI PER COPERTURE LIGNEE ESISTENTI

Claudio Carino

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

## 1. INTRODUZIONE

Esiste in Italia un patrimonio storico, architettonico e culturale purtroppo destinato – se abbandonato – alla scomparsa, ma del quale è tuttora ancora possibile un recupero statico e funzionale, nel rispetto dei suoi valori identitari. In particolare, nella sola Lombardia, sono circa 30mila gli edifici rurali, generalmente identificati con la denominazione di *cascina*, abbandonati da anni. La maggior parte di essi è realizzata con classiche coperture lignee sorrette a loro volta da capriate lignee portanti: storicamente, infatti, il legno è stato sin dalle epoche più antiche il materiale da costruzione per eccellenza ed il suo impiego è rimasto predominante fino ai primi del Novecento.

Il legno da costruzione si mantiene nel tempo con le proprie caratteristiche meccaniche, purché sia correttamente manutenuto ed utilizzato, come dimostrano le tante strutture lignee tuttora esistenti. Tuttavia fenomeni di degrado dovuti in generale all'invecchiamento dei materiali e/o alla prolungata mancanza di manutenzione possono portare col tempo ad una alterazione delle proprietà del materiale, con conseguente riduzione dell'efficienza statica dei singoli elementi costituenti la struttura. Inoltre, le sempre più stringenti normative nell'ambito della sicurezza delle costruzioni tendono ad acuire ulteriormente queste problematiche.

La Regione Lombardia ha di recente approvato una legge regionale (L.R. n.18 del 26-11-2019) per semplificare la burocrazia riguardante i proprietari di queste strutture che volessero intervenire recuperandole e trasformandole in abitazioni, strutture agricole o ricettive. Grazie a questa norma, il recupero degli edifici rurali potrà essere riconosciuto come un'attività di pubblico interesse, per ragioni storiche, culturali e territoriali. Il progetto di riqualificazione potrà essere approvato anche in deroga al Piano di governo del territorio stabilito dal Comune. Si potrà agire attraverso procedure molto semplificate, in base ad un principio di *rigenerazione urbana*, anche con importanti riduzioni negli oneri di urbanizzazione dovuti, purché il recupero non coinvolga poli della media e grande distribuzione commerciale o edifici a destinazioni produttivo-industriali, in modo da salvaguardare l'aspetto storico inerente tali strutture.

Secondo la norma in questione, inquadrabile in una strategia regionale per la riduzione del consumo di suolo, recuperare l'esistente diventerebbe più vantaggioso che costruire ex novo, grazie allo snellimento burocratico (si pensi ad esempio ai cambi d'uso) ed a *bonus* volumetrici, per rendere più convenienti i progetti di riqualificazione. Il patrimonio immobiliare potrebbe pertanto altresì rappresentare una leva per lo sviluppo del territorio, se opportunamente valorizzato.

Questo lavoro intende focalizzarsi – dal punto di vista strutturale – sullo studio del recupero di coperture lignee esistenti, basate su classici schemi di capriata alla lombarda [1][2]. Viene effettuata una simulazione numerica dapprima sul sistema strutturale esistente e successivamente sullo stesso sistema rinforzato mediante tessuti in materiale fibrorinforzato (FRP) [3][4][5][6]. Viene presa in considerazione una struttura a capriata con ampia luce e disposta ad elevato interesse, con l'obiettivo di ridurre significativamente, mediante il rinforzo, lo stato di tensione presente all'interno dei singoli elementi.

## 2. LA COPERTURA PRESA IN ESAME

Gran parte delle coperture di edifici rurali situati in Lombardia sono sorrette da capriate lignee, vere e proprie travature reticolari in grado di azzerare quasi del tutto le spinte orizzontali degli elementi inclinati principali (puntoni), grazie alla presenza dell'elemento orizzontale (catena). Oltre a questi elementi principali, sono componenti tipici della capriata lignea il monaco, elemento verticale che collega tutti gli elementi, ad eccezione della catena, pur essendo in parte ad essa vincolato tramite un ferro ad U (staffa) e le saette o contraffissi, elementi con inclinazione opposta a quella dei puntoni, che trasferiscono sul monaco la forza di compressione a cui sono sottoposti.

Nel sistema così costituito le sollecitazioni di trazione sono assorbite principalmente dalla catena, il monaco risulta invece debolmente teso, mentre i puntoni sono sottoposti a pressoflessione per effetto dei carichi provenienti dall'intera copertura. Anche la catena, in realtà, risulta soggetta ad una debole componente flessionale, dovuta al non trascurabile peso proprio.

La capriata svolge la funzione di struttura portante per l'intera copertura: su di essa vengono appoggiate delle travi ad essa perpendicolari; in particolare, la trave di colmo è posizionata in sommità, mentre gli arcarecci appoggiano direttamente sui puntoni. Uno schema della classica copertura alla lombarda è riportato in Fig.1, in cui appoggiano sulla trave di colmo e sugli arcarecci i travicelli, ulteriori travi perpendicolari che scorrono obliquamente e parallelamente ai puntoni. Sui travicelli poggiano infine i cosiddetti correntini, che a loro volta sostengono un tavolato ed il manto di copertura vero e proprio, realizzato generalmente in coppi.



Fig. 1 – Schema della classica copertura lignea alla lombarda

Secondo lo schema di Fig.1, viene considerata in questo lavoro la capriata alla lombarda già presa in considerazione in [1][2], realizzata in abete rosso ed utilizzata per una classica copertura a falde di inizio secolo scorso. Si tratta di un sistema strutturale ad ampia luce (12 m), che si ripete ad elevato interesse, pari alla luce stessa, e molto ribassato (di altezza pari a 2 m), dando quindi luogo ad elevate sollecitazioni sia nei puntoni che nella catena.

Gli arcarecci, che poggiano sui puntoni delle capriate, ortogonalmente ad esse, sono in numero di 5. Le proprietà delle sezioni lignee dei vari elementi e del materiale [1][2][7] sono qui di seguito ripetute:

– Lato sezione quadrata della catena e dei puntoni (m)	0,4
– Lato sezione quadrata del monaco e delle saette (m)	0,3
– Lato sezione quadrata degli arcarecci e della trave di colmo (m)	0,3
– Lato sezione quadrata dei travicelli (m)	0,25
– Lato sezione quadrata dei correntini (m)	0,15
– 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
– Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre (GPa) :	4,94
– Densità media (Kg/m <sup>3</sup> ) :	450

L'analisi dei carichi viene condotta sulla struttura tenendo conto di tutti i pesi propri, sia di quelli strutturali che dei carichi relativi al manto di copertura, nonché del carico da neve, valutato secondo normativa in

relazione alla provincia di Pavia, per una struttura ipotizzata ad un'altitudine minore di 200 m. I carichi provenienti dalla copertura e fino agli arcaretti compresi vengono esplicitati in carichi concentrati agenti sui puntoni, che debbono essere sommati a tutti i pesi propri rimanenti.

La distanza dell'estremità inferiore del monaco dalla catena, in condizioni di struttura indeformata, è assunta pari a 0,20 m. Ai fini dell'analisi strutturale, eseguita con un software agli elementi finiti di comune impiego, i vincoli di appoggio della capriata alla muratura portante vengono assunti a cerniera da un lato ed a carrello dall'altro, consentendo così alla catena di deformarsi liberamente a trazione; il peso proprio del monaco viene rappresentato, a differenza di quelli relativi agli altri elementi portanti, caratterizzati da carichi distribuiti, mediante un unico carico concentrato applicato nel baricentro. I carichi puntuali provenienti dagli arcaretti sono di 62,8 KN, quelli derivanti dalla trave di colmo e dal monaco sono rispettivamente di 4,8 e 0,73 KN, mentre i carichi distribuiti dovuti ai pesi propri dei puntoni (uguali a quelli derivanti dalla catena) e delle saette sono rispettivamente di 0,72 e 0,40 KN/m. Ogni collegamento tra singoli elementi portanti è modellato tramite cerniera.

### 3. ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI DELLA STRUTTURA LINEA ESISTENTE

Viene condotta una prima analisi sull'esistente, che prevede una discretizzazione della catena e dei puntoni in elementi solidi di tipo *Brick* a 8 nodi: ciò predispone alla prospettiva di analizzare successivamente la presenza di eventuali rinforzi [5][6] applicabili sia alla catena che ai puntoni; infatti, soltanto con una discretizzazione che tenga conto dell'effettiva loro sezione, è possibile procedere con una modellazione geometrica ed una successiva analisi anche di un'eventuale porzione di rinforzo per uno solo od entrambi tali elementi principali della capriata. Per quanto riguarda invece il monaco e le saette, cioè gli elementi meno sollecitati del sistema strutturale, il loro insieme viene considerato come composto da soli elementi *Frame* a 2 nodi, cioè elementi semplicemente lineari e coincidenti con l'asse di ogni elemento.

Il numero elevato di elementi *Brick* anche per la *mesh* riguardante la catena rappresenta una scelta voluta, in vista dell'opportunità di cogliere pur minime variazioni di sforzo all'interno delle varie zone dell'elemento, anche in prospettiva del successivo rinforzo. La discretizzazione della struttura è riportata nelle Figure 2a e 2b rispettivamente nella configurazione indeformata ed in quella deformata derivante dall'analisi, insieme ai vincoli di cerniera e carrello schematizzati in estremità. Alcuni nodi presenti nella *mesh* di modellazione dei puntoni, selezionati in posizione opportuna, vengono utilizzati per rappresentare i punti di applicazione dei carichi concentrati trasmessi attraverso gli arcaretti.

La connessione tra gli elementi *Brick* costituenti i puntoni e gli elementi dello stesso tipo utilizzati per la catena è stata modellata introducendo degli elementi di tipo *Frame*, di lunghezza molto ridotta, disposti 'a piolo' e rispettivamente giacenti sulla superficie intermedia dei puntoni e sulla sezione terminale della catena (Fig.3a). Analogamente è stata modellata la connessione puntone/puntone, con elementi *Frame* giacenti sulla suddetta superficie (Fig.3b). Queste connessioni sono state studiate in modo da introdurre un vincolo a cerniera tra gli elementi principali, che trova riscontro nelle rotazioni consentite all'interno della maggior parte delle capriate lignee.

L'ortotropia del materiale è stata tenuta in considerazione, in fase di input per gli elementi finiti solidi, attraverso 3 coefficienti di Poisson, descritti, per il legno di abete rosso di cui è costituita la capriata esaminata, dal vettore {0,041, 0,033, 0,35} [7]. Oltre ai moduli elastici descritti precedentemente, ne viene inoltre introdotto un ulteriore, in direzione radiale, pari a 0,83 GPa [7], dando così luogo, ai fini dell'assemblaggio della matrice di rigidezza, al vettore {11,71, 0,83, 4,94} dei moduli di Young.

I risultati dell'analisi, per quanto riguarda la catena e i puntoni, vengono espressi direttamente in termini di *stress*. Per una migliore visione di essi all'interno della grafica, si è scelto di rappresentarli separatamente per tali elementi principali. In particolare, nelle Figure 4a e 4b è riportato l'andamento degli sforzi normali nella direzione dell'asse dell'elemento considerato, con un valore massimo di trazione in mezzeria della catena di 5,5 MPa e valori massimi di trazione e compressione nei puntoni di 5,4 e 13,5 MPa rispettivamente all'intradosso e all'estradosso.

Le Figg.5a e 5b descrivono invece la distribuzione degli sforzi di Von Mises, che tengono conto anche degli sforzi tangenziali dovuti agli effetti taglienti. Queste tensioni si mantengono nella catena con valori del tutto simili a quelli riscontrati per gli sforzi normali, mentre nei puntoni raggiungono un picco di 15,3 MPa al lembo superiore. La concentrazione degli sforzi leggibili in corrispondenza della connessione puntone/catena, che produce un apparente picco nei valori, è in realtà dovuta al modello, necessariamente approssimato, introdotto per simulare la presenza di cerniere di collegamento.

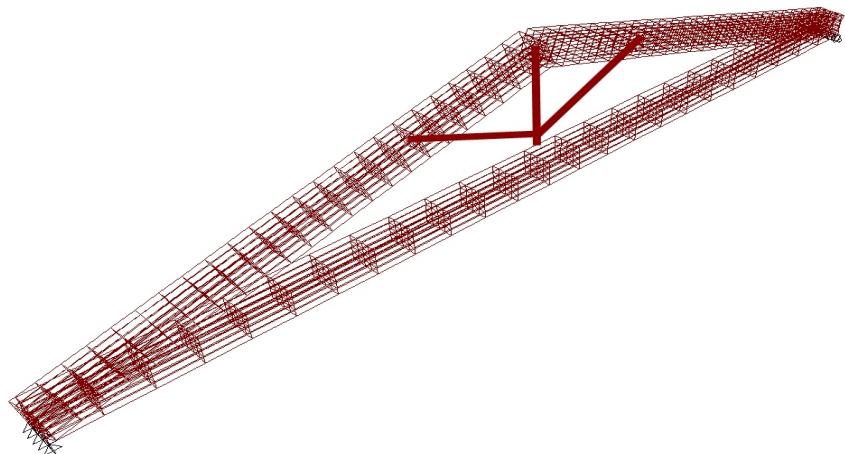


Fig. 2a – Configurazione indeformata e discretizzazione in elementi *Brick* e *Frame*

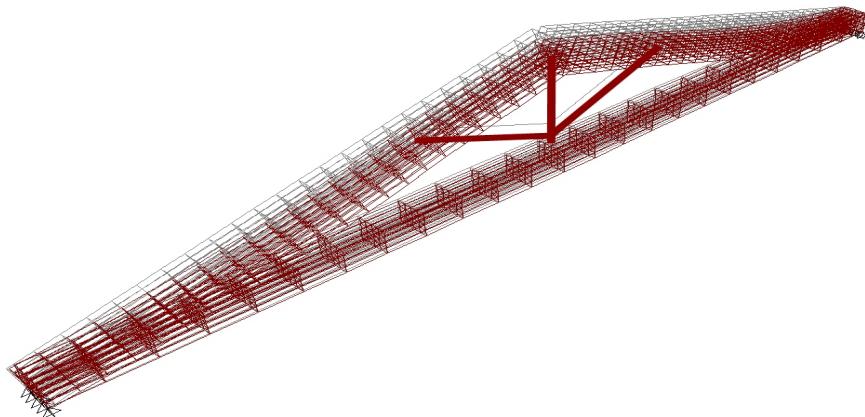


Fig. 2b – Configurazione deformata a seguito dell'analisi ad elementi finiti

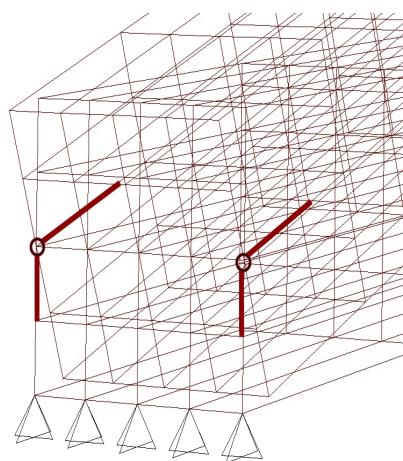


Fig.3a – Modellazione del collegamento  
puntone/catena

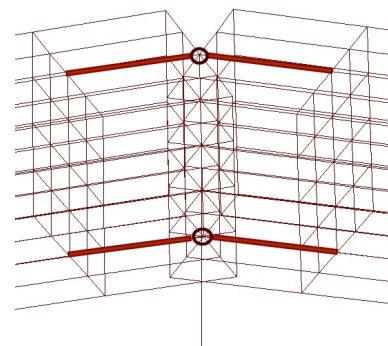


Fig.3b – Modellazione del collegamento  
puntone/puntone

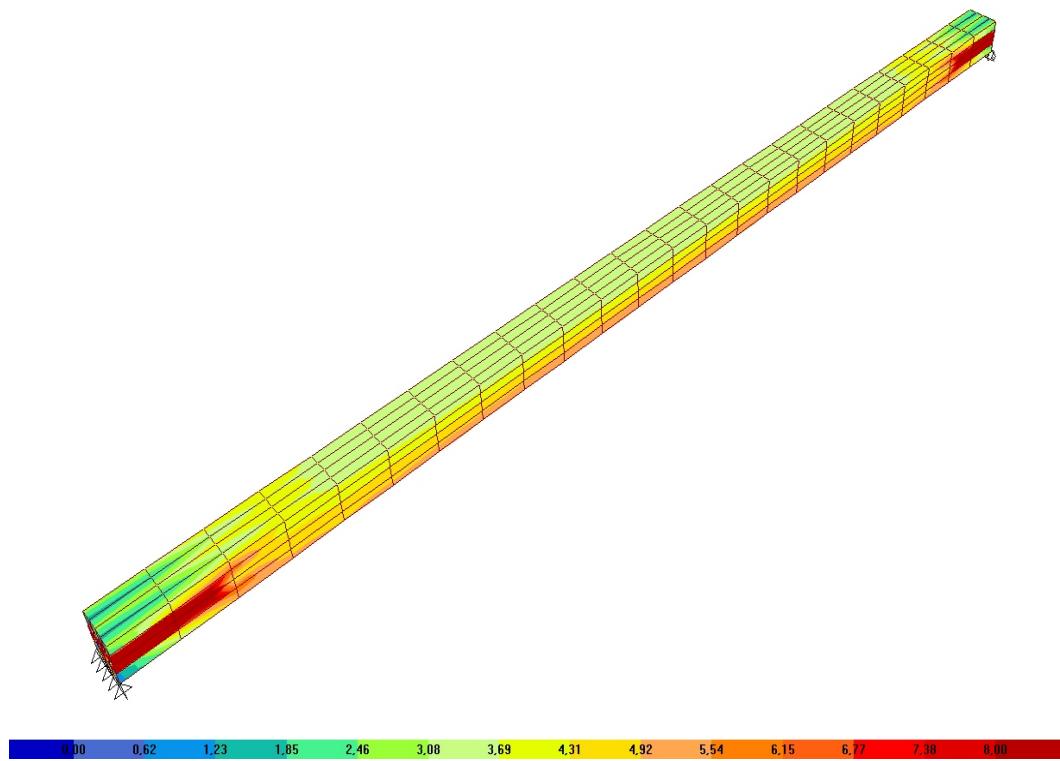


Fig. 4a – Tensioni normali negli elementi *Brick* della catena, agenti nella direzione del suo asse

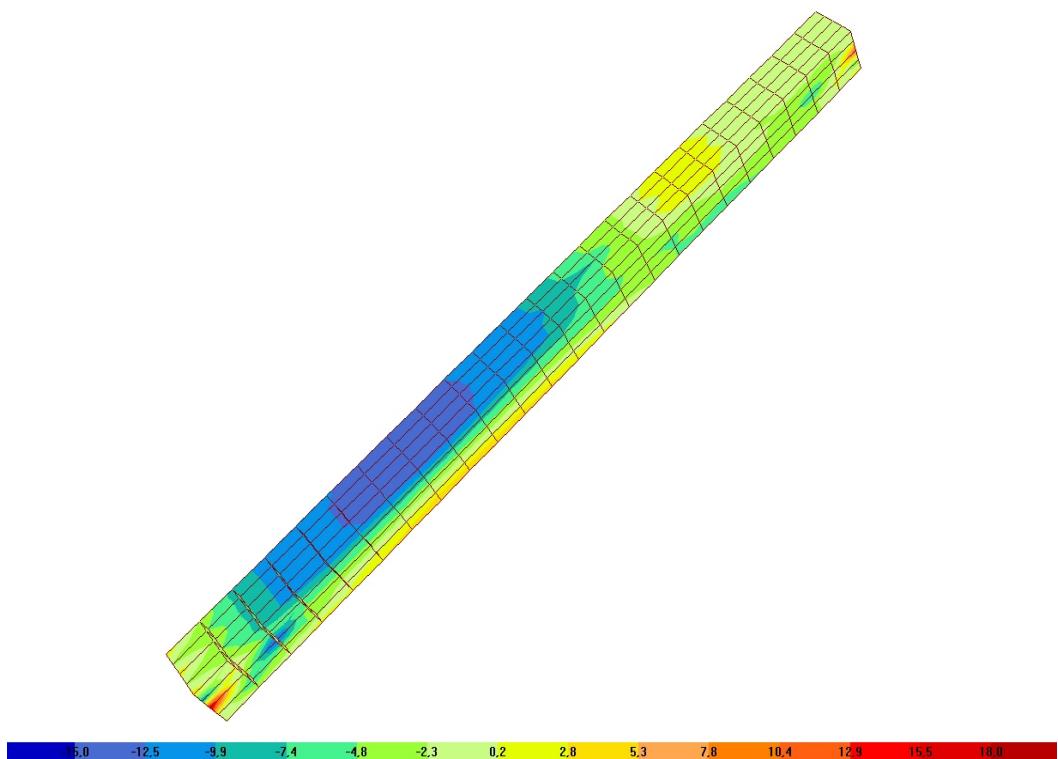


Fig. 4b – Tensioni normali negli elementi *Brick* del puntone, agenti nella direzione del suo asse

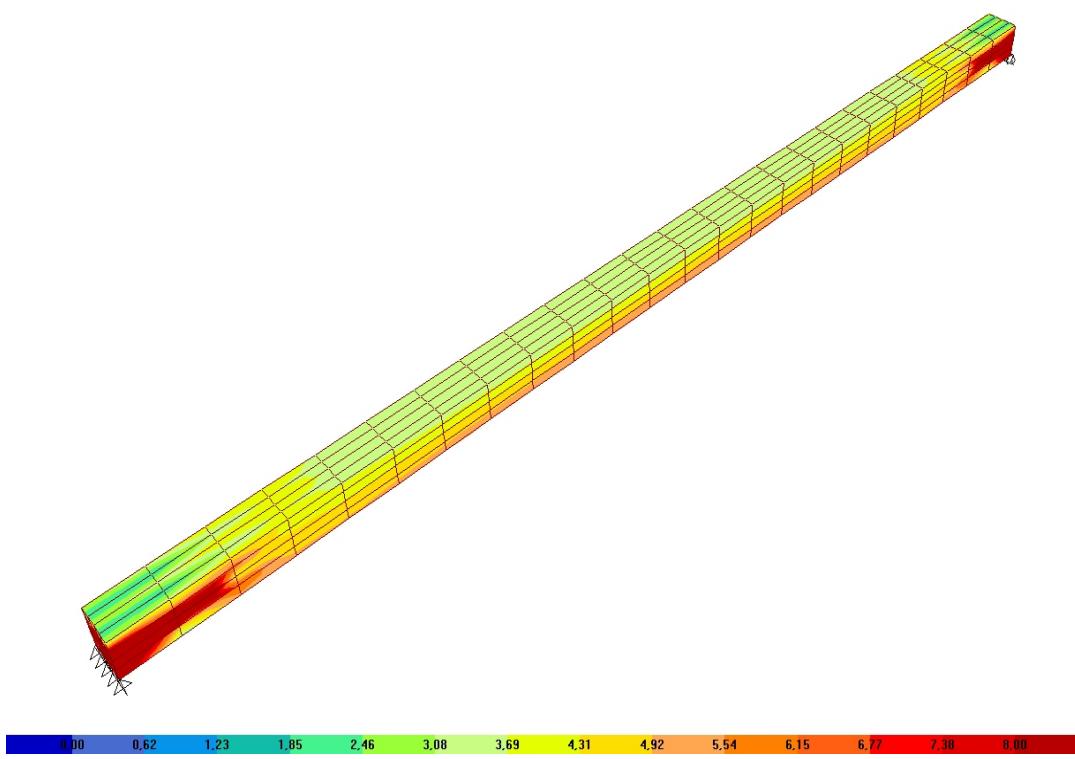


Fig. 5a – Tensioni di Von Mises negli elementi *Brick* della catena

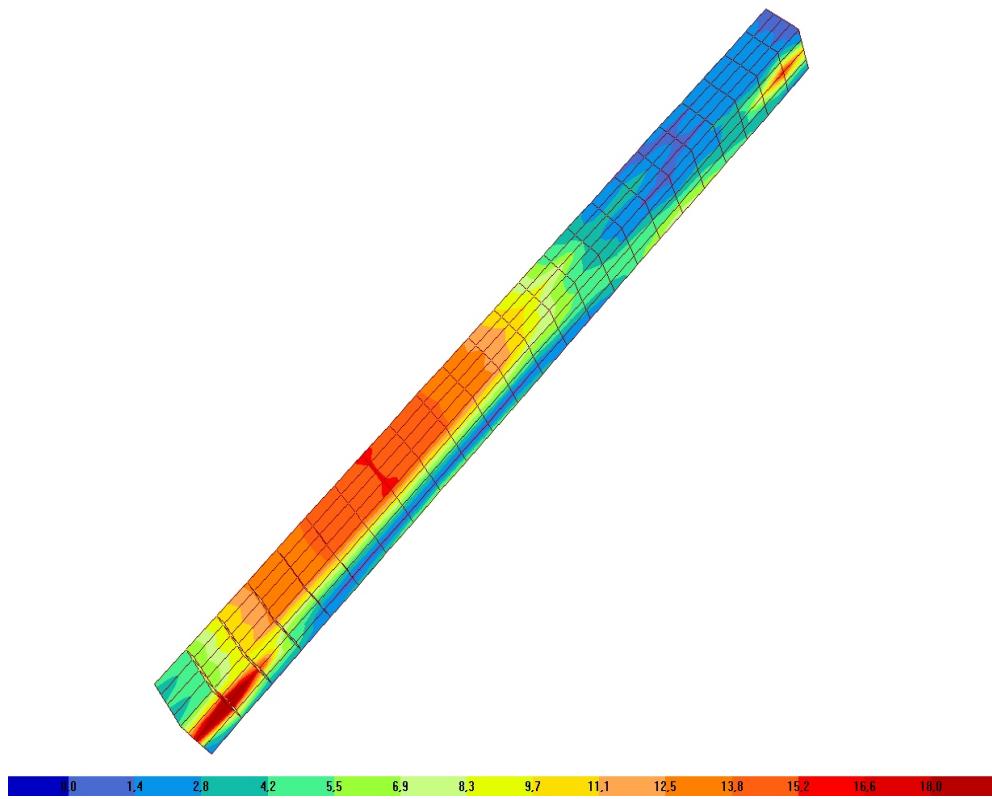


Fig. 5b – Tensioni di Von Mises negli elementi *Brick* del puntone

Le tensioni descritte mostrano valori a stento accettabili nel semplice raffronto con i valori di resistenza del materiale, opportunamente ridotti secondo un'applicazione schematica della normativa. Tuttavia, eventuali condizioni di degrado, dovute ad agenti biologici od ambientali – e da esaminare in maggior dettaglio tramite specifiche analisi strumentali [8] – potrebbero aver alterato le proprietà meccaniche del legno, riducendo drasticamente tali valori di resistenza e rendendo quindi necessaria l'applicazione di un rinforzo. Inoltre un'applicazione dettagliata della normativa recentemente aggiornata per le strutture lignee prevede sempre più severe restrizioni in termini di verifiche di sicurezza.

## 4. RINFORZO DELLA STRUTTURA ED ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

### 4.1 Tessuti in materiale fibrorinforzato (FRP)

Nel settore del rinforzo strutturale i tessuti costituiscono probabilmente la forma più diffusa e più varia di utilizzo dei materiali FRP. Vengono realizzati 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.

Nelle strutture composte legno-FRP l'obiettivo è quello di conferire maggiore resistenza e rigidezza agli elementi strutturali in legno, con particolare riguardo alle zone della struttura soggette a trazione, per le quali il materiale ligneo è in grado di offrire una resistenza limitata: l'impiego più diffuso risulta quindi quello relativo al rinforzo di elementi lignei prevalentemente inflessi [3][4][5][6]. Va inoltre osservato che il sodalizio del legno con i materiali polimerici fibrorinforzati si presenta particolarmente vantaggioso in termini di compatibilità e complementarietà, anche con riferimento ad altre 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. Vale la pena infine 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.

### 4.2 Modellazione ed analisi della struttura rinforzata

La struttura descritta al Par.3, ed esaminata nel paragrafo successivo con riferimento alla sua configurazione attuale, viene analizzata supponendo di introdurre un rinforzo costituito da tessuti in FRP, in corrispondenza dei lembi inferiori della catena e dei puntoni. I tessuti si suppongono incollati al materiale ligneo tramite resina epossidica, di caratteristiche meccaniche analoghe al materiale fibrorinforzato, ed il cui spessore viene quindi considerato inglobato in un insieme unico. Il fine ultimo è quello 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. Vengono assunti i seguenti valori caratteristici per il materiale FRP:

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

Il tessuto in FRP viene discretizzato, in fase di modellazione agli elementi finiti, in elementi di tipo *Shell* a 4 nodi, con un comportamento a membrana che esclude quindi qualsiasi funzionamento di tipo flessionale. In particolare, i nodi che definiscono questi elementi vanno a sovrapporsi, al fine di realizzare il contatto, ai nodi inferiori dell'ultimo strato di elementi solidi con cui sono stati discretizzati i puntoni e la catena.

Ai fini della simulazione numerica agli elementi finiti, viene parametrizzato lo spessore del tessuto da applicare all'intradosso della catena e dei puntoni, comprensivo dello spessore del collante epossidico utilizzato. Vengono considerate alcune combinazioni significative, rappresentabili dai seguenti vettori: {1,0},{2,0},{1,2},{1,3},{2,3}, ove la prima cifra indica lo spessore espresso in  $10^{-3}$  m del rinforzo applicato alla catena e la seconda cifra, se diversa da 0, indica lo spessore in  $10^{-3}$  m del rinforzo applicato ad entrambi i puntoni; la cifra nulla indica assenza di rinforzo nei puntoni.

Rispetto ai valori ottenuti per la struttura non rinforzata, le prime due combinazioni, esaminate in assenza di rinforzo nei puntoni, forniscono, in termini percentuali, riduzioni piuttosto limitate (tra l'1 e il 6%) delle tensioni di trazione, di compressione e di Von Mises ai lembi dei puntoni, mentre, interessando

direttamente la catena, forniscono al suo intradosso riduzioni maggiori del 20% per tali tensioni. Questo significa che il solo rinforzo applicato alla catena, per quanto questa sia elemento determinante per il funzionamento dell'intero sistema, non è in grado di ridurre significativamente gli sforzi anche all'interno dei puntoni, componenti anch'essi soggetti a rilevanti sollecitazioni per effetto dei carichi di copertura ad essi trasferiti.

Le combinazioni {1,2},{1,3},{2,3} portano invece a sostanziali riduzioni degli sforzi in entrambi gli elementi principali. In particolare, la seconda delle tre combinazioni è in grado di fornire riduzioni più che soddisfacenti per gli sforzi massimi di trazione nella catena (-21%), gli sforzi massimi di trazione nei puntoni (-66%) e gli sforzi massimi di compressione negli stessi puntoni (-16%). Al contempo, è in grado di contenere i costi che la terza delle tre combinazioni, pur portando ad una diminuzione del 73% degli sforzi di trazione nei puntoni, comporterebbe. Inoltre la combinazione {1,3} è in grado di ridurre gli spostamenti massimi verticali nei puntoni di circa il 10%, mentre, col solo rinforzo della catena, tale riduzione sarebbe di fatto trascurabile (-2%).

Per la combinazione {1,3} vengono riportati nelle Figure 6a e 6b gli andamenti degli sforzi normali nella direzione dell'asse dell'elemento considerato, con un valore massimo di trazione in mezzeria della catena di 4,4 MPa e valori massimi di trazione e compressione nei puntoni inferiori a 2 e 12 MPa rispettivamente.

Le Figg.7a e 7b descrivono invece la distribuzione degli sforzi di Von Mises, che tengono conto anche degli sforzi tangenziali dovuti agli effetti taglienti. Queste tensioni si mantengono nella catena con valori molto vicini a quelli riscontrati per gli sforzi normali, mentre nei puntoni raggiungono un picco di circa 13 MPa al lembo superiore. La concentrazione degli sforzi in corrispondenza della connessione puntone/catena è dovuta, come nel caso della struttura non rinforzata, al modello approssimato introdotto per i collegamenti a cerniera.

In Fig.8, infine, è rappresentato l'andamento degli sforzi di Von Mises all'interno dei soli elementi *Shell* che discretizzano il tessuto in FRP, sia nella catena che nei puntoni. La Figura mostra questa volta la capriata nella sua interezza. 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: 230 MPa nel rinforzo del puntone e circa 125 MPa nel tessuto incollato alla catena.

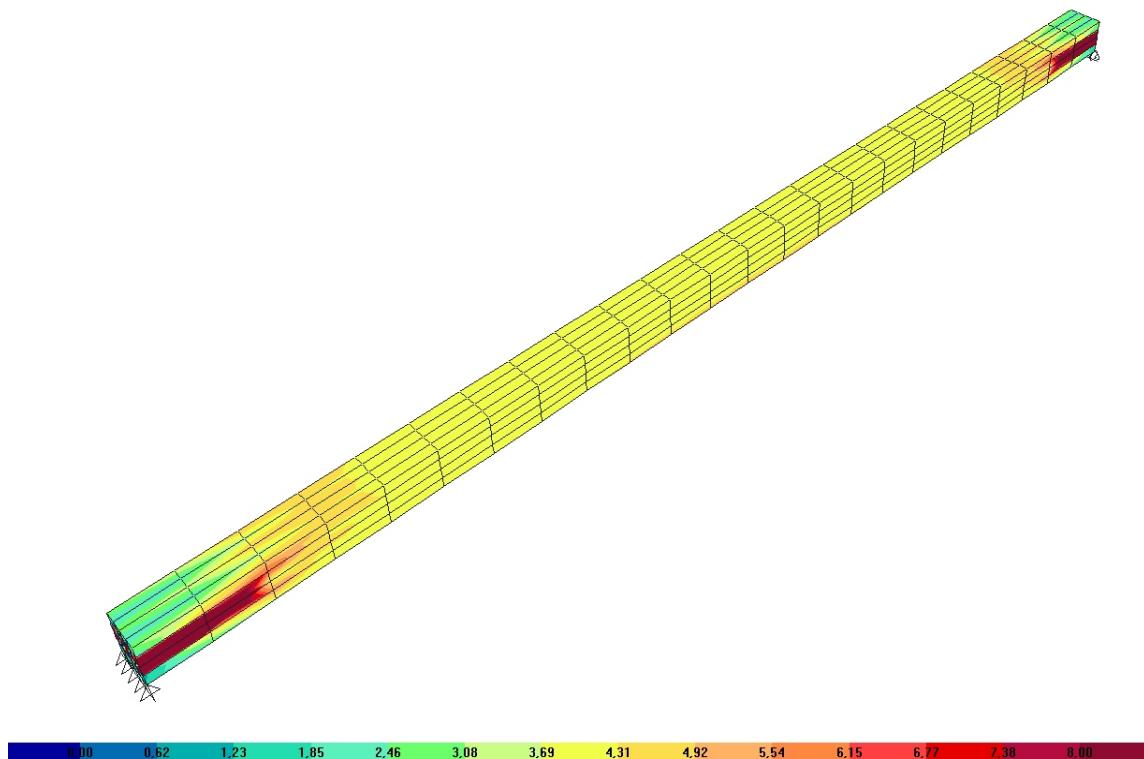


Fig. 6a – Tensioni normali negli elementi *Brick* della catena rinforzata, agenti nella direzione del suo asse

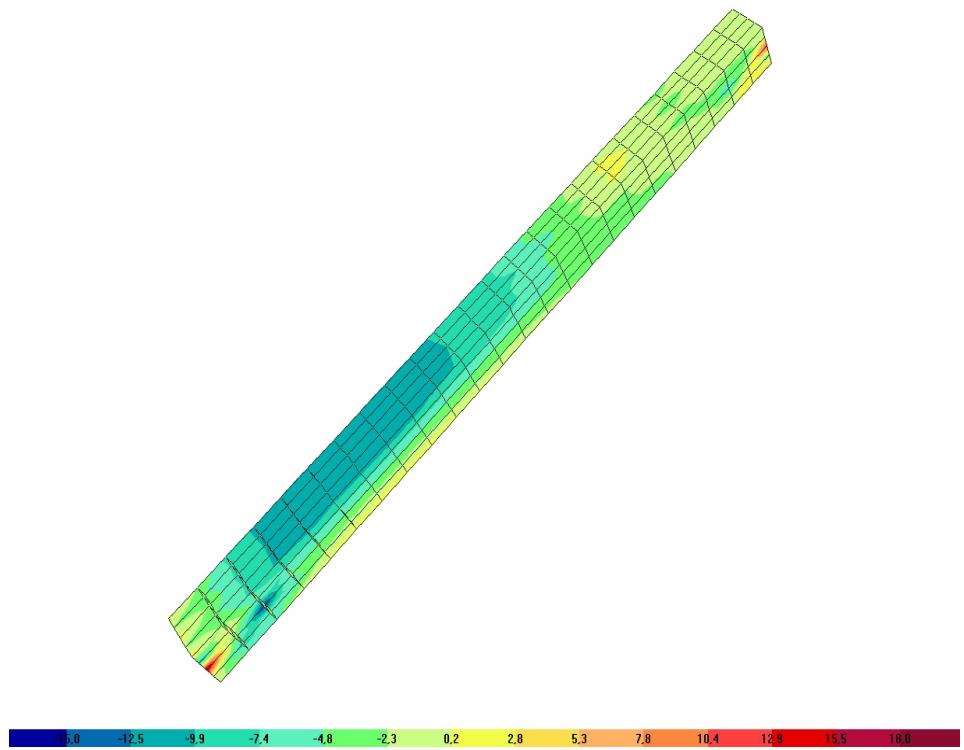


Fig. 6b – Tensioni normali negli elementi *Brick* del puntone rinforzato, agenti nella direzione del suo asse

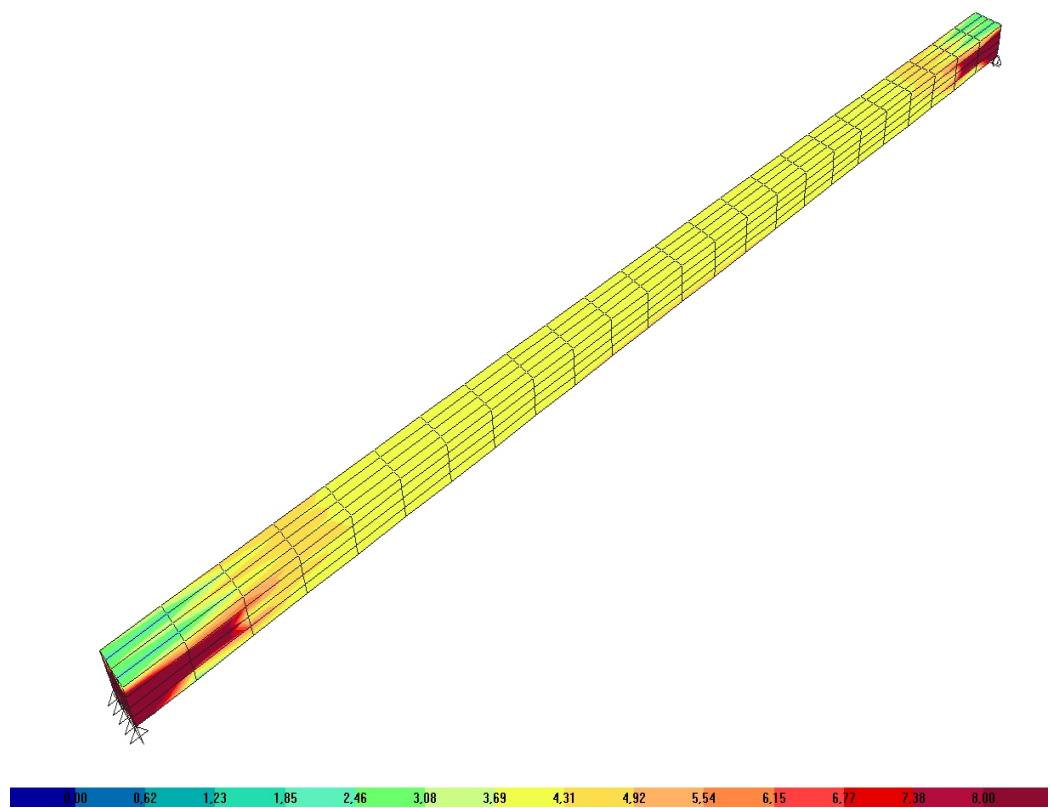


Fig. 7a – Tensioni di Von Mises negli elementi *Brick* della catena rinforzata

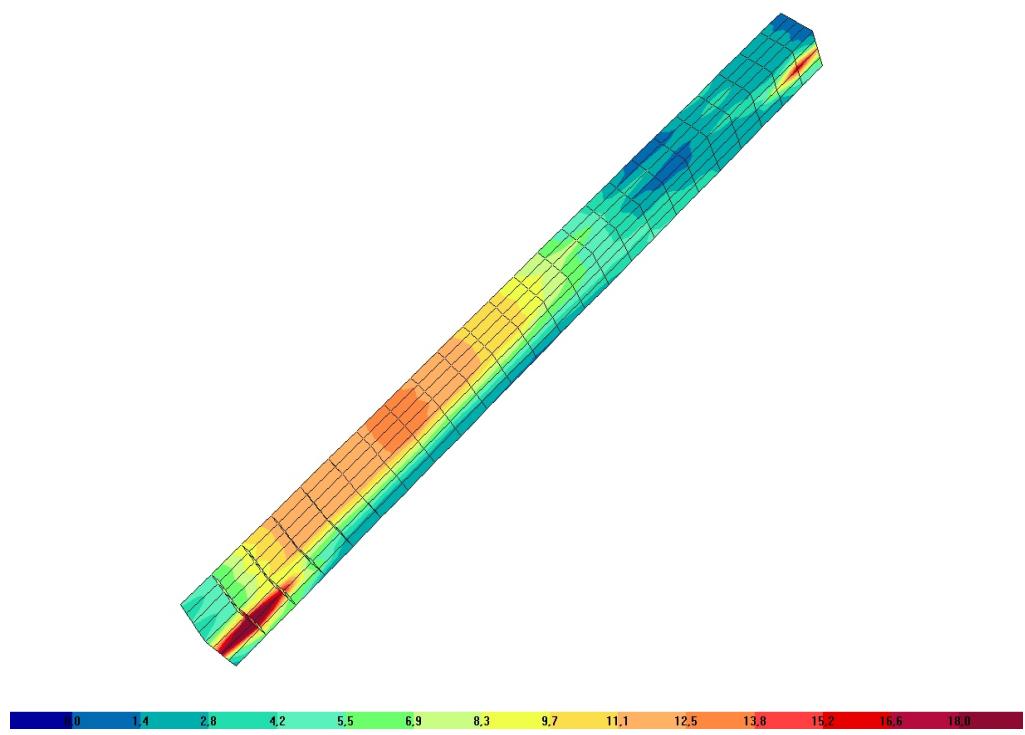


Fig. 7b – Tensioni di Von Mises negli elementi *Brick* del puntone rinforzato

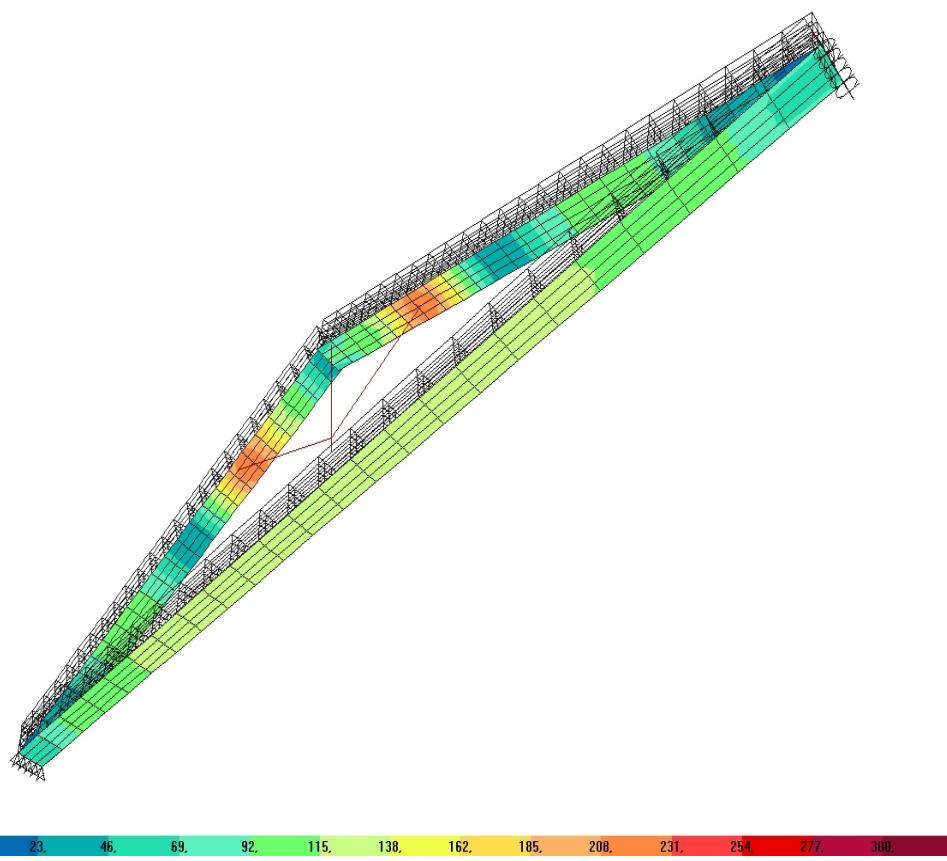


Fig. 8 - Andamento degli sforzi di Von Mises all'interno del solo tessuto di rinforzo in FRP

## 5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In relazione alla capriata lignea esaminata nel presente lavoro, le tensioni all'interno della catena e dei puntoni – elementi principali dell'intera struttura – mostrano in apparenza valori accettabili con riguardo ad una verifica di sicurezza; tuttavia, eventuali condizioni di degrado, dovute ad agenti biologici od ambientali, potrebbero aver alterato le proprietà meccaniche del legno, rendendo necessaria l'applicazione di un rinforzo.

Come già mostrato in lavori precedenti [5][6] con riferimento ad una semplice trave lignea inflessa, un rinforzo basato sull'utilizzo di un tessuto in materiale fibrorinforzato applicato al lembo inferiore degli elementi principali della struttura è in grado di fornire risultati soddisfacenti in termini di riduzione delle tensioni e delle deformazioni. In particolare, un rinforzo più sottile nella catena ed uno più consistente all'intradosso dei puntoni – ma pur sempre visibilmente contenuto – dà luogo ad un sostanzioso calo sia nei valori degli sforzi, sia nelle entità degli spostamenti massimi. Ciò è in grado di consentire, con un impatto significativamente moderato sulla struttura originale – rispetto ad altri tipi di rinforzo più invasivi [9] – un suo rapido riutilizzo nel rispetto delle vigenti norme di sicurezza.

Il modello studiato nel presente lavoro, basato essenzialmente sull'uso di elementi finiti *Brick* e *Shell*, rispettivamente per le porzioni del materiale ligneo e di quello fibrorinforzato, è idoneo a predisporre, ai fini di un'ottimizzazione dei risultati, svariate soluzioni nella configurazione del rinforzo, anche variabile lungo l'elemento: a tale scopo, è stato redatto un opportuno codice di calcolo capace di generare in forma parametrica il file di input per l'analisi ad elementi finiti.

## 6. RINGRAZIAMENTI

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

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Carino, C., Modellazione ed analisi agli elementi finiti di capriate lignee alla lombarda, Collana rapporti scientifici, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia, A.A. 2016/17.
- [2] Carino, C., Carli, F., Finite Element Modeling and Analysis of Aged Timber Trusses located in Northern Italy, *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562, Volume 13, Number 12, pp. 10215-10219, 2018.
- [3] 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.
- [4] Borri, A., Corradi, M., Grazzini, A., A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites*, 2004.
- [5] Carino, C., Rinallo, L.M.A., Analisi di una trave lignea inflessa rinforzata mediante tessuti in FRP, Collana rapporti scientifici, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia, A.A. 2013/14.
- [6] Carino, C., Carli, F., Finite Element Analysis of a Spruce Timber Beam Reinforced by FRP Fabrics, *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562, Volume 11, n.9, pp 6731-6735, 2016.
- [7] Piazza, M., Tomasi, R., Modena, R., Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee, *Ed. Hoepli*, 2005.
- [8] Sandak, A., Sandak, J., Riggio, M., Assessment of wood structural members degradation by means of infrared spectroscopy: an overview, *Structural Control and Health Monitoring*, 23, pp.396–408, 2016.
- [9] Carino, C., Carli, F., Optimal Steel Reinforcement of a Timber Roof Structure by Orthogonal Array Based Simulation, *International Journal of Civil Engineering and Applications*, Vol.4, n.1, pp.15-23, 2014.