

Ripristino strutturale di travi lignee: indagine sugli interventi di ricostruzione di testata con protesi di legno connessa con barre incollate

Tesi di laurea di: **Alessio SUSINI**

e-mail: **alessio.susini@hotmail.com**

Università degli Studi di Firenze – Scuola di Agraria

Corso di Laurea Magistrale in: Scienze e Tecnologie dei Sistemi Forestali

Materia tesi: Valorizzazione del legno

Relatore: Prof. Marco TOGNI

Correlatori: Ing. Benedetto PIZZO Ing. Marco Pio LAURIOLA

Anno Accademico: 2012/2013 Sessione del 16/04/2014

Abstract: *In this work, structural repairing of timber end-beams currently used in restore interventions was experimentally evaluated. The analysed method of intervention regards the replacement of the damaged part with a wood prosthesis connected to the sound part of the element with glued-in rods. Presently in Italy this kind of intervention was realized following the Technical Document CNR DT 206/2007, that provide three different cases considering in the intervention design:*

a) rupture or yielding of the rod

b) rupture of the wood-adhesive or reinforcement-adhesive bonding

c) tensile rupture of the wood (parallel-to-grain)

A different kind of rupture which is not described in the currently used procedure was also considered:

d) splitting of wood (orthogonal-to-grain wood rupture)

The execution of real interventions was simulated using a series of 45 new spruce (Picea abies Karst.) glulam beams. The joint was realized using steel rods, glued-in with epoxy resins: beams were cutting close to the end and then the two parts were jointed together by using the considered reinforcing technique. Steel rods were placed parallel to wood grain in appropriate slots of square section. Slots were usually closed by using appropriate wooden lists. In this experimentally study many intervention configurations were considered.

Beams were subjected to a bending test. The flexural strength was measured on beams, before the joint realization. In addition of flexural strength also the joint stiffness was measured on jointed beams. Finally, load at the collapse of repaired beams was measured.

According to results obtained from tests, stiffness measured on repaired beams was lower than sound beams. Moreover, about 70% of rupture has happened with the 4th rupture mode (d: splitting of wood) which wasn't considered in the CNR DT 206/2007. The analysis of collapse modes of repaired beams permits to observe that the use of stiffer reinforcement elements, as steel rods, could causes ruptures on the weakest part of wood (orthogonal-to-grain direction). Future developments in this study could include the use of a wooden list directly like joint reinforcement, checking the compatibility with bonding.

Introduzione

La ricostruzione di testata di travi lignee, tramite la sostituzione della parte degradata con una protesi di legno e la connessione di quest'ultima alla parte di trave sana con barre di rinforzo e adesivo, è una pratica ormai da tempo diffusa nell'ambito degli interventi di restauro.

Nel lavoro in esame è stato analizzato il comportamento meccanico di vari tipi di giunzione, aventi in comune la connessione fra trave e protesi, realizzata con barre di acciaio incollate con resina epossidica, con l'obiettivo di fornire dati, frutto di prove, che consentano di migliorare la previsione del comportamento meccanico e di favorire il miglioramento della progettazione di tali interventi.

La tecnica analizzata prevede l'utilizzo di una protesi in legno, della stessa specie della trave su cui si va ad intervenire. Gli elementi di rinforzo in acciaio vengono posizionati in direzione parallela alla fibratura, per minimizzare gli effetti del ritiro/rigonfiamento del legno. Questi accorgimenti garantiscono la compatibilità dei materiali costituenti il giunto. Come adesivo vengono utilizzate malte epossidiche, a consistenza tissotropica (spatolabili). La realizzazione del giunto viene eseguita, in cantiere, tramite l'apertura di canali laterali oppure di fori dove inserire le barre.

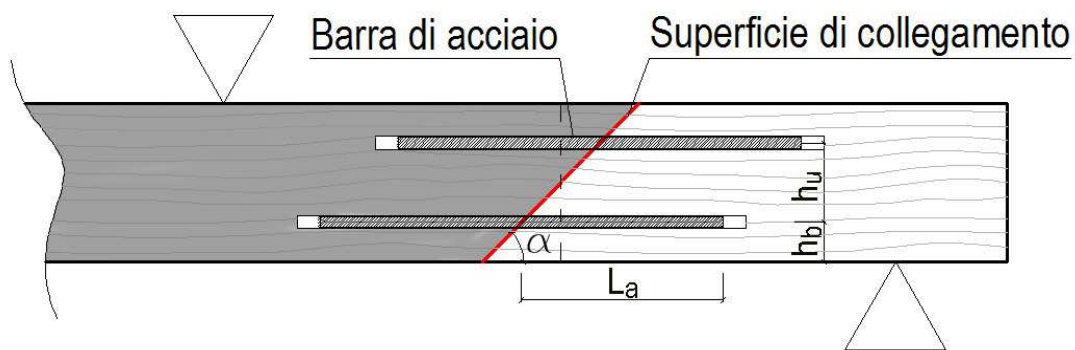


Figura 1 – Rappresentazione schematica del giunto in sezione longitudinale, con evidenziata la superficie di collegamento fra la parte di trave sana e la protesi.

Riferimenti normativi

La normativa di riferimento in Italia è costituita essenzialmente dal Documento Tecnico CNR DT 206/2007. Il Documento indica come valore caratteristico della capacità portante del collegamento il minore tra i risultati di 3 diversi modi di rottura da considerarsi in fase di progetto:

- $F_{ax,1}$ = **modo a**: rottura a trazione della barra.

$$F_{ax,1} = f_{yd} \cdot A_{res}$$

Dove: f_y = tensione di snervamento dell'acciaio;

A_{res} = area resistente della barra.

- $F_{ax,2}$ = **modo b**: rottura per scorrimento del legno all'interfaccia con l'adesivo;

$$F_{ax,2} = \pi \cdot d_{eq} \cdot L_a \cdot f_{v,k}$$

Dove: d_{eq} = diametro equivalente, pari al minore tra il diametro del foro e $1,1 d_{est}$ (diametro esterno della barra, per le barre ad aderenza migliorata pari a $1,1d$, quindi: $d_{eq} = 1,21d$);

L_a = lunghezza ancoraggio;

$f_{v,k}$ = resistenza a taglio del legno in corrispondenza dell'incollaggio.

- $F_{ax,3}$ = **modo c**: rottura del legno per trazione.

$$F_{ax,3} = f_{t,0,k} \cdot A_{eff}$$

Dove: $f_{t,0,k}$ = resistenza caratteristica a trazione del legno parallela alla fibratura;

A_{eff} = area efficace di rottura del legno.

Riferendosi alle passate esperienze sull'argomento sono emerse delle differenze sostanziali tra prove sperimentali e ciò che viene normalmente considerato in fase di progettazione: in particolare è stato identificato un modo di rottura diverso da quelli riportati nel CNR DT 206/2007:

- $F_{90,Rk}$ = **modo d**: rottura per spacco del legno.

Il fenomeno della rottura per spacco è portato dall'azione della forza di taglio T agente sul collegamento, che viene ripartita tra le barre superiori e quelle inferiori (figura 2).

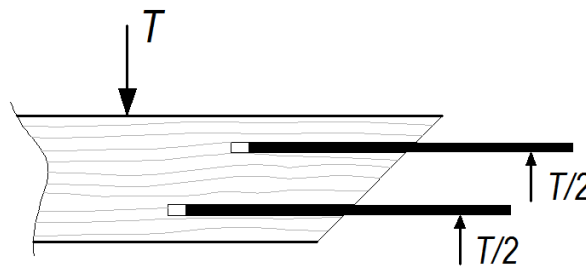


Figura 2 – Schema delle forze agenti sul giunto che inducono la rottura del legno per spacco.

Questo tipo di rottura è già stato osservato recentemente in prove sperimentali preparate secondo un approccio simile a quello del presente studio¹, ma non viene considerato dalla normativa vigente. L'approccio di calcolo proposto in seguito è riportato nell'Eurocodice 5²:

Nell'Eurocodice 5 viene indicata la seguente formula:

$$F_{90Rk} = 14bw \sqrt{\frac{h_b}{1 - \frac{h_b}{h}}}$$

Dove: b = larghezza della trave;

w = coefficiente di correzione, che nel caso specifico è 1;

h_b = distanza del centro della barra dal bordo superiore/inferiore;

h = altezza della trave.

¹ Pizzo *et al.*, 2013.

² UNI EN 1995-1-1:2009 – Eurocodice 5, p.46.

Nel calcolo della capacità portante del collegamento e del relativo valore atteso a rottura per il modo di rottura d, si è fatto riferimento a un metodo di calcolo suggerito dall'ing. Lauriola, oltre a quello riportato nell'Eurocodice 5.

Nel calcolo proposto da Lauriola, nella formula precedentemente esposta b si assume pari al minore fra: larghezza della trave e $2 \cdot (h_b + b_b + d/2)$, dove b_b è la distanza del centro della barra dal bordo laterale. Secondo tale ipotesi la sezione resistente cresce all'aumentare della distanza tra le barre e i bordi laterali (figura 3).

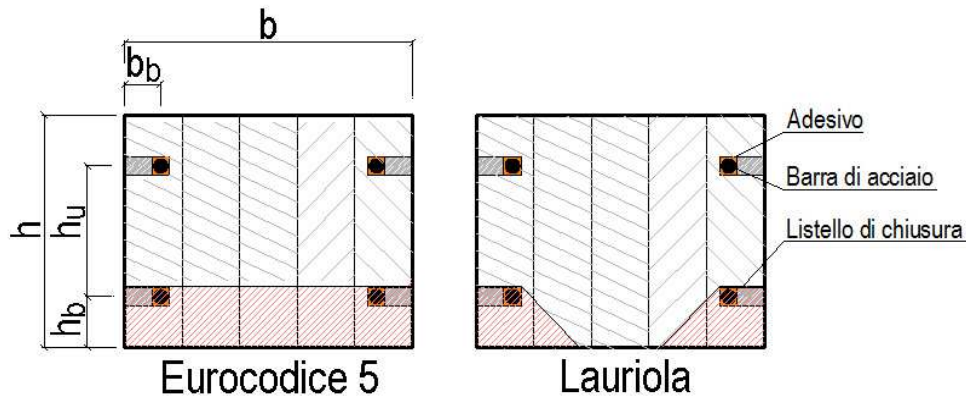


Figura 3 – Rappresentazione schematica del giunto in sezione trasversale. Viene riportata l'area resistente del legno per il modo di rottura d (spacco) nei due metodi proposti. Vengono riportate le sigle corrispondenti ad alcune dimensioni del giunto.

Lo schema di calcolo a cui si fa riferimento per la progettazione del giunto si basa su un approccio proposto per la prima volta sempre da Lauriola, nel 2002, per gli interventi di riparazione di elementi antichi in legno.

Per il calcolo delle forze che agiscono sulle barre di collegamento si utilizzano le seguenti equazioni:

$$(1) N_T = T \cdot \tan \alpha \qquad (2) N_M = M / h_u$$

Dove: N_T = forza di trazione agente sulla barra dovuta alla porzione di forza di taglio T , si considera solo quando $\alpha < 90^\circ$;

N_M = forza di trazione sulla barra dovuta al momento flettente M ;

T = sforzo di taglio;

M = momento flettente;

α = angolo di inclinazione della superficie di collegamento;

h_u = distanza reciproca tra le barre superiori e inferiori.

Nel caso specifico il collegamento viene realizzato utilizzando 4 barre, due superiori e due inferiori, per cui sarà necessario determinare la forza agente sulle due barre inferiori, che risultano essere le più sollecitate, considerando la seguente formula:

$$N_{tot} = N_T / 4 + N_M / 2$$

Dove N_{tot} rappresenta la forza agente sulla singola barra, utilizzata per definire la connessione.

Come si può comprendere osservando il disegno riportato in figura 4, se l'angolo di inclinazione della superficie di collegamento è minore di 90° , il meccanismo ipotizzato suddivide lo sforzo di taglio in

due componenti: una ortogonale alla superficie del collegamento (N_c), che agisce in compressione, e una parallela alle barre N_T , che va a sommarsi alla forza di trazione generata dal momento M .

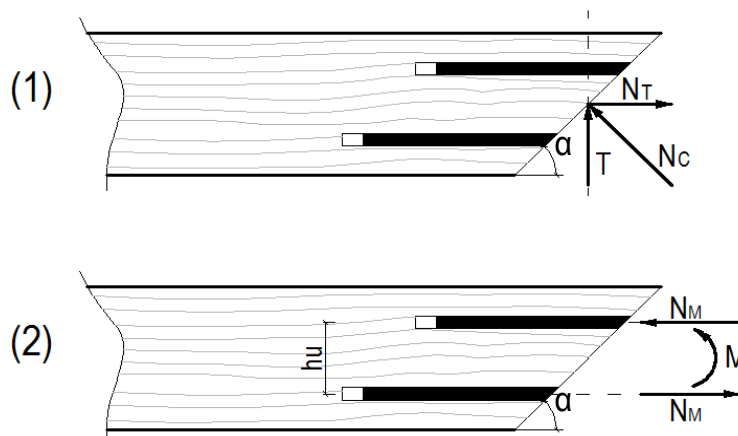


Figura 4 – Scomposizione delle forze agenti sulla connessione: (1) taglio T , (2) momento M .

Il CNR DT 206/2007 indica inoltre che, per evitare fenomeni di rottura del legno in direzione parallela alle barre, è necessario mantenere una distanza minima delle barre dai bordi esterni in relazione al diametro della barra stessa, fissata in $2,5d$, dove d è il diametro nominale della barra. La distanza reciproca delle barre deve essere invece almeno $5d$.

In fase di progetto è stata considerata, cautelativamente, una distanza dai bordi superiore e inferiore pari a $3,5d$.

Materiali e metodi

Per il presente studio sono state utilizzate travi in legno lamellare di abete rosso (*Picea abies* Karst.), rientranti nella classe C24 secondo la norma UNI EN 338:2009. Sono state utilizzate travi di due diverse sezioni (120x140 mm e 200x160 mm). In fase di produzione è stato espressamente richiesto un controllo della massa volumica, in modo tale che quest'ultima risultasse compresa tra 400 e 460 kg/m³, al fine di rendere il materiale legnoso il più omogeneo possibile. In totale sono stati utilizzati 45 provini: 25 di più piccole dimensioni e 20 di dimensioni maggiori.

LEGNO	CLASSE DEL LEGNO: GL24H		
$F_{t,0,k}$	Resistenza caratteristica a trazione del legno parallela alla fibratura	16,5	N/mm ²
$f_{m,k}$	Resistenza caratteristica a flessione	24,0	N/mm ²
$f_{v,k}$	Resistenza caratteristica a taglio	4,0	N/mm ²
$f_{v,k}$	Resistenza a taglio del legno in corrispondenza dell'incollaggio (da TAB7-11 CNR-DT206/2007)	4,0	N/mm ²
ρ_k	Peso specifico caratteristico	360	kg/m ³

Tabella 1 - Caratteristiche del legno.

Sono state utilizzate barre di acciaio ad aderenza migliorata da c.a. (classe acciaio B450C) di due diversi diametri (10 e 14 mm) e barre di acciaio filettate di 7 mm di diametro.

ACCIAIO	CLASSE DELL'ACCIAIO: B450C		
f_y	Tensione di snervamento	450	N/mm ²

Tabella 2 - Caratteristiche dell'acciaio.

Come adesivo è stata utilizzata una resina epossidica prodotta dalla *Mapei*, la MAPEWOOD PASTE 140 LM. Questa resina epossidica, a consistenza tissotropica, è stata studiata appositamente per interventi di ripristino strutturale su legno ed è costituita da due componenti (componente A: resina e componente B: indurente), con rapporto nel dosaggio A:B=2:1, in peso.

Sono state eseguite delle prove preliminari sulle travi intere, prima della realizzazione delle giunzioni, per la determinazione del modulo di elasticità a flessione globale.

Le prove sono state eseguite utilizzando una macchina prova materiali Zwick con fondo scala da 600 kN. È stato deciso di utilizzare una configurazione identica tra le travi piccole e quelle grandi, variando solamente il carico da applicare. La deformazione della trave viene misurata in mezzeria nella parte inferiore (tesa), utilizzando un trasduttore.

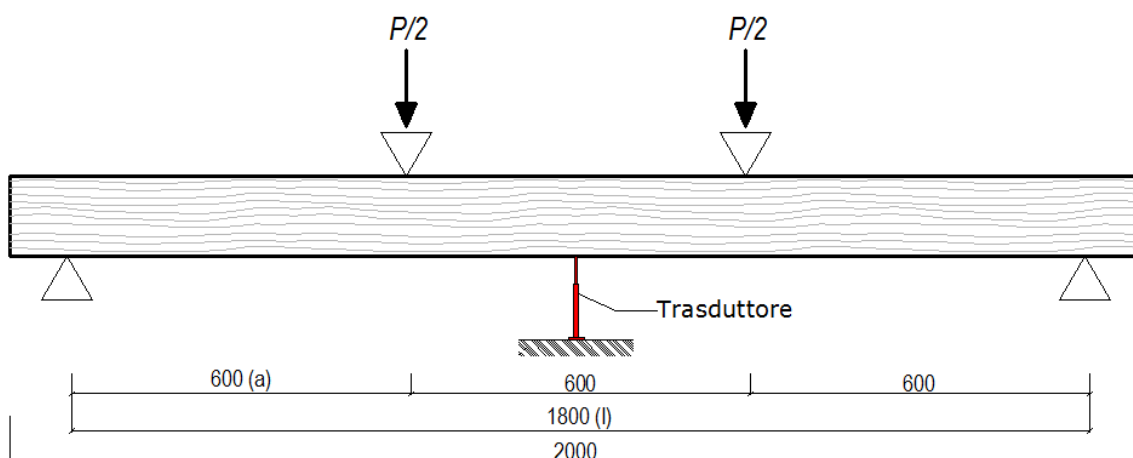


Figura 5 - Configurazione per il calcolo del modulo di elasticità.

Per la realizzazione dei giunti si è provveduto all'apertura di canali laterali dove inserire le barre, in prossimità di una testata della trave, e alla realizzazione del taglio per la separazione della protesi (la parte più corta del provino) dalla trave (la parte più lunga del provino). Le due parti sono state riunite tramite tavolette di legno fissate sulle facce superiore/inferiore del provino. È stato quindi eseguito l'incollaggio, applicando prima la malta sul fondo dei canali e in seguito inserendo le barre. Viene solitamente inserito un listello di legno a chiusura del canale.





Fasi di preparazione dei giunti. Dall'alto: realizzazione dei canali laterali, taglio delle travi e successivo ricollegamento delle due parti con tavolette di legno, realizzazione dell'incollaggio e inserimento del listello di legno a chiusura del canale, inserimento delle viti di rinforzo.

Sono state provate varie configurazioni del giunto, definite in base agli obiettivi preposti. Per ogni configurazione è stata realizzata una serie di 5 provini.

Per quanto riguarda i provini più piccoli sono stati verificati:

- l'effetto dell'inclinazione della superficie di collegamento tra protesi e trave, rispetto al piano orizzontale, realizzando il taglio con angolo di 45° (configurazione A), 90° (configurazione B) e 135° (configurazione C). Sono state usate barre da 10 mm di diametro per il collegamento;
- il rinforzo dei provini mediante l'utilizzo di viti inserite in direzione perpendicolare alla fibratura, in configurazione B, con barre da 10 mm;
- l'uso di barre filettate accoppiate di 7 mm di diametro, più rigide delle normali barre di 10 mm, a parità di sezione resistente, su provini in configurazione B.

I provini più grandi sono stati realizzati tutti in configurazione A. Sono stati verificati:

- l'effetto della dimensione dell'elemento di rinforzo, realizzando una serie di provini con barre di acciaio di 10 mm e una con barre di 14 mm di diametro;
- l'effetto dell'assenza del listello di chiusura del canale, su provini con barre di 10 mm in cui non è stato inserito il listello;
- l'effetto della distanza delle barre dai bordi laterali, sempre utilizzando le barre di 10 mm, ma inserite ad una maggiore profondità dal bordo.


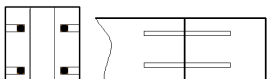
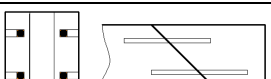






CONFIGURAZIONI DI PROVA REALIZZATE				
Tipologia di prova	N° provini	ID provini	Configurazione	Schema rappresentativo
Effetto dell'inclinazione del taglio	5	1-5	configurazione A, Φ 10	
	5	6-10	configurazione B, Φ 10	
	5	11-15	configurazione C, Φ 10	
Rinforzo con viti	5	16-20	configurazione B, Φ 10	
Barre filettate accoppiate	5	21-25	configurazione B, Φ 7+7	
Barre di diverso diametro	5	26-30	configurazione A, Φ 14	
	5	31-35	configurazione A, Φ 10	
Assenza del listello di chiusura	5	36-40	configurazione A, Φ 10	
Barre a maggiore profondità	5	41-45	configurazione A, Φ 10	

Tabella 3 - Prove eseguite.

Sui provini sono state rilevate la rigidità e le deformazioni del giunto in campo elastico, posizionando tre serie di traduttori: due coppie di trasduttori sono state posizionate una in corrispondenza del giunto e l'altra in posizione simmetrica sulla parte di trave intera, per valutare le differenze nella deformazione fra la parte giuntata e quella che non ha subito l'intervento; un altro trasduttore misura l'abbassamento nella zona mediana della trave per la determinazione della rigidità del provino, da confrontare con i valori di rigidità espressi dal modulo di elasticità rilevato sui provini prima della realizzazione del giunto. In seguito sono state eseguite le prove a rottura per flessione.

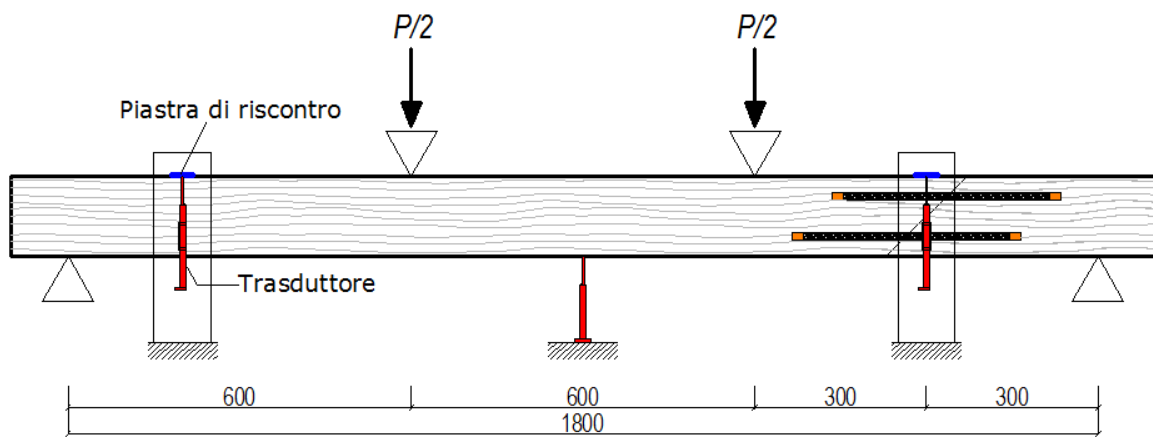
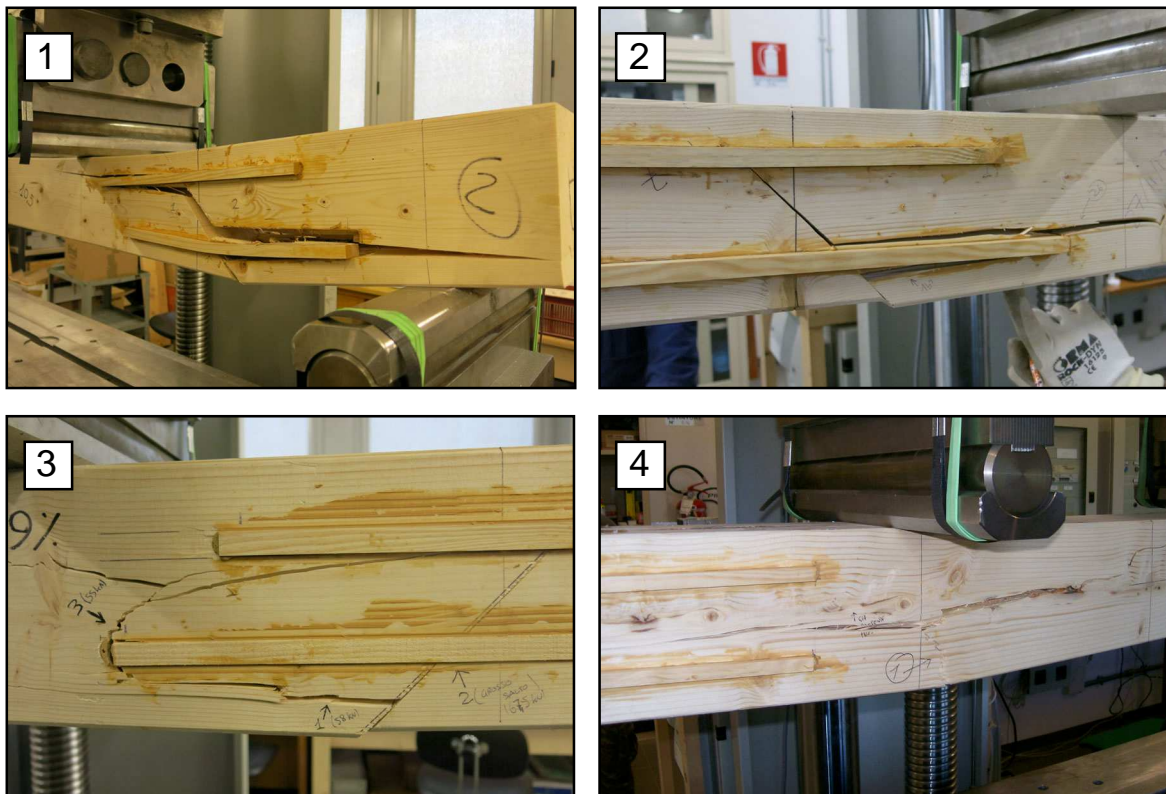


Figura 6 – Determinazione della rigidità e delle deformazioni laterali sulle travi giuntate.



Esempi delle varie modalità di rottura che è stato possibile osservare sui provini: 1) provino 15, 2) provino 5, 3) provino 29, 4) provino 17.

Dopo la rottura sono state eseguite ulteriori valutazioni, per la determinazione di: massa volumica e umidità (con il metodo della doppia pesata), ampiezza degli anelli e legno di reazione, rilevati sul legno in prossimità del giunto.

Risultati

Dai risultati registrati durante le prove si è potuto verificare come i provini interi, prima dell'intervento, risultassero più rigidi rispetto agli stessi dopo la realizzazione del giunto. Le deformazioni registrate nella parte del provino dove era presente la giunzione sono risultate maggiori rispetto a quelle del lato opposto della trave, su cui non si è intervenuto.

ID provino	E medio (provini interi)	E medio (travi giuntate)	$\Delta\%$ medio	$\Delta\%$ min	$\Delta\%$ max
	N/mm ²	N/mm ²	%	%	%
Provini piccoli (da 1 a 25)	13275	12753	-4,12	-1,09	-5,76
Provini grandi (da 26 a 45)	13425	12097	-9,89	-8,33	-11,82

Tabella 4 - Variazioni di rigidità delle travi dopo l'intervento.

Analizzando i valori di carico a rottura ottenuti dalle prove sperimentali e confrontando quest'ultimi con i valori di progetto, si può notare che i valori attesi secondo il DT 206/2007 sono sempre riferiti al modo di rottura b (scorrimento) e risultano mediamente molto inferiori rispetto a quelli realmente raggiunti, mentre i valori di previsione per il modo di rottura d (spacco del legno) sono mediamente superiori a quelli raggiunti nelle prove. Dall'analisi dei modi di rottura si può notare che la maggior parte dei provini si sia rotta per spacco, diversamente da quanto considerato nella vigente normativa. I valori di carico raggiunti dai provini piccoli sono risultati molto omogenei tra loro e le differenze di carico sono state statisticamente non rilevanti, tranne per i provini rinforzati con viti, che hanno ottenuto valori di rottura molto maggiori, tanto da provocare la rottura per flessione del legno della trave in mezzera, e non delle giunzioni.

Per quanto riguarda i provini di dimensioni maggiori sono emerse delle differenze sostanziali nel modo di rottura per la serie con barre di 14 mm di diametro rispetto alle altre serie di provini (con barre di 10 mm). In questo caso la rottura è avvenuta per scorrimento/rottura a trazione del legno e non per spacco. Per quanto riguarda le restanti tre serie di provini le differenze maggiori sono state registrate per i provini senza listello, che si sono rotti a valori decisamente inferiori rispetto ai provini dotati di listello di chiusura dei canali.

Le modalità di rottura riscontrate durante le varie prove, possono essere raggruppate in quattro categorie:

- 1) rottura sul giunto per spacco del legno fra le barre superiori e inferiori. La rottura avviene tipicamente sotto la barra superiore e sopra quella inferiore, rispettivamente dal lato della trave e sulla protesi;
- 2) rottura del legno, o all'interfaccia tra legno e adesivo, in direzione perpendicolare alla fibratura, sotto la barra inferiore, dal lato della trave;
- 3) rottura del giunto per scorrimento/rottura a trazione del legno, quando si riscontra uno spostamento in senso longitudinale della barra. Si può osservare in questo caso che le fratture sul legno partono dall'estremità della barra per poi allargarsi verso la giunzione;
- 4) rottura della trave in mezzera, dovuto alla rottura del legno per flessione.

Sulle serie di provini 31-35 e 36-40 è stato possibile osservare un comportamento a rottura che può essere definito intermedio fra la prima e la seconda categoria descritta, con la differenza che, in assenza del listello di chiusura, la prima frattura non avviene sul legno, ma più facilmente sull'adesivo.

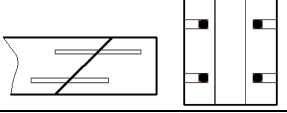
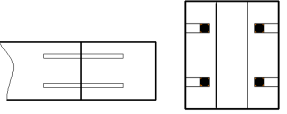
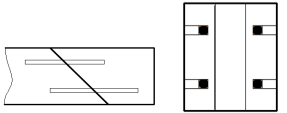
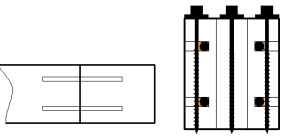
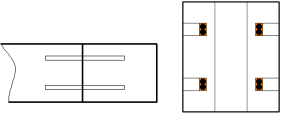
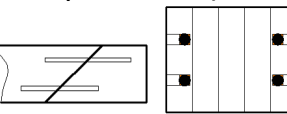
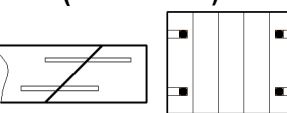
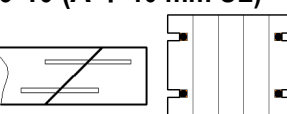
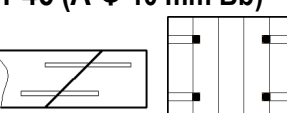
CARICO A ROTTURA E VALORI ATTESI PER LE VARIE CONFIGURAZIONI PROVATE							
	Risultati		Valori attesi				Modalità rottura
	CR medio (kN)	CR min (kN)	Modo b (4MPa) (kN)	Modo b (8MPa) (kN)	Modo d (Lauriola) (kN)	Modo d (EC 5) (kN)	
1-5 (A Φ 10 mm) 	41,7	35,0	25,54	51,08	45,91	45,91	Spacco/ sotto b.inf.
6-10 (B Φ 10 mm) 	39,6	37,2	25,54	51,08	45,91	45,91	Spacco
11-15 (C Φ 10 mm) 	36,8 (38,1)	31,6 (34,5)	25,54	51,08	45,91	45,91	Spacco
16-20 (B Φ 10 mm + viti) 	51,8	46,3	25,54	51,08	68,86	68,86	Rottura trave
21-25 (B Φ 7+7 mm) 	40,2 (42,1)	32,5 (38,7)	29,27	58,54	45,91	45,91	Spacco
26-30 (A Φ 14 mm) 	64,7 (66,3)	58,2 (63,9)	31,68	63,36	79,07	94,13	Scorrimento
31-35 (A Φ 10 mm) 	71,8	65,1	32,84	65,68	48,73	74,96	Spacco
36-40 (A Φ 10 mm SL) 	65,2 (68,8)	51,0 (66,5)	32,84	65,68	48,73	74,96	Spacco
41-45 (A Φ 10 mm Bb) 	76,1	70,2	32,84	65,68	63,72	74,96	Spacco/ sotto b.inf.

Tabella 5 - Confronto fra valori rilevati e valori attesi. SL = senza listello, Bb = maggiore distanza delle barre dal bordo.

MODALITÀ DI ROTTURA: CATEGORIE			
	Rappresentazione schematica	Tipo di configurazione	CR medio (N)
1		B Φ 10 mm 	39,6
		C Φ 10 mm 	36,8 (38,1)
		B Φ 7+7 mm 	40,2 (42,1)
2		A Φ 10 mm SL 	65,2 (68,8)
		A Φ 10 mm 	71,8
		A Φ 10 mm 	41,7
3		A Φ 10 mm Bb 	76,1
		A Φ 14 mm 	64,7 (66,3)
4		B Φ 10 mm + viti 	51,8

Tabella 6 - Modalità di rottura: categorie rilevate. SL = senza listello, Bb = maggiore distanza delle barre dal bordo.

I valori relativi a massa volumica, ampiezza degli anelli e legno di reazione non hanno mostrato correlazioni strette con la resistenza del giunto.

Conclusioni

In conclusione è possibile fare le seguenti osservazioni:

- non è stata confermata l'influenza dell'inclinazione del taglio sulla resistenza del giunto, i provini con barre filettate accoppiate hanno ottenuto risultati equivalenti a quelli con le normali barre di acciaio di 10 mm, mentre il rinforzo dei provini con le viti ha permesso di ristabilire le caratteristiche di resistenza originarie del legno (la rottura non è avvenuta sulla giunzione, ma sul legno per flessione);
- i provini con le barre di dimensioni maggiori hanno manifestato prevalentemente la rottura per scorrimento delle barre, per cui si sono rotti in maniera totalmente diversa rispetto agli altri travetti. In questo caso le barre sono state inserite ad una distanza maggiore dai bordi superiore/inferiore, per cui si è contribuito in maniera significativa all'aumento della resistenza del legno per spacco;
- si ritiene che il listello di chiusura contribuisca alla resistenza del giunto: l'assenza del listello, infatti, non permetterebbe alla porzione di legno più esterna di lavorare al meglio;
- la distanza delle barre dai bordi laterali sembra influire in maniera meno rilevante sulla resistenza del giunto;
- sono state osservate delle significative differenze nei valori sperimentali, rispetto ai valori di previsione considerati. In particolar modo il Documento Tecnico CNR DT 206/2007 non considera il modo di rottura d (spacco del legno), e riporta parametri che possono essere considerati non esatti, o comunque molto cautelativi, per il modo b (scorrimento).

L'analisi dei modi di rottura ha permesso di osservare che l'utilizzo di un elemento di rinforzo molto rigido, come le barre di acciaio, tende a spostare il problema sulla parte più debole del legno (rottura per spacco in direzione perpendicolare alla fibratura). In futuro si potrebbe prevedere l'utilizzo di listelli di legno direttamente come elementi di rinforzo, utilizzando legno ad elevata densità, senza difetti, o legno densificato, verificandone prima la compatibilità con l'incollaggio.

Bibliografia

- AA. VV., 2006. LICONS: LOW INTRUSION CONSERVATION SYSTEMS FOR TIMBER STRUCTURES. FINAL REPORT. [HTTP://WWW.LICONS.ORG](http://www.licons.org).
- AMOROSO G.G., CAMAITI M., 1997. *Scienza dei materiali e del restauro. La pietra: dalle mani degli artisti e degli scalpellini a quelle dei chimici macromolecolari*. ALINEA Editrice s.r.l., Firenze.
- BRERETON C., 1995. *The Repair of Historic Buildings*. English Heritage, London.
- CHARLES F.W.B., 1992. *Dismantling, Repairing and Rebuilding as a Means of Conservation, in: ICOMOS UK: Timber Engineering Conference, Surrey University, 8 April*. ICOMOS UK, London.
- CNR - COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI, 2007. *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno - CNR DT 206/2007*.
- CRISTINELLI G., 2002. *La Carta di Cracovia 2000: principi per la conservazione e il restauro del patrimonio costruito*. Marsilio ed., Venezia.
- FOLLESA M., LAURIOLA M., 2001. *La resistenza al fuoco delle strutture di legno*. Recupero e Conservazione n° 39, De Lettera Editore Milano.

- GAVIOLI M., 2012. *Riabilitazione strutturale di elementi lignei degradati: influenza dei materiali sulle prestazioni del giunto*. Tesi di master in Architettura, Libera Università di Bolzano.
- GIORDANO G., 1981-1986. *Tecnologia del legno*. UTET, Torino.
- LAURIOLA M., 2002. *Esempi di calcolo secondo i criteri dell'Eurocodice 5, in: Il restauro delle strutture lignee*. Mapei: 19-25.
- LAVISCI P., BERTI S., PIZZO B., TRIBOULOT P., ZANUTTINI R., 2001. *A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber*. Holz als Roh-und Werkstoff, vol. 59 n° 1-2.
- MAY C.A., TANAKA Y., 1973. *Epoxy Resins. Chemistry and Technology*. Marcel Dekker, INC, New York.
- PIZZO B., GAVIOLI M., LAURIOLA M., 2013. *Evaluation of a design approach to the on-site structural repair of decayed old timber end beams*. Engineering Structures 48: 611–622.
- PIZZO B., LAURIOLA M., 2009. *Repair of timber end-beams: Some operational aspects*. Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09 – Mazzolani ed. Taylor & Francis Group, London.
- PIZZO B., LAVISCI P., 2003. *Un approccio alla valutazione qualitativa della compatibilità nel restauro strutturale del legno, in Atti del Convegno "Dalla Reversibilità alla Compatibilità", Conegliano*. Ed. Nardini, Firenze.
- REGIONE TOSCANA, 2009. *Linee guida per l'edilizia del legno in Toscana*. Edizioni Regione Toscana.
- TLUSTOCHOWICZ G., SERRANO E., STEIGER R., 2011. *State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods*. Materials and Structures 44: 997–1020.
- UNI EN 13183-1:2002. *Umidità di un pezzo di legno segato. Determinazione tramite il metodo per pesata*.
- UNI EN 1995-1-1:2009. *Eurocodice 5. Progettazione delle strutture di legno. Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici*.
- UNI EN 302-1:2005. *Adesivi per strutture portanti di legno. Metodi di prova – Parte 1. Determinazione della resistenza del giunto al taglio*.
- UNI EN 338: 2009. *Legno strutturale. Classi di resistenza*.
- UNI EN 408:2004. *Strutture di legno. Legno massiccio e legno lamellare incollato. Determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche*.
- UZIELLI L. (a cura di), 2001. *Il manuale del legno strutturale: Vol. I. Ispezione e diagnosi in opera*. Mancosu Editore, Roma.
- UZIELLI L. (a cura di), 2004. *Il manuale del legno strutturale: Vol. IV. Interventi sulle strutture*. Mancosu Editore, Roma.