



Università degli Studi di Firenze

DOTTORATO DI RICERCA IN
"ECONOMIA, PIANIFICAZIONE FORESTALE E
SCIENZE DEL LEGNO"

CICLO XXV

COORDINATORE Prof.ssa Susanna Nocentini

**Travi antiche di abete bianco (*Abies alba*
Mill.) intagliate per la realizzazione di
interventi di rinforzo: studio e previsione
del comportamento meccanico**

Settore Scientifico Disciplinare AGR/06

Dottorando
Dott. Alberto Cavalli

Tutore
Prof. Marco Togni

Anni 2010/20012

Indice

Capitolo 1 - Introduzione	1
1.1 STUDIO BIBLIOGRAFICO.....	2
1.1.1 Approccio alle strutture antiche	2
1.1.2 Restauro di elementi lignei antichi.....	4
1.1.2.1 Consolidamento tramite l'inserimento di elementi di rinforzo.....	5
1.1.2.2 Limiti dei lavori di ricerca.....	8
1.1.3 L'efficacia degli interventi di rinforzo	9
1.1.4 L'importanza del Modulo elastico negli interventi di rinforzo	12
1.1.4.1 Cause di variazione del Modulo Elastico	13
1.2 OBIETTIVI DELLA RICERCA	15
Capitolo 2 - Materiali e metodi	17
2.1 GLI ELEMENTI LIGNEI UTILIZZATI	17
2.2 CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI LIGNEI.....	17
2.2.1 Rilievo delle dimensioni	17
2.2.2 Rilievo dei difetti	18
2.2.2.1 Incidenza delle fessurazioni da ritiro.....	19
2.2.3 Determinazione della sezione efficace	20
2.3 I TAGLI.....	21
2.3.1 Realizzazione dei tagli	22
2.4 PROPRIETA' FISICO MECCANICHE DEGLI ELEMENTI LIGNEI	24
2.4.1 Densità	24
2.4.2 Prove a flessione	25
2.4.2.1 Il calcolo del Modulo Elastico	26
2.4.2.2 I sistemi di misura	30
2.4.2.3 Sistema di acquisizione dei dati	31
2.4.2.4 Esecuzione delle prove.....	31
2.4.3 Proprietà della sezione	33
2.4.4 L'influenza dei tagli sul Modulo di Scorrimento	34
2.5 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO MEDIANTE PROVE DINAMICHE.....	36
2.5.1 Vibrazione libera trasversale.....	37
2.5.2 Vibrazione libera longitudinale.....	40
2.5.3 Propagazione longitudinale di onde di pressione	40

2.6 STIMA DELLA DENSITÀ MEDIANTE PILODYN	41
--	----

Capitolo 3 - Risultati

3.1 UMIDITÀ DEL LEGNO	43
3.1.1 Determinazione dell'umidità del legno	43
3.1.2 Variazione dell'umidità del legno durante le prove	44
3.2 DENSITÀ DEL LEGNO	47
3.2.2 Variazione della densità media delle travi in seguito all'esecuzione dei tagli	47
3.3 RILIEVO DEI DIFETTI E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA.....	48
3.4 EFFETTO DEI TAGLI SULLA VALUTAZIONE DEI NODI AI FINI DELLA CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA.....	52
3.4.1 Variazione della Categoria assegnata alle travi in funzione dell'effetto dei tagli sui nodi.....	53
3.4.2 Considerazioni sulla scelta della Categoria da assegnare alle travi dopo la realizzazione dei tagli	57
3.5 MODULO ELASTICO	57
3.5.1 Relazioni tra Moduli Elastici e caratteristiche delle travi.....	58
3.6 VARIAZIONE DEI MODULI ELASTICI STATICI DOPO LA REALIZZAZIONE DEI TAGLI ...	62
3.6.1 Variazione del Modulo Elastico Locale	62
3.6.2 Variazione del Modulo Elastico Globale	63
3.6.3 Considerazioni aggiuntive sulla variazione dei valori di E	67
3.7 ANALISI STATISTICA	68
3.8 CONTRIBUTO DELLA SOLLECITAZIONE DI SCORRIMENTO ALLA FRECCIA DI INFLESSIONE	70
3.8.1 Calcolo della freccia di inflessione dovuta alla sollecitazione di scorrimento	71
3.9 UN CASO PARTICOLARE: LA TRAVE T05	72
3.10 PREVISIONE DI DENSITÀ E MODULO ELASTICO MEDIANTE PROVE NON DISTRUTTIVE.....	76
3.10.1 Previsione di E tramite prove non distruttive	76
3.10.2 Previsione delle variazioni di E tramite le prove non distruttive.....	77
3.10.3 Stima della densità mediante Pilodyn.....	78

Capitolo 4 - Cause della variazione del Modulo Elastico.....

4.1 CAUSE DELLA VARIAZIONE DEL MODULO ELASTICO LOCALE	83
4.2 CAUSE DELLA VARIAZIONE DEL MODULO ELASTICO GLOBALE.....	87
4.2.1 Effetto dell'inclinazione della fibratura sulla variazione di $E_{m,g}$	90
4.3 DETERMINAZIONE DELLA PROFONDITÀ DI TAGLIO CRITICA.....	92

Capitolo 5 - Metodologia per la stima del Modulo Elastico e la previsione delle sue variazioni	95
5.1 L'IMPIEGO DELLE PROVE NON DISTRUTTIVE PER LA PREVISIONE DELLE VARIAZIONI DI E IN OPERA.....	95
5.2 PREVISIONE DELLA VARIAZIONE DI E MEDIANTE IL RILIEVO DELLE CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI.....	96
 Capitolo 6 - Conclusioni	101
 Allegati	105
Allegato A: Classificazione secondo la resistenza (UNI 11119:2004).....	105
Allegato B: prove statiche	106
Allegato C: prove dinamiche.....	110
Allegato D : parametri per il calcolo di G	122
Allegato E: simboli.....	124
 Bibliografia	125

Capitolo 1

Introduzione

Il concetto di “beni culturali” ha subito una rapida evoluzione negli ultimi cent’anni, di pari passo alla crescente sensibilità delle popolazioni. La “Carta di Atene” prima (1931) e la “Carta di Venezia” poi (1964) introdussero concetti destinati a stravolgere la concezione di “monumenti e siti storici” e i principi per la loro conservazione. Secondo la “Carta di Venezia” siti e monumenti non vanno conservati solo in base alle proprietà estetiche ma anche in base al loro valore storico. Tuttavia, già dopo una decina d’anni le prime critiche venivano mosse alla “Carta di Venezia” (Erder, 1981) e ne veniva richiesta una profonda revisione. Ancora oggi, sebbene diverse definizioni di beni culturali siano state date (ICOMOS, 1999; UNESCO, 2001; Fioravanti, 2011), includendo il concetto di identità storico-sociale di una comunità, i principi riassunti all’interno della “Carta di Venezia” restano immutati. Basandosi su tali idee le strutture lignee antiche entrano a far parte a pieno titolo del patrimonio culturale mondiale, come testimonianza dei materiali e delle tecniche costruttive, nonché delle conoscenze architettoniche, ingegneristiche, tecnologiche e selvicolturali del passato.

Di qui la necessità di conservare tali strutture, compatibilmente con l’esigenza di mantenerle efficienti e sicure dal punto di vista strutturale. Gli edifici infatti, anche quelli di rilevanza storica, devono continuare, quando possibile, a svolgere le funzioni per cui sono stati progettati e costruiti. A tal fine, nel tempo, le strutture sono state oggetto di interventi di recupero e/o rinforzo. Le tecniche impiegate hanno subito un’evoluzione rapida soprattutto a partire dal secolo scorso, quando l’impiego di nuovi materiali, per l’esecuzione degli interventi di rinforzo, si è andato diffondendo, interessando prima i materiali nuovi e poi anche gli elementi lignei antichi. Dall’osservazione degli effetti di alcuni di questi interventi, realizzati in opera su elementi lignei antichi, sono emersi alcuni dubbi circa la loro efficacia, in funzione delle caratteristiche originali dell’elemento rinforzato.

Ma quali edifici possono veramente essere considerati antichi e di valore storico? La risposta alla domanda è sicuramente complessa. Senza voler addentrarsi nella articolata normativa vigente basta ricordare che il “Codice dei beni culturali e dell'ambiente - Parte II - Beni culturali” del 2004 riporta all’art. 10 che sono considerati beni culturali “ *le cose immobili e mobili che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico particolarmente importante....*”. Non è difficile immaginare quale numero impressionante di strutture lignee possano entrare a far parte di tale definizione. Ma il numero sarebbe ancor più alto se molte di loro non fossero andate perse in passato a causa di alcune convinzioni tanto diffuse, quanto infondate, riguardo le strutture lignee. Era opinione diffusa che il legno invecchiando andasse incontro ad un naturale degradamento delle proprietà di resistenza meccanica o che, essendo infiammabile, fosse poco sicuro e quindi da sostituire a favore di altri materiali non combustibili. Al contrario innumerevoli esempi di strutture lignee sono arrivate fino ai giorni nostri, in varie parti del mondo, dimostrando la loro capacità di sopravvivere nel tempo, come la Sakyamuni Pagoda costruita nel 1056 o le tante strutture lignee presenti in Italia risalenti al periodo rinascimentale.

1.1 STUDIO BIBLIOGRAFICO

1.1.1 Approccio alle strutture antiche

Diverse ricerche hanno dimostrato come non esista differenza tra le caratteristiche meccaniche del legno nuovo rispetto a quello antico: Attar-Hassan (1976), Kuipers (1986), Ehlbeck e Görlacher (1990), Rug e Seeman (1991), Togni (1995). Di recente Yokoyama *et al.* (2009) ha ottenuto risultati interessanti confrontando le proprietà meccaniche di provini di legno sottoposti a trattamenti di invecchiamento, ottenendo differenze di resistenza meccanica solo in direzione perpendicolare alla fibratura, direzione in cui il legno presenta le peggiori prestazioni. Nonostante questo ancora oggi alcuni ricercatori si occupano di legno studiandolo da un punto di vista obsoleto, ad es. Marzo (2006) considera attendibile ridurre del 25% le proprietà meccaniche del legno antico, solo perché antico.

I problemi del recupero e della conservazione delle strutture lignee procedono di pari passo e, tutt’oggi, le due tematiche sono ancora discusse e dibattute, mentre sempre nuovi materiali e tecniche vengono proposte e studiate. Il “Wood Committee”

dell'“International Council on Monuments and Sites” (ICOMOS) ha ratificato nel 1999 un documento dal titolo “The Principles for the Historic Timber Structures Preservation” che contiene una serie di principi, ormai universalmente accettati, per la conservazione delle strutture lignee antiche. Tra le indicazioni più importanti il testo riporta come per una corretta valutazione e conservazione di una struttura sia necessario un approccio multidisciplinare, che l'originalità della struttura deve essere conservata nel migliore dei modi, l'adozione delle tecniche tradizionali deve, quando possibile, essere preferita alle moderne tecniche; una accurata diagnosi delle condizioni della struttura e delle eventuali cause di deterioramento ed instabilità devono precedere ogni tipo di intervento; l'impiego di nuove tecniche e materiali è possibile solo se accuratamente testati in precedenza; gli interventi devono essere il più possibile limitati al fine di preservare l'autenticità della struttura.

Le indicazioni riportate dal testo pubblicato dall'ICOMOS sono comunemente accettate tanto da essere riprese, in gran parte, anche da norme nazionali; ne è un esempio la UNI 11138:2004 – *“Beni culturali - Manufatti lignei Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi”* che specifica i criteri da seguire per la valutazione, l'elaborazione dei progetti e l'eventuale esecuzione di interventi volti alla conservazione, manutenzione e restauro di manufatti lignei costituenti elementi portanti di edifici pertinenti i beni culturali.

Tra le indicazioni più importanti la necessità di eseguire un'attenta valutazione preventiva, che consiste in un'analisi storica, una caratterizzazione del materiale (in accordo con la UNI 11119:2004), nell'esecuzione di un preciso rilievo geometrico, del degrado e nell'esecuzione di un'analisi statica degli elementi strutturali. Solo una volta completata questa prima fase sarà possibile, se necessario, pianificare un intervento a carico della struttura. La norma specifica inoltre che gli interventi devono essere eseguiti limitando al massimo l'uso di materiali e tecniche diverse da quelle originali, nell'ottica di mantenere quanto più possibile la struttura come in origine. Deve inoltre essere predisposto un adeguato piano di manutenzione e ispezione della struttura, al fine di valutare gli effetti degli interventi eseguiti e per monitorare nel tempo lo stato di conservazione della stessa.

1.1.2 Restauro di elementi lignei antichi

Gli interventi realizzabili su singoli elementi lignei sono raggruppabili in quattro categorie (da Ross, 2002; modificato):

1. Sostituzione: consiste nel rimuovere completamente una parte, o l'intero elemento ligneo, non più in grado di svolgere la propria funzione strutturale (Figura 1.1a).
2. Rinforzo: interventi svolti a migliorare le caratteristiche di resistenza meccanica degli elementi lignei (Figura 1.1b).
3. Ripristino della continuità strutturale: è un intervento accessorio ai primi due eseguito con lo scopo di garantire la continuità tra gli elementi lignei in seguito ad operazioni di sostituzione/integrazione (Figura 1.1c).
4. Integrazione: sono quelle operazioni localizzate, condotte su parti di legno mancanti, danneggiate o degradate, al fine di riportare l'elemento alle sue dimensioni originarie, le quali possono avere anche funzione di ripristino della resistenza meccanica (Figura 1.1d).

La sostituzione di un elemento ligneo o di una sua parte, in accordo con i principi precedentemente citati, è da considerarsi come soluzione estrema, da utilizzare solo quando l'elemento risulta talmente compromesso da non poter essere recuperato in altro modo. Gli altri tipi di interventi possono essere realizzati in modo diverso pur implicando in un numero vastissimo di casi l'asportazione di una parte di legno, anche sano, per poter inserire elementi di rinforzo, di collegamento o per ripristinare la sezione originale.

Gli interventi di rinforzo sono tra quelli eseguiti con maggior frequenza e trovano giustificazione in diversi casi:

- Quando la struttura non soddisfa i requisiti di esercizio (Stati Limite di Esercizio) mostrando un'eccessiva inflessione degli elementi o eccessiva vibrazione degli stessi sottoposti a sollecitazione (come il semplice calpestio). Ne risulta influenzata l'estetica della struttura, la possibilità di utilizzo della stessa e si origina un senso di disagio nelle persone che la frequentano.
- Necessità di adattare la struttura alle vigenti norme di sicurezza.
- Quando viene pianificato un incremento dei carichi agenti sulla struttura, non più compatibile con la capacità portante della stessa.

- Quanto l'intera struttura, o singole parti, risultano danneggiate.

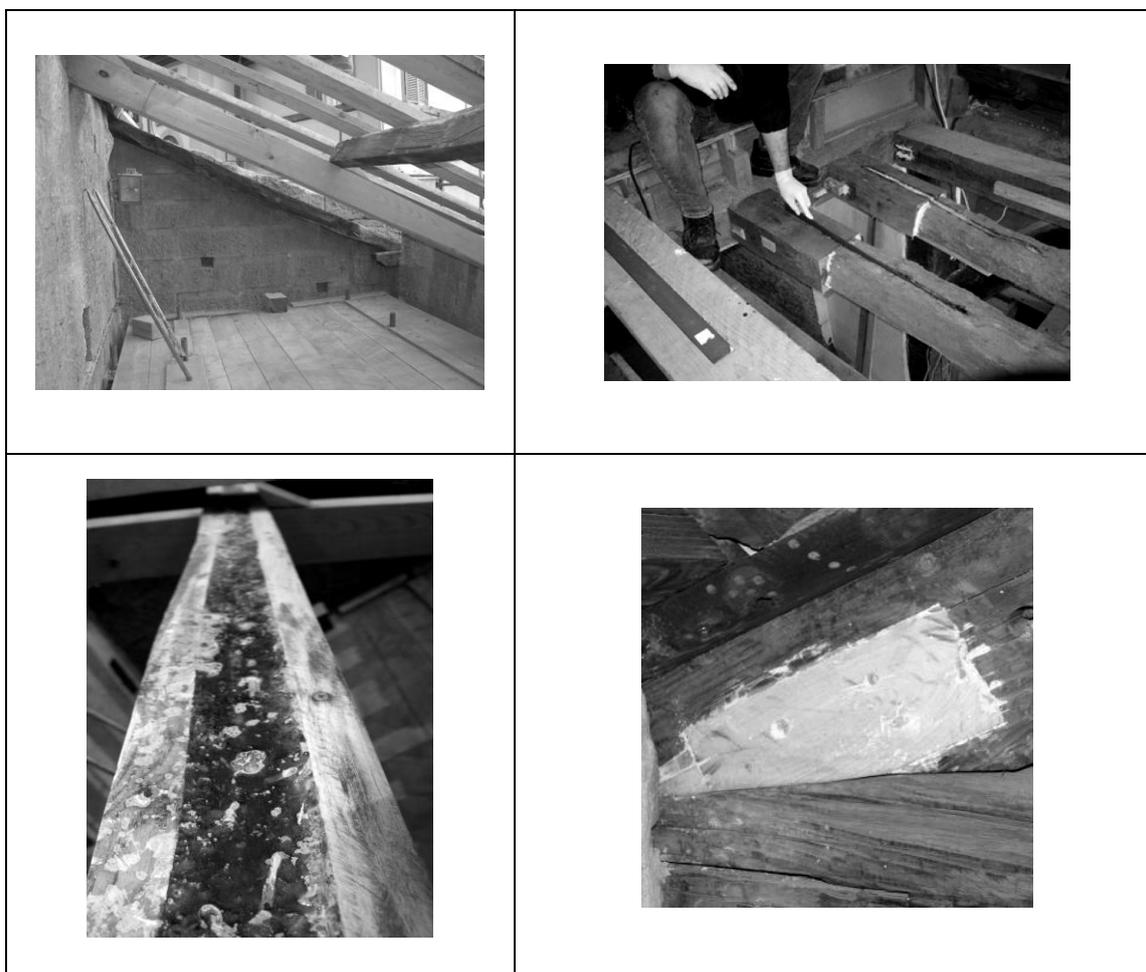


Figura 1.1 – Tipologie di intervento su elementi lignei antichi realizzati in epoca recente. Sostituzione di un elemento ligneo con uno nuovo (alto a sinistra). Ripristino della continuità strutturale realizzato mediante l'inserimento di barre incollate tra legno originario e protesi (alto a destra) (da Rotafix, 2011). Rinforzo di un elemento ligneo mediante l'inserimento di barre in GFRP incollate con resina epossidica (basso a sinistra). Integrazione di una parte mancante con legno nuovo (basso a destra).

1.1.2.1 Consolidamento tramite l'inserimento di elementi di rinforzo

Analizzando i soli interventi di rinforzo a carico di elementi in legno massiccio, senza pretendere di passare in rassegna tutti le possibili soluzioni realizzate e studiate nel tempo, si può notare come molti di essi siano realizzati mediante l'inserimento di elementi di rinforzo in tagli eseguiti nel legno.

Il numero di tagli realizzati può essere diverso, così come la loro posizione (Fig. 1.2) ed i materiali impiegati (barre, piastre o lamine in acciaio, materiali fibrorinforzati o anche pannelli di legno). Il principio alla base di questa modalità di intervento consiste nella possibilità di combinare materiali diversi, sfruttando le diverse proprietà meccaniche

(legno originale e materiale di rinforzo), per ottenere un nuovo elemento (un vero e proprio elemento composito), dalle proprietà meccaniche complessive migliorate. L'unione tra i diversi materiali sarebbe garantita da incollaggi effettuati con resine strutturali (normalmente di tipo epossidico). I vantaggi di tali tecniche sarebbero, a detta dei proponenti, diversi (Tampone 1996, Rotafix 2011):

1. rispetto della concezione originaria della struttura;
2. ridotta invasività dell'intervento combinata alla percepibilità dello stesso;
3. sfruttamento delle proprietà meccaniche residue del legno;
4. accoppiamento dei materiali in senso longitudinale al legno; direzione che offre il minor ritiro specifico per il legno;
5. indistruttibilità dell'elemento rinforzato;
6. facilità di montaggio;
7. intervento supportato in molti casi da calcoli implementati nel codice attualmente in vigore;
8. protezione dei materiali di rinforzo offerta dal legno stesso.

Stumes (1975) prima e più tardi ICOMOS (1999) e Piazza e Riggio (2007) hanno evidenziato come non sia accettabile, per strutture lignee antiche, il rischio di adottare tecniche di rinforzo che non siano state adeguatamente testate. Diversi lavori di ricerca in merito a tecniche specifiche di rinforzo sono state condotti a partire dagli anni '80. Tampone *et al.* (1989) testò a flessione statica 5 travi antiche di abete bianco rinforzate tramite l'inserimento di lamine d'acciaio all'intradosso. Gentile *et al.* (1999) e Gentile (2000) hanno riportato i risultati di test eseguiti su 26 provini ottenuti a partire da materiale nuovo e vecchio, rinforzati tramite inserimento di barre in fibre di vetro (GFRP) di 5 mm di diametro. Borri *et al.* (2003) hanno pubblicato i risultati di prove, eseguite inserendo all'intradosso di 5 travi, 1 o 2 barre in fibra di carbonio (CFRP). Schober e Rautenstrauch (2005) hanno pubblicato gli effetti del rinforzo eseguito con inserimento di lamine in CFRP all'intradosso di 4 elementi lignei antichi. Duarte *et al.* (2008) hanno testato a flessione 9 elementi di legno nuovo rinforzati tramite l'inserimento di barre in GFRP. Alam *et al.* (2009) hanno invece confrontato l'effetto di rinforzi eseguiti con la stessa tecnica ma con materiali diversi (barre in Fulcrum, acciaio, GFRP e CFRP) testando a flessione 36 elementi lignei nuovi. Jankowski *et al.* (2010) hanno provato a flessione 12 travi antiche rinforzate con lamine in CFRP

adottando diversi schemi di rinforzo. Yusof e Saleh (2010) hanno testato 12 provini di Meranti (*Shorea macrobalanos*) rinforzate mediante 1 o 2 barre in GFRP di diverso diametro inserite all'intradosso.

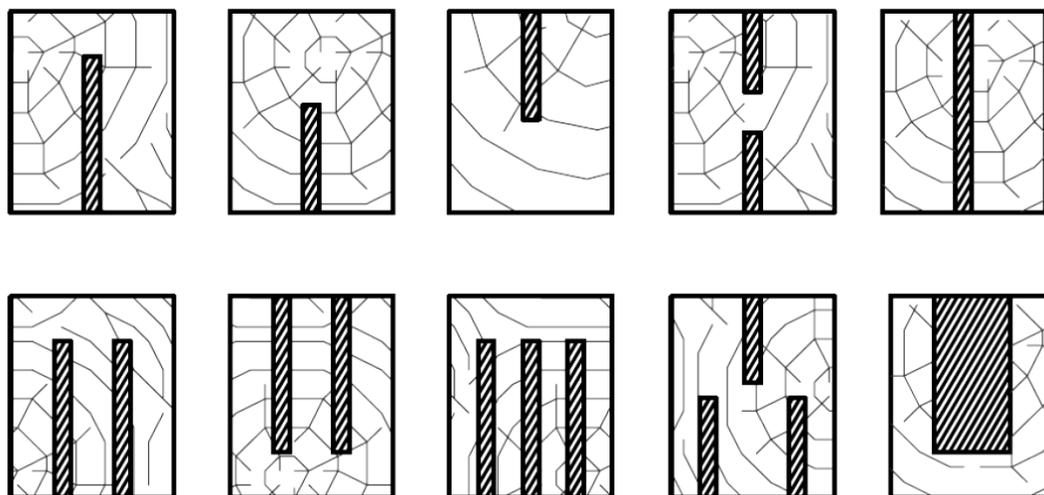


Figura 1.2 – Diverse soluzioni di intervento realizzate tramite l'inserimento di materiali di rinforzo all'interno del legno.

Tutti gli interventi oggetto delle ricerche citate hanno lo scopo di migliorare le proprietà meccaniche dell'elemento strutturale nei confronti della sollecitazione a flessione in termine di rigidezza e di capacità di sostenere carichi. La flessione è generalmente la più importante tra le sollecitazioni, in quanto la più limitante, per gli elementi lignei in opera.

In linea generale, i risultati riportati dai vari ricercatori dimostrano come tali tipi di rinforzo permettano di ottenere un miglioramento delle proprietà meccaniche a flessione (Modulo Elastico E , e Modulo di Rottura a flessione f_m^1). Tali risultati sono spiegati dagli elevati valori di resistenza meccanica propri degli elementi di rinforzo (Grafico 1.1), specie se paragonati a quelli del legno. Tuttavia risultati anche molto diversi sono stati ottenuti, evidenziando che non solo il tipo di materiale utilizzato ha un effetto sull'efficacia del rinforzo, ma anche la quantità di materiale usata nell'intervento e la posizione in cui gli elementi di rinforzo sono stati inseriti.

Tampone *et al.* (1989) riportano un aumento massimo di E fino al 40% per travi provate a flessione statica a 3 punti. Gentile *et al.* (1999), a seconda del tipo di rinforzo adottato,

¹ Per tutti i simboli utilizzati si rimanda all'allegato E in fondo al testo.

hanno registrato incrementi di f_m variabili tra il 25% e il 50%. Borri *et al.* (2003) per elementi lignei rinforzati mediante l'inserimento di barre in CFRP hanno ottenuto incrementi medi di E pari al 26%, e una capacità da parte degli elementi lignei di sopportare carichi mediamente superiori di circa il 40%, rispetto a elementi non rinforzati. Schober e Rautenstrauch (2005) riportano aumenti medi di E e f_m rispettivamente del 4% e 8%. Duarte *et al.* (2008) hanno invece registrato una riduzione in f_m fino al 52% rispetto ai valori di elementi non rinforzati. Alam *et al.* (2009) hanno ottenuto valori di f_m estremamente variabili (da - 93% a + 194%) a seconda del tipo di intervento e della metodologia impiegata per valutarne l'efficacia. Jankowski *et al.* (2010) hanno registrato un aumento di f_m tra il 21% ed il 79% a seconda del tipo di rinforzo adottato. Yusof e Saleh (2010) riportano valori di incremento di E fino al 60% e una capacità di sopportare carichi maggiore del 30% per elementi lignei rinforzati.

1.1.2.2 Limiti dei lavori di ricerca

Se da una parte i valori riportati nelle varie pubblicazioni fanno intuire quanto efficaci possono risultare tali tipi di rinforzo, dall'altra, la grande variabilità dei risultati, costringe ad alcune riflessioni sull'attendibilità delle soluzioni adottate, e sulla possibilità di estendere le tecniche di rinforzo investigate a tutte le situazioni pratiche. Alcune ricerche presentano importanti limiti e le tecniche proposte non possono sempre essere trasferite alla realtà delle strutture lignee antiche: prove condotte su un basso numero di provini (Tampone *et al.* 1989, Borri *et al.* 2003, Schober e Rautenstrauch 2005) o impiegando provini di piccole dimensioni, il cui comportamento può differire notevolmente se paragonato al materiale in dimensioni d'uso (Duarte *et al.* 2008, Alam *et al.* 2009, Yusof e Saleh 2010). Alcune ricerche hanno impiegato legno nuovo (Borri *et al.* 2003, Duarte *et al.* 2008, Alam *et al.* 2009, Yusof e Saleh 2010) che, come tale, è stato sottoposto ad una selezione sulla base della qualità, risultando quindi più omogeneo rispetto agli elementi lignei antichi. In altri casi ancora i risultati sono stati ottenuti confrontando i valori registrati per gli elementi rinforzati, con quelli ottenuti a partire da un numero basso di elementi testimone non rinforzati: Yusof e Saleh (2010) hanno utilizzato un solo testimone non rinforzato mentre Borri *et al.* (2003) hanno testato 3 testimoni con caratteristiche molto diverse (carico ultimo di rottura rispettivamente di 51.1 kN, 69.4 kN e 96.4 kN). Operando in tal modo i risultati ottenuti

sono legati alle caratteristiche di pochi elementi non rinforzati e, considerando la naturale variabilità del legno, risultano avere una bassa valenza statistica. I risultati quindi sarebbero da considerare solo come indicativi del comportamento degli elementi lignei rinforzati ed ogni generalizzazione sarebbe da considerare attentamente.

1.1.3 L'efficacia degli interventi di rinforzo

L'interpretazione dei risultati riportati nelle varie ricerche è reso difficile non solo per i limiti elencati nel paragrafo precedente, ma anche perché i risultati possono essere determinati applicando tecniche diverse.

L'aggiunta agli elementi lignei di materiali di rinforzo trasforma i primi in nuovi elementi, caratterizzati da maggior rigidità e capacità di sopportare carichi più elevati. L'efficacia pratica di tali interventi è quindi generalmente riconosciuta, per quanto riguarda l'aspetto relativo le prestazioni meccaniche. La effettiva capacità di questi interventi di migliorare le caratteristiche meccaniche, rispetto a quelle del legno originario, non viene però sempre considerata nel determinare la reale efficienza degli interventi di rinforzo. Gli elementi lignei rinforzati diventano nuovi elementi non più costituiti da solo legno, ma dei veri e propri elementi compositi. Come tali possono essere considerati applicando le specifiche tecniche. Alam *et al.* (2009) presentano i dati di resistenza a flessione ottenuti su 36 elementi lignei rinforzati, valutandoli in due modi differenti: considerando la sezione dell'elemento ligneo originario e la stessa modificata applicando il "Transformed Section Method" (Gere e Goodno, 2009). Tale metodo, spiegato nel seguito, è stato usato da diversi ricercatori per valutare l'efficacia di tecniche di rinforzo di elementi lignei (Belpiero e Grad 1999, John e Lacroix 2000, Fiorelli e Dias 2003, Dagher e Lindyberg 2004, Hansson e Karlsson 2007, Alam *et al.* 2009) ed è comunemente applicata in campo ingegneristico per lo studio dei materiali compositi.

Le proprietà meccaniche determinate mediante prove a flessione vengono calcolate tenendo conto delle proprietà della sezione resistente, e sono valide a patto che il materiale sia omogeneo ed E sia costante. Nel caso di elementi compositi tali condizioni non sono verificate, e la teoria della flessione non è direttamente applicabile. Per poter ovviare al problema si può applicare il "Transformed Section Method" (TSM) che consiste nel trasformare la sezione nominale in una equivalente (Figura 1.3), formata da

uno solo dei materiali presenti. Per fare ciò le dimensioni della sezione vengono scalate sulla base del rapporto tra il valore di E dei diversi materiali (equazione 1), e usato poi per determinare le dimensioni della nuova sezione.

$$n = \frac{E_2}{E_1} \quad (1)$$

E_1 =Modulo elastico del materiale 1 ; E_2 =Modulo Elastico del materiale 2

Autori	sezione dei provini rinforzati (mm²)	numero di provini testati	materiali di rinforzo utilizzati	materiale rinforzato
Tampone et al. (1989)	180X240-270X290	4	lamine acciaio	legno antico
Gentile (2000)	100X300/200X600	26	barre GFRP	Legno nuovo e antico
Borri et al (2003)	200X200	5	barre CFRP	legno nuovo
Schober e Rautenstrauch (2005)	150X180-150X210	4	lamine CFRP	legno antico (età > 100 anni)
Duarte et al (2008)	75X125	9	barre GFRP	legno nuovo
Alam et al. (2009)	93X96	36	barre in CFRP, GFRP, FULCRUM, MILD STEEL	legno nuovo
Jankowski et al (2010)	120X220	12	lamine CFRP	legno antico (età > 100 anni)
Yusof e Saleh (2010)	50X50	11	barre GFRP	legno nuovo

Tabella 1.1- Principali ricerche pubblicate sul rinforzo di elementi lignei.

Una volta eseguita la trasformazione i calcoli vengono eseguiti utilizzando la nuova sezione virtuale, che è omogenea e con E costante, poiché costituita da un solo materiale. La corretta conoscenza dei valori di E dei materiali è fondamentale per la precisa determinazione della sezione trasformata e per la correttezza dei calcoli.

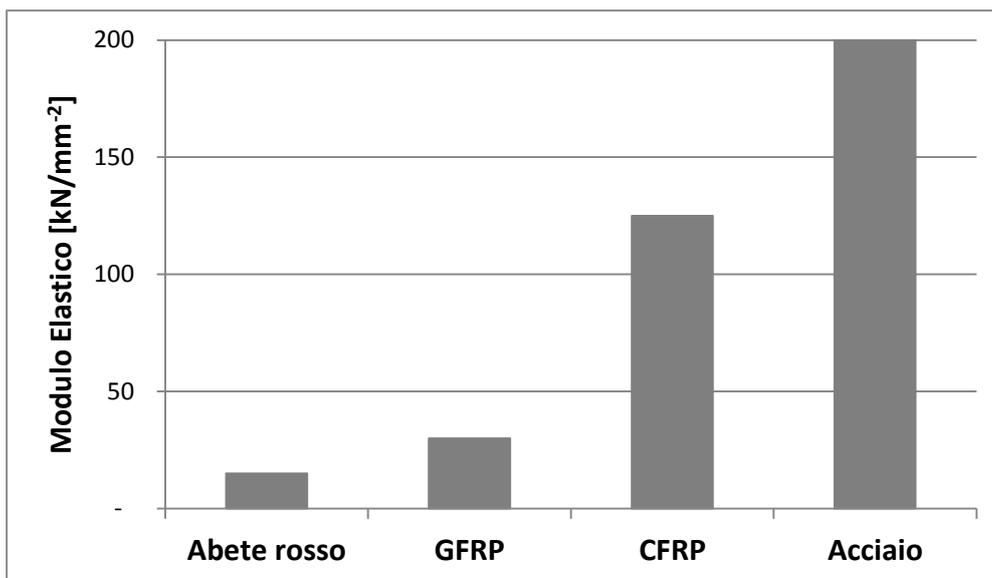


Grafico 1.1 – Valori di Modulo Elastico (E) per differenti materiali (da Steiger, 2003, modificato).

Un valore errato di E del legno determina una variazione di n , cui corrisponde una sezione trasformata diversa.

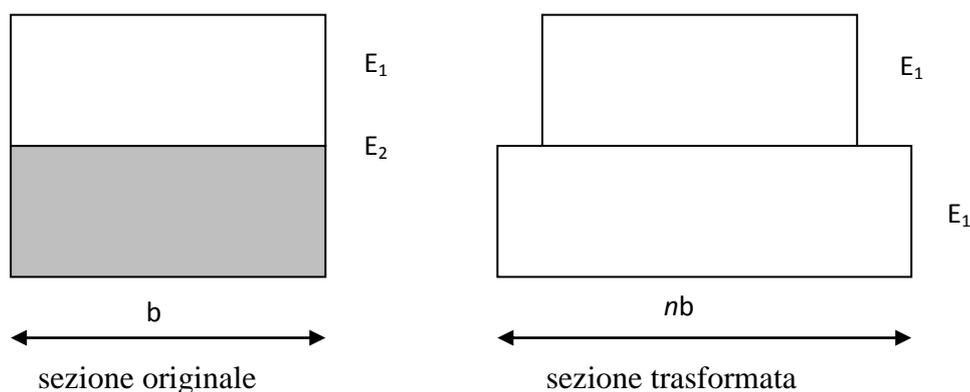


Figura 1.3 – Transformed Section Method. Sezione originale composta da due materiali (a sinistra, con $E_2 > E_1$); sezione equivalente formata da un solo materiale dopo la trasformazione (a destra).

Una volta eseguita la trasformazione i calcoli vengono eseguiti utilizzando la nuova sezione, che è omogenea e con E costante, poiché costituita da un solo materiale. La corretta conoscenza dei valori di E dei materiali è fondamentale per la precisa determinazione della sezione trasformata e per la correttezza dei calcoli. Un valore errato di E del legno determina una variazione di n , cui corrisponde una sezione trasformata diversa. Confrontando i risultati riportati da Alam *et al.* (2009) emergono differenze anche molto elevate e risultati a volte opposti, a seconda del metodo di calcolo utilizzato. Tale divario risulta molto elevato, soprattutto per gli interventi di

rinforzo eseguiti aggiungendo frazioni importanti di materiali ad elevate prestazioni meccaniche. Confrontando i dati riportati nella Figura 1.4 si nota come, per certi elementi lignei, siano stati ottenuti risultati di resistenza a flessione opposti, in funzione del metodo di calcolo impiegato (ad es. da +29% a -21%; da +39% a -8%; da +33% a -11%).

1.1.4 L'importanza del Modulo elastico negli interventi di rinforzo

Kasal e Anthony (2004) evidenziano come gli elementi lignei antichi non possano essere valutati alla stregua di quelli nuovi, e scartare un elemento ligneo che svolge la sua funzione in opera, magari da diversi secoli, appare come un'operazione di scarso senso pratico. Il concetto sostenuto è che il tempo stesso, qualora si considerino i tempi lunghi propri delle strutture lignee antiche, abbia testato i singoli elementi all'interno della struttura.

Se ad esempio una trave continua a svolgere la sua funzione dopo secoli di servizio, rimanendo inalterate le condizioni di sollecitazione in cui si trova ed il suo stato di conservazione, non si vede perché non dovrebbe continuare a farlo anche nel futuro: la struttura stessa indica quali elementi sono stati in grado di reggere le sollecitazioni nel tempo.

Un discorso differente riguarda la necessità di avere elementi lignei più rigidi, in modo da ridurre le frecce di inflessione, le vibrazioni dei solai e di rendere più facilmente fruibili e confortevoli certe strutture. Proprio la necessità di aumentare la rigidità dei singoli elementi lignei giustifica la maggior parte degli interventi di rinforzo.

Il concetto di minimo intervento, riconosciuto come principio imprescindibile ai fini della conservazione, ma non sempre applicato nella realtà, impone che gli interventi di rinforzo debbano essere eseguiti tenendo conto anche delle proprietà meccaniche degli elementi lignei non rinforzati. Tampone (1989) afferma che tra i vantaggi offerti da rinforzi eseguiti inserendo lamine di acciaio nel legno, vi è proprio la possibilità di sfruttare le proprietà meccaniche dell'elemento rinforzato; salvando così la maggior parte possibile di materiale originale. In tale ottica la conoscenza della rigidità, e quindi il valore di E di un elemento ligneo, assume un valore fondamentale nella pianificazione dell'intervento ai fini della conservazione.

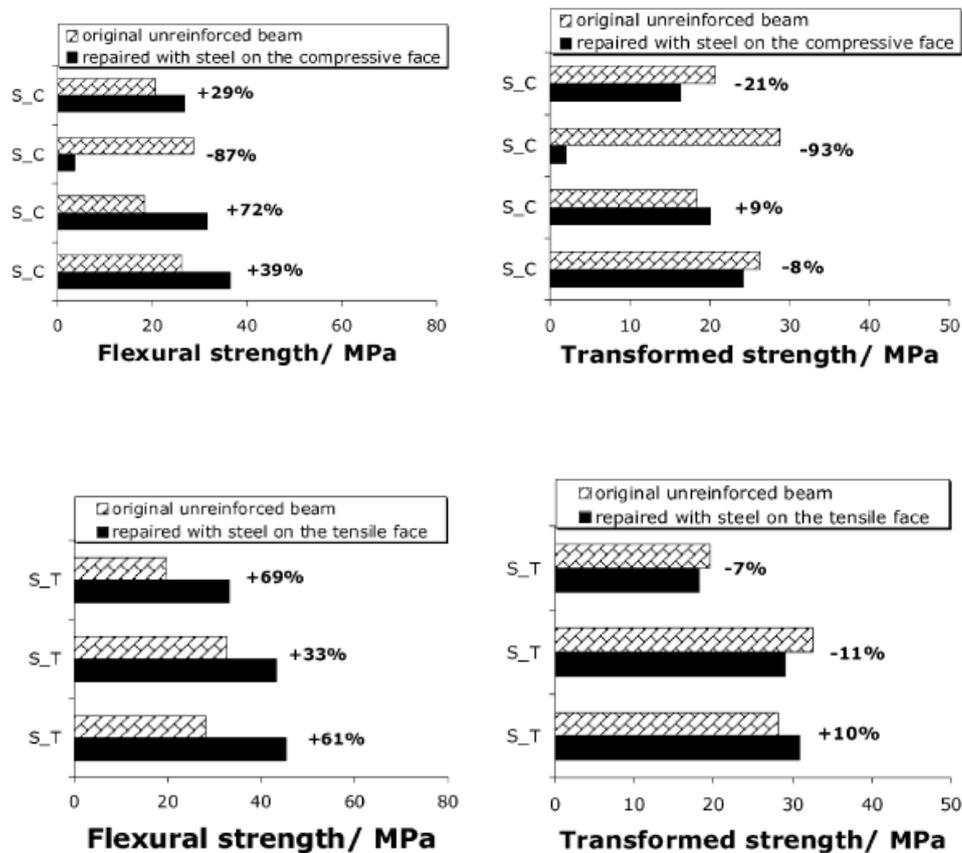


Figura. 1.4 – Variazione percentuale di f_m per elementi lignei rinforzati con diverse tecniche: a sinistra risultati ottenuti considerando la sezione nominale, a destra considerando la sezione trasformata (da Alam *et al.*, 2009).

1.1.4.1 Cause di variazione del Modulo Elastico

Sulla base delle considerazioni del paragrafo precedente ogni variazione di E a carico del legno, andrebbe considerata con attenzione. Un approccio prettamente ingegneristico considera E come una proprietà del materiale e, come tale, invariabile. In realtà il valore di E per il legno è strettamente legato alle caratteristiche dello stesso, e non necessariamente costante in ogni punto di un elemento. Ogni variazione rispetto alle condizioni iniziali determina una potenziale variazione di E per singolo elemento. Se ad esempio si determina il valore di E di un elemento ligneo, lo si divide in due parti, e si determina nuovamente il valore di E per i singoli pezzi, i due valori potrebbero essere anche molto diversi tra loro, e differenti dal valore ottenuto inizialmente. Questo perché E è influenzato in modo diverso da fattori (difetti) che sono distribuiti casualmente all'interno del legno, nonché da proprietà (come la densità) che possono variare anche significativamente tra punti diversi dello stesso elemento. Ai quali

bisogna aggiungere l'influenza delle caratteristiche macroscopiche del legno (ortotropia, andamento degli anelli di accrescimento ecc.), anch'esse variabili di punto in punto nell'elemento ligneo e dipendenti dal tipo di assortimento (elementi con midollo centrale, fuori midollo ecc.).

Il fenomeno è ben conosciuto ed è dovuto alla grande variabilità ed alla inomogeneità del materiale stesso tanto che, anche sottoponendo a prova provini piccoli e netti, cioè privi di difetti, ottenuti a partire dallo stesso segato, si possono ottenere valori di E con coefficiente di variabilità fino al 23% (ASTM, 2002; Hanhijärvi *et al.* 2005).

Allo stesso modo, rispetto al modulo elastico del legno grezzo, tondo, tutte le lavorazioni meccaniche longitudinali hanno un effetto sull' E della materia prima legno. La semplice squadratura dei tronchi, la segagione, l'esecuzione di tagli eseguiti lungo l'asse degli elementi lignei hanno un effetto sulle proprietà meccaniche: Ranta-Maunus (1999) ha provato a flessione segati e tondame trovando valori di E e f_m superiori, e minore variabilità, per i secondi, imputando tali differenze proprio ai tagli ed alla minor efficacia, dei segati, nel trasferire carichi lungo le fibre, che risultano interrotte in più punti. Wolfe e Murphy (2005) ed Arriaga *et al.* (2007) hanno ottenuto risultati paragonabili ai precedenti, imputandoli all'interruzione della continuità della fibratura lungo l'asse longitudinale dell'elemento, ed al taglio delle fibre intorno ai nodi. Il taglio delle fibre nelle zone in prossimità dei nodi determinerebbe una minor capacità di sopportare sollecitazioni proprio in prossimità dei difetti, con conseguente influenza su E oltre che su f_m .

Nello specifico Arriaga *et al.* (2007) hanno paragonato i valori ottenuti da prove condotte su segati a spigolo vivo con quelli ottenuti da segati con smussi, registrando differenze di E prossime al 30% a favore dei secondi. Inoltre l'esecuzione di un taglio divide un elemento ligneo in due parti, che possono essere considerate come distinte, almeno per tutta la profondità del taglio stesso. In questo modo le dimensioni delle facce del segato su cui appaiono i tagli cambiano, ed eventuali difetti presenti, potrebbero assumere peso diverso, a seconda della loro posizione ed estensione, determinando anche uno scadimento della qualità del legno a carico di una, o di entrambe le parti separate dal taglio (cfr. 3.1.1). La diminuzione della qualità del materiale corrisponde ad una riduzione delle sue proprietà meccaniche. Nel caso questo accada, la più debole delle porzioni, soprattutto per tagli profondi, potrebbe influenzare

maggiormente il comportamento dell'elemento sollecitato a flessione: all'aumentare del carico la più debole delle due, tenderebbe ad inflettersi e la maggior parte del carico a passare alla porzione più rigida che, sottoposta ad una sollecitazione molto elevata, si infletterebbe notevolmente finché il carico non viene nuovamente ridistribuito tra le due parti.

Il rischio è che per certi elementi lignei, con particolari caratteristiche, l'esecuzione di tagli possa determinare una diminuzione di E rispetto ai valori iniziali. L'impiego dei valori originali di E , in fase di verifica dei risultati o per progettare gli interventi di consolidamento, potrebbe portare a commettere errori consistenti: in particolare taluni interventi potrebbero risultare sottodimensionati, generando risultati opposti a quelli ricercati. Anche l'applicazione del TSM per determinare l'efficacia dei rinforzi risentirebbe di variazioni del valore di E , poiché su tale valore si basa la determinazione della sezione trasformata, che sta alla base della calcolo delle proprietà meccaniche.

1.2 OBIETTIVI DELLA RICERCA

Lo scopo della ricerca è stabilire il legame esistente tra la variazione di E , le caratteristiche proprie e i difetti di antichi elementi portanti lignei sottoposti a intagli.

Gli obiettivi sostanziali sono:

- la determinazione della variazione di E dovuta all'esecuzione di tagli lungo l'asse longitudinale delle travi,
- lo studio della relazione esistente tra tale variazione e tutte le caratteristiche misurabili degli elementi lignei, individuando i principi che ne determinano le modificazioni,
- la messa a punto di una metodologia per la previsione della variazione di E , a seguito di intagli, sulla base dei dati sperimentali acquisiti.

L'idea di fondo, motivata dallo studio bibliografico, di verificare se tali tagli influenzino il valore di E (al netto della perdita del materiale a seguito dell'intaglio), quantificandone l'effetto, in funzione delle caratteristiche originarie del legno e della profondità delle incisioni, ha come fine ulteriore la produzione di informazioni originali, utili a coloro che progettano interventi di rinforzo.

I risultati possono assumere una valenza più ampia, estendibile a tutte quelle operazioni che determinano asportazione di materiale dall'elemento ligneo.

Infine, nella realizzazione dello studio, viene verificata l'applicabilità di metodi non distruttivi nella previsione dei valori di E e delle sue variazioni, anche dopo la realizzazione dei tagli, al fine di sviluppare una metodologia di indagine da applicare in opera (o a piè d'opera), per stimare le variazioni di comportamento meccanico di travi predisposte per la realizzazione degli interventi di rinforzo precedentemente descritti, che possa coniugare la buona stima dei valori con semplicità e rapidità di esecuzione.

Capitolo 2

Materiali e metodi

2.1 GLI ELEMENTI LIGNEI UTILIZZATI

Per la ricerca sono stati impiegati 13 elementi lignei antichi di abete bianco (*Abies alba*, Mill.) provenienti da diversi edifici, oggetto di cantieri di restauro, dell'area fiorentina. Tutti gli elementi sono stati identificati attraverso riconoscimento microscopico condotto tramite prelievo di campioni di piccole dimensioni.

Nessuna analisi specifica è stata condotta per stabilire la reale età degli elementi, tuttavia, in base alla provenienza, alle tracce accumulate nel tempo ed alle lavorazioni, di tipo arcaico, che appaiono sulle superfici, tutti gli elementi possono essere considerati travi di solaio più vecchie di 50 anni, e come tali rientrare nella “categoria” antichi (D.L. 22 Gennaio, 2004, n° 42); alcuni probabilmente hanno alcuni secoli.

L'abete bianco è stato ampiamente impiegato, fin dal passato, come materiale da costruzione nella Piana di Firenze e nelle aree limitrofe, grazie all'elevata disponibilità di materiale nelle zone appenniniche circostanti.

Gli elementi sono sempre stati conservati in una stessa catasta in ambiente coperto all'esterno, per otto anni, per essere poi spostati all'interno dei laboratori di prova, dove sono rimasti per un anno prima dell'inizio delle prove. I 13 elementi sono stati scelti di dimensioni diverse sia per sezione sia per lunghezza (Tabella 2.1); tale eterogeneità risulta utile nel determinare l'effetto dei tagli su elementi lignei di dimensioni differenti.

2.2 CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI LIGNEI

2.2.1 Rilievo delle dimensioni

La sezione nominale di ogni elemento è stata determinata come valore medio di 4 misurazioni eseguite mediante cavalletto dendrometrico, in corrispondenza delle estremità e ad un terzo e due terzi della lunghezza. La lunghezza di ogni elemento è invece stata misurata mediante cordella metrica.

<i>Trave n°</i>	<i>sezione nominale (mm²)</i>	<i>lunghezza (mm)</i>
T01	136X160	2510
T02	163X183	2540
T03	165X223	3500
T04	210X238	2700
T05	210X240	2720
T06	200X230	2730
T07	186X210	4050
T08	176X218	2750
T09	218X268	3800
T10	220X276	3510
T11	202X264	3750
T12	176X249	2500
T13	186X258	3050

Tabella 2.1 – dimensioni degli elementi lignei sottoposti a prova.

2.2.2 Rilievo dei difetti

Al fine di caratterizzare gli elementi lignei oggetto della ricerca, tutti i difetti sono stati rilevati applicando la norma UNI 11119:2004 (*Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi lignei in opera*). La norma stabilisce i criteri, i requisiti e le procedure da seguire per effettuare la diagnosi in opera di elementi lignei nelle strutture portanti di edifici facenti parte dei beni culturali. La diagnosi è universalmente riconosciuta come il primo passo per la valutazione di una struttura lignea (Bonamini, 1995; Kasal e Anthony, 2002; ICOMOS, 2003). La UNI 11119 ha dimostrato di essere un valido strumento di valutazione (Mannucci *et al.*, 2011; Macchioni *et al.*, 2011) e di fornire informazioni utili ai fini della valutazione delle proprietà meccaniche (Cavalli e Togni, 2010). La norma comprende le regole per la classificazione secondo la resistenza degli elementi lignei antichi, sulla base dei difetti rilevabili (Tabella 2.2). Ogni elemento ligneo viene assegnato ad una categoria in opera e per ogni categoria e specie la norma riporta i valori di tensione ammissibile ed i valori medi di Modulo Elastico (Tabella 2.3).

Per una più precisa valutazione dell'effetto delle caratteristiche degli elementi lignei sottoposti a prova, i vari difetti e la loro posizione sono stati registrati distintamente, per ognuna delle 4 facce. In questo rapporto i difetti valutati non vengono riportati per esteso; solo per le fessurazioni da ritiro è stato stilato il paragrafo seguente.

Regole di classificazione per elementi strutturali lignei in opera

CARATTERISTICA		CATEGORIA IN OPERA		
		I	II	III
Smussi		$\leq 1/8$	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$
Lesioni varie Cretti da gelo Cipollature		assenti	assenti	ammissibili, purché in misura limitata
Nodi singoli		$\leq 1/5$ ≤ 50 mm	$\leq 1/3$ ≤ 70 mm	$\leq 1/2$
Gruppi di nodi		$\leq 2/5$	$\leq 2/3$	$\leq 3/4$
Inclinazione della fibratura (pendenza %)	in sezione radiale	$\leq 1/14$ (~7%)	$\leq 1/8$ (~12%)	$\leq 1/5$ (20%)
	in sezione tangenziale	$\leq 1/10$ (10%)	$\leq 1/5$ (20%)	$\leq 1/3$ (~33%)
Fessurazioni radiali da ritiro		ammissibili, purché non passanti		

Modalità di misurazione delle caratteristiche quantificabili sugli elementi strutturali lignei in opera

Smussi	Il minore dei due rapporti tra le dimensioni dei cateti dello smusso e la dimensione del lato corrispondente della sezione efficace.
Nodi singoli	Il rapporto fra il diametro minimo del nodo e la dimensione del lato della sezione efficace su cui compare.
Gruppi di nodi	Il rapporto fra la somma dei diametri minimi dei nodi compresi in un tratto di 150 mm e la dimensione del lato della sezione efficace su cui compare.
Inclinazione della fibratura	L'inclinazione delle fessurazioni da ritiro rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, misurata sulle facce delle membrature, in zone distanti da nodi o da altre caratteristiche che possano comportare forti deviazioni localizzate della fibratura (per esempio a causa di nodi); la base minima di misura per la determinazione di questo parametro è pari a 150 mm, misurati parallelamente alla dimensione maggiore dell'elemento.

Tabella 2.2 – Tabella riepilogativa dei difetti ammessi ai fini della classificazione in opera (UNI 11119:2004) e delle modalità di misurazione

2.2.2.1 Incidenza delle fessurazioni da ritiro

Le fessurazioni da ritiro sono una naturale conseguenza del comportamento anisotropo del legno nei confronti dei ritiri e normalmente presenti in elementi lignei contenenti il midollo. La UNI 11119 ammette la presenza delle fessurazioni da ritiro solo se non passanti tra due facce opposte, considerandole quindi come influenti, nei confronti delle proprietà meccaniche del legno, ma importanti ai fini della riduzione della superficie resistente alla sollecitazione di taglio.

Per meglio caratterizzare gli elementi lignei ed individuare eventuali relazioni tra tagli e fessurazioni da ritiro, anche queste sono state misurate. La loro incidenza è stata determinata in accordo con la norma DIN 4074:2003 (Figura 2.1) misurando

Tensioni massime per l'applicazione del metodo delle tensioni ammissibili e moduli medi di elasticità a flessione, per le categorie in opera delle principali specie legnose, applicabili per umidità del legno = 12%

Specie	Categoria in opera	Tensioni massime (N/mm ²)					
		compressione		flessione statica	trazione parallela alla fibratura ¹⁾	taglio (parallelo alla fibratura)	modulo di elasticità a flessione
		parallela alla fibratura	perpendicolare alla fibratura				
Abete bianco (Abies alba Mill.)	I	11	2,0	11,5	11	0,9	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,8	12 000
	III	7	2,0	7,5	6	0,7	11 000
Abete rosso (Picea abies Karst.)	I	10	2,0	11	11	1,0	12 500
	II	8	2,0	9	9	0,9	11 500
	III	6	2,0	7	6	0,8	10 500
Larice (Larix spp.)	I	12	2,5	13	12	1,1	15 500
	II	10	2,2	11	9,5	1,0	14 500
	III	7,5	2,0	8,5	7	0,9	13 500
Pini (Pinus spp.)	I	11	2,0	12	11	1,0	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,9	12 000
	III	7	2,0	8	6	0,8	11 000

Tabella 2.3 – Caratteristiche meccaniche per le principali specie legnose in funzione della categoria assegnata (UNI 11119:2004).

l'estensione della proiezione delle fessurazioni sulla base dell'elemento e dividendo il valore ottenuto per la base stessa.

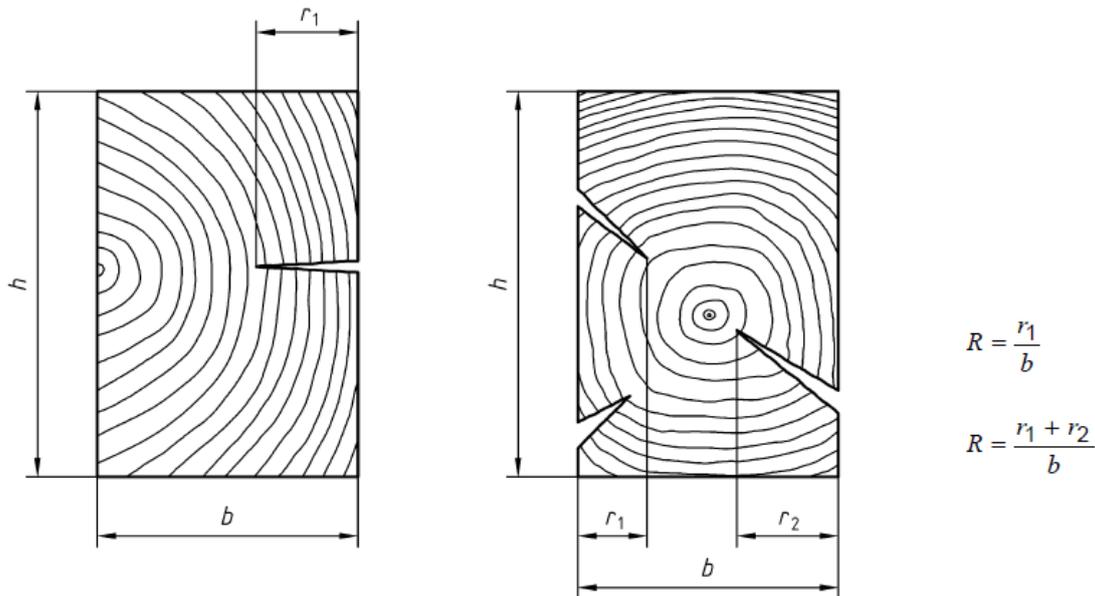


Figura 2.1 – Metodo di valutazione delle fessurazioni da ritiro secondo la DIN 4074:2003.

2.2.3 Determinazione della sezione efficace

La capacità dei segati di sopportare i carichi imposti è legata sia alle proprietà meccaniche del legno, sia alle caratteristiche della sezione resistente. Per ogni elemento è stata quindi determinata tale sezione, definita come la sezione efficace, difetti

compresi, privata (virtualmente) di tutte le aree degradate e/o danneggiate, non più in grado di contribuire alla resistenza meccanica dell'elemento, in accordo con la UNI 11119.

2.3 I TAGLI

Allo scopo di simulare un tipo di intervento eseguito in opera per l'inserimento di materiali di rinforzo, è stato operato un solo taglio per tutta la lunghezza di ogni trave. Il taglio è stato realizzato centralmente rispetto alla larghezza della faccia identificata come l'intradosso dell'elemento in opera. Tale faccia è stata individuata, per ogni elemento, in base a una serie di informazioni: la reale posizione in opera di una trave antica è facilmente riconoscibile, osservando la curvatura dell'elemento o identificando eventuali segni che ne testimoniano la posizione originale (incastrati, appoggi alla muratura o ad altri elementi). Per quegli elementi in cui non è stato possibile risalire all'originale posizione in opera, l'intradosso è stato scelto casualmente.

Al fine di alterare il meno possibile le condizioni iniziali degli elementi sottoposti a prova (massa e sezione resistente) è stato eseguito un solo taglio, che corrisponde alla situazione meno invasiva possibile tra quelle realizzabili in opera.

Il primo taglio è stato condotto per l'intera lunghezza di ogni elemento per una profondità pari al 25% dell'altezza della sezione media di ogni elemento (§ 2.2.1). In seguito il taglio è stato approfondito fino a raggiungere il 50% e, successivamente, il 75% dell'altezza della sezione media (Figura 2.2). Nella Tabella 2.4 sono riportate le profondità dei tagli eseguiti su ogni elemento.

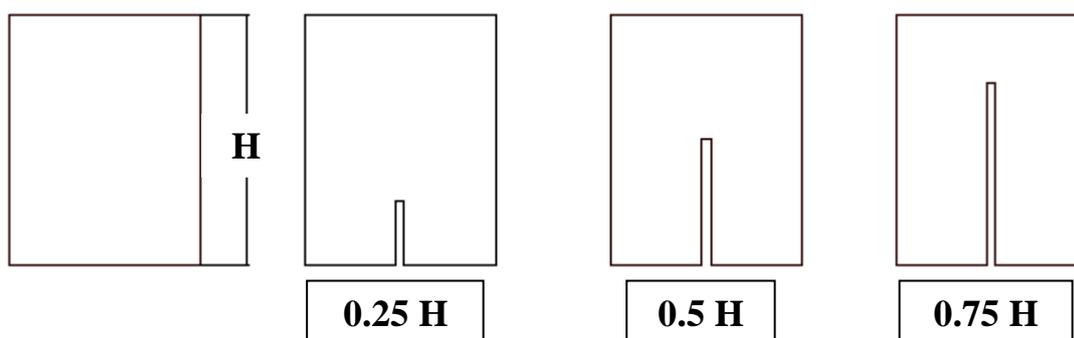


Figura 2.2 – Schema riassuntivo dei tagli eseguiti e relative profondità rispetto all'altezza della sezione.

<i>Trave n°</i>	<i>I taglio (mm)</i>	<i>%</i>	<i>II taglio (mm)</i>	<i>%</i>	<i>III taglio (mm)</i>	<i>%</i>
T01	43	27	75	47	115	72
T02	43	23	90	49	135	74
T03	60	27	105	47	165	74
T04	60	25	120	50	180	76
T05	60	25	120	50	178	74
T06	60	26	120	52	174	76
T07	59	28	101	48	155	74
T08	60	28	102	47	160	73
T09	67	25	132	49	203	76
T10	68	25	132	48	206	75
T11	68	26	132	50	192	73
T12	60	24	120	48	185	74
T13	68	26	120	47	195	76
MAX		28		52		76
MIN		23		47		72

Tabella 2.4 – Profondità dei tagli realizzati (mm) e incidenza rispetto all'altezza della sezione (%).

2.3.1 Realizzazione dei tagli

La corretta e precisa esecuzione dei tagli non costituisce uno dei fattori fondamentali per la buona riuscita degli interventi di rinforzo, tuttavia, per la determinazione delle proprietà meccaniche mediante prove a flessione, è essenziale che la sezione trasversale dell'elemento sia il più costante possibile.

Per garantire omogeneità nella dimensione e nella posizione dei tagli un apposito sistema di guida è stato realizzato. L'impossibilità di manovrare manualmente e con semplicità elementi lignei con peso fino a 100 kg ha fatto cadere la scelta, per la realizzazione dei tagli, sull'impiego di un utensile a controllo manuale che esegue il taglio muovendosi longitudinalmente poggiato sulla trave, percorrendo l'intera lunghezza dell'elemento. Tra questi è stata scelta l'elettrosega, per l'elevata profondità di taglio richiesta (fino a oltre 200 mm). Per mantenere la barra dell'elettrosega centrata rispetto alla larghezza della faccia su cui il taglio è stato realizzato, è stata predisposta un'apposita guida in legno (Figura 2.3), su cui far scorrere l'elettrosega stessa. L'elettrosega è stata posizionata su di una slitta in legno e ad essa collegata mediante piastre in acciaio (Figura 2.4). Lo scorrimento della slitta sulla guida è stato garantito da una sorta di incastro tipo maschio-femmina, che ha permesso alla slitta (maschio) di inserirsi tra i due fianchi della guida (femmina) e scorrere nella posizione scelta. L'esecuzione di un taglio di profondità costante è stato garantito dalla presenza di una piastra in acciaio saldamente collegata al corpo dell'elettrosega ed alla base della slitta,

che ha reso impossibile la rotazione dell'elettrosega (e quindi della barra) durante l'esecuzione del taglio. La regolazione della profondità di taglio è stata realizzata facendo ruotare il corpo dell'elettrosega variando il punto di fissaggio tra il corpo della stessa e la barra di collegamento.



Figura 2.3- Elemento ligneo preparato per la realizzazione del taglio.



Figura 2.4 – Il sistema di taglio composto dall'elettrosega fissata sulla slitta e dalla guida, bloccata rigidamente alla trave su cui realizzare il taglio.

L'elettrosega non è uno strumento di assoluta precisione ed i tagli eseguiti sono risultati affetti da errori la cui dimensione massima è risultata pari a $\pm 3\%$ rispetto alla profondità di taglio prevista (Tabella 2.4). Sulla base delle dimensioni della barra

dell'elettrosega e dei taglienti della catena la larghezza del taglio è risultata di 9 mm e la guida ha permesso di ottenere un taglio preciso e di larghezza costante (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Uno degli elementi lignei dopo la realizzazione del terzo taglio.



Figura 2.6 - I 13 elementi lignei al termine delle prove.

2.4 PROPRIETA' FISICO MECCANICHE DEGLI ELEMENTI LIGNEI

2.4.1 Densità

La densità del legno è espressione delle sue proprietà meccaniche. In passato Lackner e Foslie (1988) hanno trovato valori di correlazione fino a 0.4 tra densità e f_m . La densità degli elementi lignei è stata calcolata tramite l'equazione 1, il volume come prodotto della sezione media calcolata come al § 2.2.1 ed il peso di ogni elemento determinato tramite bilancia PCE PB – 150 (capacità 150 kg; risoluzione 0.05 kg).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Dove ρ è la densità, m la massa [kg], e V il volume [m³].

2.4.2 Prove a flessione

Ogni elemento è stato provato a flessione a 4 punti (Figura 2.7) prima dell'esecuzione dei tagli e dopo la realizzazione di ogni taglio.

Le prove sono state condotte presso il Laboratorio Prove meccaniche del DEISTAF (Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali – Sezione di Scienze e Tecnologie Ambientali Forestali - dell'Università di Firenze) impiegando una macchina prova materiali Metrocom. Le prove sono state eseguite conformemente alla EN 408:2010 (*Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties*) per tutti gli aspetti ad eccezione della geometria di prova. La norma infatti prevede che lo spazio tra gli appoggi, durante la prova, sia equivalente ad almeno quindici volte l'altezza del provino. Vista la dimensione delle travi (lunghezza e sezione) tale configurazione non è stata realizzata per tutti gli elementi: per quelli più tozzi (con rapporto $l/h < 18$) sono state ridotte le lunghezze dei due terzi laterali delle travi mentre la distanza del tratto compreso tra i punti di applicazione del carico è stata determinata in accordo con la EN 408, che prevede che tale lunghezza sia pari a sei volte l'altezza del provino. La geometria di prova, per ogni singola trave, è stata mantenuta invariata per tutte le prove condotte. In corrispondenza dei punti di contatto tra i cilindri di applicazione del carico e legno, sono state inserite delle piastre in acciaio di larghezza massima pari a metà dell'altezza della sezione del provino, per la ripartizione del carico. La funzione delle piastre è quella di evitare indentature nel legno dovute a cedimento per compressione trasversale alle fibre nei punti di applicazione del carico. Tali cedimenti genererebbero errori in fase di misura dell'abbassamento della trave durante la prova. Tutte le prove sono state condotte in controllo di carico: in tale modalità la macchina prova materiali è in grado di applicare al provino un carico prestabilito ad incrementi costanti, determinati in accordo con la EN 408. Il carico massimo applicato per ogni prova è stato scelto sulla base delle caratteristiche degli elementi, al fine di rimanere all'interno del campo elastico del materiale.

La determinazione del Modulo Elastico di ogni elemento è stata realizzata sulla base delle frecce di inflessione misurate durante le prove. Due sono i valori di E calcolati: un Modulo Elastico Globale ($E_{m,g}$), stabilito sulla base dell'abbassamento massimo di ogni elemento e un Modulo Elastico Locale ($E_{m,l}$) legato all'abbassamento dell'asse neutro rispetto a due punti compresi tra i due pressori per l'applicazione del carico, nel tratto centrale. La differenza tra i due Moduli Elastici è stata abbondantemente trattata a partire dalla seconda metà degli anni '90, quando l'impiego di $E_{m,g}$ venne introdotto nella EN 408 (Boström, 1999; Solli, 2000; Ridley-Ellis *et al.*, 2009). I due moduli elastici assumono significato differente tanto che i loro valori, per uno stesso segato, possono essere anche molto differenti. $E_{m,l}$ è riferito al solo tratto centrale dell'elemento provato ed è quindi essenzialmente legato alle caratteristiche di quella zona. Al contrario $E_{m,g}$ risente delle caratteristiche dell'intero elemento e meglio ne esprime il suo reale comportamento. In una prova statica di flessione a 4 punti con carichi uguali e ripartiti simmetricamente, il tratto centrale, compreso tra i punti di applicazione del carico, presenta momento costante ed è sollecitato a sola flessione. Al contrario le porzioni poste tra gli appoggi ed i punti di applicazione del carico sono sollecitate anche a taglio. La presenza della sollecitazione di taglio aumenta la freccia di inflessione ed influenza solo il valore di $E_{m,g}$. Anche la distribuzione dei difetti influenza i valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ in modo diverso: i difetti localizzati all'esterno del tratto centrale avranno un effetto solo sul valore di $E_{m,g}$. Ancora, Aicher *et al.* (2002), Hanhijärvi *et al.* (2005) e Machado e Palma (2010) riportano che E è influenzato soprattutto dalle caratteristiche generali del legno (principalmente densità ed inclinazione della fibratura) e poco dai difetti localizzati (come i nodi), che sono distribuiti per l'intera lunghezza dell'elemento. Lo stesso difetto quindi può influenzare in modo diverso il valore di E , a seconda della lunghezza del tratto considerato per la sua determinazione: tipicamente un numero elevato di nodi di dimensioni importanti, posizionati nel tratto centrale, avrà maggior influenza su $E_{m,l}$ che su $E_{m,g}$.

2.4.2.1 Il calcolo del Modulo Elastico

La trattazione teorica di una trave rettilinea a sezione costante che si inflette è basata su due principi fondamentali: l'ipotesi Bernoulli-Navier (o della conservazione delle sezioni piane) e la legge di Hooke. Secondo il principio di Bernoulli-Navier in una trave

sottoposta a flessione ogni sezione ruota attorno al proprio asse neutro n , mantenendosi piana.

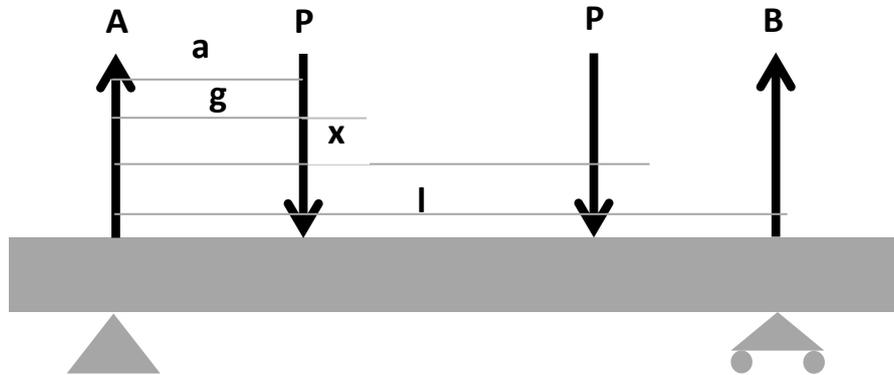


Figura. 2.7 - Schema di prova statica a flessione a 4 punti.

Considerando una trave di lunghezza unitaria sollecitata a flessione, una fibra longitudinale subisce una variazione di lunghezza ε_x proporzionale alla distanza y dall'asse neutro. La tensione cui è sottoposta la fibra è proporzionale alla sua deformazione per la legge di Hooke (equazione 2).

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2)$$

Essendo la tensione legata alla deformazione ε_x , e quest'ultima proporzionale alla distanza dall'asse neutro, anche le tensioni variano proporzionalmente all'aumentare della distanza dall'asse neutro. La tensione in un punto generico della sezione rispetto all'asse neutro può essere espressa mediante l'equazione 3.

$$\sigma_x = \frac{My}{J} \quad (3)$$

Dove M rappresenta il momento applicato e J il momento d'inerzia della sezione considerata. Il diagramma delle tensioni può essere facilmente ottenuto calcolando la tensione alle varie distanze dall'asse neutro.

Le fibre longitudinali deformate diventano archi di circonferenza concentrici di lunghezza proporzionale al raggio (r) e la deformazione può essere espressa in base all'equazione 4.

$$\varepsilon_x = \frac{y}{r} \quad (4)$$

La 3 e la 4 possono quindi essere riscritte:

$$\sigma_x = E \frac{y}{r}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EJ} \quad (5)$$

Quest'ultima è conosciuta anche come equazione fondamentale di elasticità della flessione semplice ed esprime la curvatura in ogni punto della linea elastica, cioè indica la deformazione dell'asse geometrico di una trave sottoposta a flessione. La curvatura in un punto di una linea può essere anche espressa mediante coordinate cartesiane:

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2\eta}{dx^2}$$

(Dove η rappresenta l'abbassamento della linea elastica) che equivale a

$$\frac{M}{EJ} = \frac{d^2\eta}{dx^2} \quad (6)$$

che corrisponde all'equazione differenziale della linea elastica.

Dall'integrazione di tale formula si ottiene il valore di E , conosciuto il carico applicato e misurato l'abbassamento della linea elastica.

Il momento flettente M per una trave su cui agiscono due carichi uguali applicati simmetricamente, per una generica sezione compresa nel tratto tra il punto di applicazione di P e la reazione vincolare B , può essere calcolata tramite l'equazione 7.

$$M = Ax - P(x-a) - P(x-l-a) \quad (7)$$

di conseguenza l'equazione differenziale della linea elastica scritta per lo stesso tratto diventa

$$EJ\eta'' = -Ax + P(x-a) + P(x-l-a) \quad (8)$$

che integrata due volte fornisce l'abbassamento della linea elastica in ogni punto della trave, a patto di eliminare i carichi alla destra della sezione considerata.

$$EJ\eta = -\frac{Px^3}{6} + \frac{P(x-a)^3}{6} + \frac{P(x-l+a)^3}{6} + \frac{x}{6l} (Pa(l-a)(2l-a) + P(l-a)a^2) \quad (9)$$

Semplificando ed escludendo i carichi come descritto in precedenza si ottengono le equazioni dell'abbassamento della linea elastica per i tre tratti della trave

$$EJ\eta = \frac{P}{6} (-x^3 + (x-a)^3 + (x-l+a)^3 + 3ax(l-a)) \quad (10)$$

$$EJ\eta = \frac{P}{6}(-x^3 + (x-a)^3 + 3ax(l-a)) \quad (11)$$

$$EJ\eta = \frac{P}{6}(-x^3 + 3ax(l-a)) \quad (12)$$

Le equazioni 10, 11 e 12 valgono rispettivamente per i tratti tra il punto di applicazione del carico e la reazione vincolare B, tra i due punti di applicazione del carico e tra l'applicazione del carico e la reazione vincolare A (Figura 2.7).

Per calcolare l'abbassamento della linea elastica in corrispondenza della mezzeria ($x=l/2$) si usa la 13.

$$EJ\eta = \frac{Pa}{6} \left(\frac{3}{4}l^2 - a^2 \right) \quad (13)$$

Mentre l'abbassamento della linea elastica in corrispondenza del punto di applicazione dei gioghi distanti g dagli appoggi è dato dalla 14.

$$EJ\eta = \frac{P}{6} a(3gl - 3g^2 - a^2) \quad (14)$$

Risolvendo le equazioni 13 e 14 in funzione dell'abbassamento e sottraendo l'una dall'altra si ottiene l'abbassamento della mezzeria rispetto ai punti di applicazione del giogo:

$$\eta = \frac{Pa}{2EJ} \left(\frac{l}{2} - g \right)^2 \quad (15)$$

da cui si ricava la formula per il calcolo di $E_{m,l}$. Dalla 13 si ottiene invece la formula per il calcolo di $E_{m,g}$.

$$E_{m,g} = \frac{Pa}{6J\eta} \left(\frac{3}{4}l^2 - a^2 \right) \quad (16)$$

$$E_{m,l} = \frac{Pa}{2J\eta} \left(\frac{l}{2} - g \right)^2 \quad (17)$$

La sollecitazione di taglio influisce sull'abbassamento della linea elastica misurata in mezzeria nel caso di $E_{m,g}$ ed il suo contributo può essere così quantificato:

$$\eta_g = \frac{Pa}{GA_s k} \quad (18)$$

Dove η_g rappresenta l'abbassamento della linea elastica dovuto alla sollecitazione di taglio; G il modulo di taglio del materiale; A_s l'area corrispondente alla sezione trasversale e k il fattore di taglio dipendente dalla forma della sezione.

2.4.2.2 I sistemi di misura

$E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ sono stati calcolati partendo dalla misura dell'abbassamento dell'asse neutro, nella zona tra i punti di applicazione del carico (per $E_{m,l}$), e dell'intradosso, a metà della distanza tra gli appoggi (per $E_{m,g}$). La misura degli spostamenti è stata effettuata mediante trasduttori di spostamento di tipo LVDT MONITRAN MTN/EUCR 12.5 (linearità $\pm 0,5\%$).

La misura dell'abbassamento della linea elastica nel tratto tra i punti di applicazione del carico è stata eseguita mediante l'applicazione di gioghi, sostenuti ai due estremi da chiodi infissi in corrispondenza dell'asse neutro. A metà lunghezza dell'elemento il trasduttore, solidale al giogo impiegato, è stato fissato ad un chiodo, infisso sempre in corrispondenza dell'asse neutro. In questo modo il giogo risulta sospeso alle due estremità ed il trasduttore permette di misurare l'abbassamento massimo della linea elastica, relativamente al tratto di misura considerato. Su entrambe le facce laterali degli elementi è stato montato un giogo, e gli abbassamenti di ciascuno sono stati misurati distintamente; la media dei due valori è stata poi utilizzata nei calcoli. L'abbassamento dell'intradosso è stato misurato mediante lo stesso modello di trasduttori LVDT sostenuti da piedistalli in grado di garantire la verticalità del corpo degli stessi (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Trasduttori di spostamento LVDT collegati tramite calamite all'intradosso di un elemento ligneo durante le prove a flessione.

Inizialmente, a trave integra, è stato impiegato un solo trasduttore, il cui nucleo è stato unito all'elemento ligneo mediante calamita, applicata a metà della larghezza della faccia dell'intradosso. Dopo l'esecuzione del primo taglio due trasduttori sono stati

impiegati, ognuno applicato ad una delle due porzioni di legno separate dal taglio, per identificare eventuali asimmetrie nel comportamento. Il carico applicato dalla macchina prova materiali è stato acquisito mediante cella di carico inserita sopra la barra porta pressori.

2.4.2.3 Sistema di acquisizione dei dati

Trasduttori e cella di carico emettono un segnale elettrico in volt che può essere trasformato, mediante i relativi fattori di conversione, in unità tecniche (mm per i trasduttori e N per il carico). Tali segnali elettrici non possono essere registrati direttamente da un computer senza che siano stati prima trasformati da analogici in digitali. Tale conversione viene effettuata da una scheda di acquisizione dati, cui vengono collegati trasduttori e cella di carico. I segnali inviati dai 4 trasduttori impiegati, e dalla cella di carico, sono stati acquisiti mediante una scheda Measurement Computing modello USB 1608-FS a 16 bit. La scheda è dotata di 8 canali di acquisizione e comunica mediante un software proprietario (tracerDAQ) completamente configurabile con il computer cui è collegata via porta USB.

2.4.2.4 Esecuzione delle prove

Durante le prove ad ogni elemento è stata applicata una sequenza di carichi predeterminati sulla base delle caratteristiche dell'elemento stesso. In funzione del carico e della dimensione della sezione è stata calcolata, per ogni elemento provato, la sollecitazione esercitata, al fine di non superare il campo elastico del materiale. L'entità del carico e la sua velocità di applicazione sono rimasti invariati per tutte le prove condotte su uno stesso elemento. La riduzione delle sezioni resistenti dovute all'esecuzione dei tagli, ha determinato, a parità di carico applicato, un aumento delle sollecitazioni di flessione. Tale aumento, vista la ridotta variazione delle proprietà delle sezioni (§. 2.4.3) è risultato trascurabile. Tutti gli elementi sono stati provati prima dell'esecuzione dei tagli, per determinare $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$, e nuovamente sottoposti a prova dopo l'esecuzione del primo, del secondo e del terzo taglio (profondità rispettivamente pari al 25%, 50% e 75% dell'altezza media della sezione), per determinare nuovamente i valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$. Ogni elemento è stato provato più volte in ogni condizione (trave

integra, con taglio a 25, 50 e 75%), per verificare la ripetibilità della prova, l'attendibilità dei dati acquisiti e del valore di E determinato.

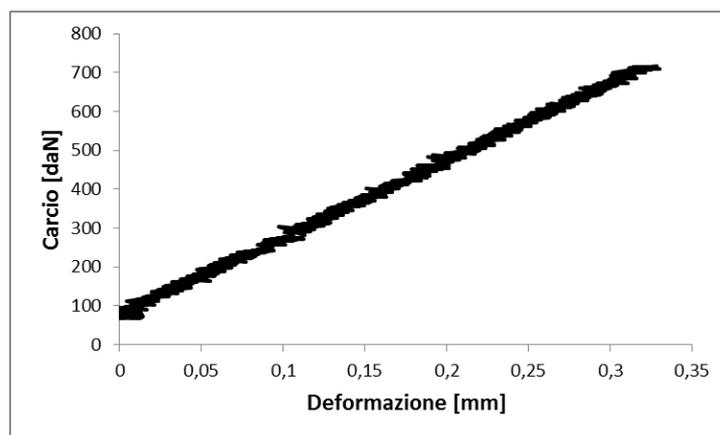
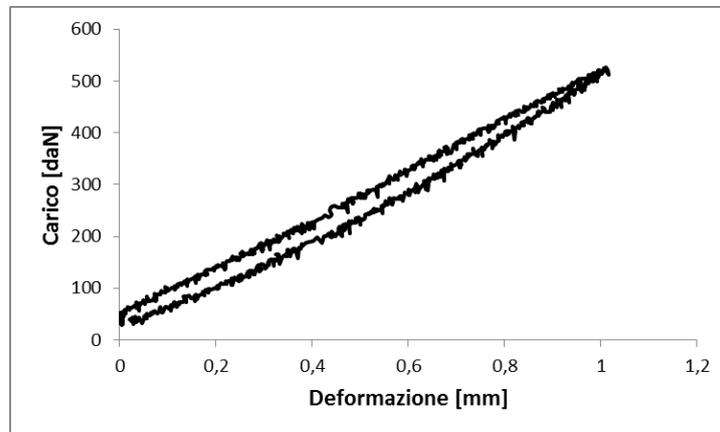


Grafico 2.1 - Curve carico-deformazione. Il diverso andamento della curva tra la fase di carico e quella di scarico indicano un comportamento anomalo durante la prova (in alto), presumibilmente dovuto al suo comportamento viscoelastico. Nessuna distinzione tra fase di carico e scarico (in basso).

Ciò è stato stabilito mediante l'analisi dei grafici carico-deformazione ottenuti e dalla verifica della ripetibilità dei risultati. L'elevata dimensione di alcuni degli elementi, la presenza di alterazioni superficiali e le accentuate deformazioni presenti su molti degli elementi antichi è fonte di una serie di problemi riscontrabili in fase di prova, che possono condurre ad errori di misurazione: schiacciamento del legno agli appoggi anche a carichi ridotti, rotazioni indesiderate nelle fasi iniziali della prova, comportamenti asimmetrici delle facce dell'elemento (Grafico 2.1). Le prove sono state eseguite in diversi momenti: Maggio 2011 (travi integre), Ottobre 2011 (taglio 25%), Gennaio 2012 (taglio 50%) e Marzo 2012 (taglio 75%).

2.4.3 Proprietà della sezione

Il comportamento di elementi sollecitati a flessione è strettamente legato alle caratteristiche della sezione. Al variare di questa, varia la posizione dell'asse neutro ed il valore di J che, insieme a E , determina la rigidezza flessionale di un elemento inflesso. Elementi lignei di sezione differente avranno quindi un diverso comportamento a flessione, anche con valori di E uguali. Newlin e Trayer (1924), e Markwardt (1938) hanno studiato l'influenza della forma della sezione sulla resistenza a flessione e su E , per gli elementi lignei, proponendo fattori di correzione da usare per sezioni diverse da quella rettangolare. L'esigenza di tali correzioni è legata alla diversa distribuzione delle sollecitazioni lungo la sezione, al variare della sua forma. Tale fenomeno, secondo gli autori, sarebbe importante soprattutto per elementi che arrivano a rottura fuori dal campo elastico e trascurabile per prove condotte all'interno del campo elastico. Inoltre la riduzione del momento di inerzia della sezione di una trave dovuta alla realizzazione dei tagli ne determina una maggiore instabilità laterale a flessione (Belluzzi, 1982), e, di conseguenza, una maggior deformazione della trave anche a parità di Modulo Elastico. Tale effetto può diventare importante per elementi che presentano un numero elevato di tagli profondi, tali da determinare riduzioni di J importanti, mentre per le 13 travi testate le variazioni di J , riportate nei risultati, sono inferiori al 5%, cioè tali da non giustificare variazioni importanti dei valori di E .

Per non trascurare questi aspetti nella determinazione dei valori di E nelle varie fasi di prova, la sezione media di ogni elemento è stata misurata e riprodotta su CAD, dopodiché la posizione del baricentro ed il valore del momento di inerzia sono stati determinati nelle condizioni originarie e dopo l'esecuzione di ogni taglio. Tali valori sono stati impiegati per la determinazione dei valori di E nelle equazioni 16 e 17. Per il calcolo di J sono state usate le equazioni 20 e 21 rispettivamente per la sezione rettangolare e per le sezioni dopo l'esecuzione dei tagli. L'equazione 19 è stata usata per individuare la posizione dell'asse neutro.

$$d = 0,5 \frac{BH^2 - (B-b)h^2}{BH - (B-b)h} \quad (19)$$

$$J = \frac{BH^3}{12} \quad (20)$$

$$J = \frac{BH^3}{3} - \frac{(B-b)h^3}{3} - Ad^2 \quad (21)$$

Dove d rappresenta la distanza dalla base dell'asse neutro [mm].

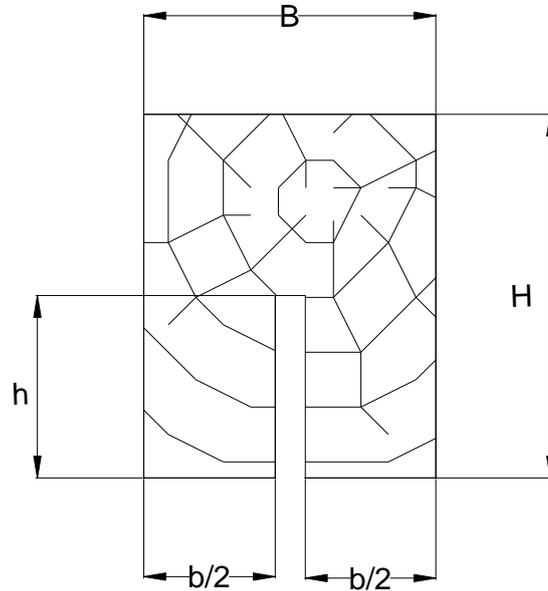


Figura 2.9 – Calcolo delle proprietà della sezione per elementi lignei sottoposti a prova.

2.4.4 L'influenza dei tagli sul Modulo di Scorrimento

L'abbassamento della linea elastica in mezzeria, per la sola sollecitazione di flessione, per una trave caricata come in Figura 2.7, aumenta più rapidamente all'aumentare della luce di prova rispetto all'aumento dell'abbassamento della linea elastica dovuto alla sola sollecitazione di taglio. L'influenza della sollecitazione di taglio sul valore dell'abbassamento della linea elastica risulta, per questa tipologia di prove, maggiore al diminuire della distanza tra gli appoggi. L'esecuzione dei tagli modifica la forma della sezione trasversale degli elementi, riducendo l'area della sezione e il valore del coefficiente di taglio k . L'esecuzione dei tagli influenza quindi l'abbassamento della linea elastica misurata, poiché fa aumentare il valore di η_g (equazione 18). L'abbassamento della linea elastica dovuto alla sollecitazione di taglio, e la sua variazione dopo l'esecuzione dei tagli, può essere facilmente calcolato mediante l'equazione 18, a patto di conoscere come variano k , G e A_s (per le definizioni cfr. 2.4.2.1).

Mentre A_s può essere facilmente misurato, la determinazione di k e G è più complessa, specialmente per le difficoltà di determinare il reale valore di k (Bank, 1990; Cowper, 1996; Brancheriau e Bailleres, 2002). Il Modulo Elastico dinamico (E_f) e il valore di $k*G$ possono essere calcolati sulla base della soluzione all'equazione di moto delle vibrazioni flessionali (Timoshenko, 1921) proposta da Bordonné (1989). L'impiego di metodi dinamici per la determinazione delle proprietà meccaniche del legno è ampiamente diffuso per la semplicità e rapidità di esecuzione, e per la qualità dei risultati che offrono. La soluzione adottata in questo lavoro è stata usata da diversi autori in precedenza proprio per calcolare E_f e G (Bailleres *et al.*, 2009; Roohnia *et al.*, 2010; Abdolahian-Sohi *et al.*, 2011; Roohnia *et al.*, 2012).

La soluzione elaborata da Bordonné permette di calcolare le coordinate x_n, y_n (n corrisponde alla frequenza di risonanza f ; $n=1$ frequenza fondamentale; $n=2$ seconda armonica; ecc.) a partire da prove di vibrazione trasversale condotte su elementi lignei (§. 2.4.5.1). La soluzione è valida utilizzando solo le prime cinque frequenze, poiché per quelle di ordine superiore l'effetto dell'inerzia rotatoria introduce errori troppo elevati; e per elementi in cui il rapporto tra lunghezza ed altezza della sezione sia maggiore di 10 (Brancheriau e Bailleres, 2002). I valori di x_n, y_n vengono calcolati come riportato nelle equazioni 22 e 23 e sono impiegati per costruire un grafico ed ottenere la sua retta di regressione lineare (Grafico 2.2). Il coefficiente angolare dell'equazione della retta di regressione ottenuta corrisponde a $E_f/k*G$, e l'intercetta a E_f/ρ . Conoscendo il valore di densità di un elemento ligneo, una volta eseguita la prova a vibrazione trasversale, si possono quindi calcolare E_f e $k*G$.

Ai fini di questo lavoro non è tanto importante individuare il valore di G , quanto la variazione dell'abbassamento della linea elastica dovuta alla sollecitazione di taglio; per cui il prodotto dei valori k e G può essere trattato indistintamente. Diventa così superfluo individuare il reale valore di k la cui determinazione resta complicata.

Equazioni per la determinazione delle variabili x_n e y_n :

$$x_n = QF_2(m)4\pi^2 \frac{A_s l^4 f_n^2}{JP_n} \quad (22)$$

$$y_n = 4\pi^2 \frac{A_s l^4 f_n^2}{JP_n} (1 + QF_1(m)) \quad (23)$$

dove

$$Q = \frac{J}{A_s l^2}$$

$$P_n = \left((2n+1) \frac{\pi}{2} \right)^4$$

$$F_1(m) = \theta^2(m) + 6\theta(m)$$

$$F_2(m) = \theta^2(m) - 2\theta(m)$$

$$\theta(m) = m \frac{\tan(m) \tanh(m)}{\tan(m) - \tanh(m)}$$

$$m = (2n+1) \frac{\pi}{2}$$

I valori di x_n e y_n sono individuati a partire dalle frequenze di vibrazione ottenute sottoponendo gli elementi lignei a prove di vibrazione trasversale (§ 2.4.5.1) utilizzando i dati delle prove effettuate prima dell'esecuzione del primo taglio e dopo la realizzazione del terzo taglio (profondità pari al 75% dell'altezza della sezione).

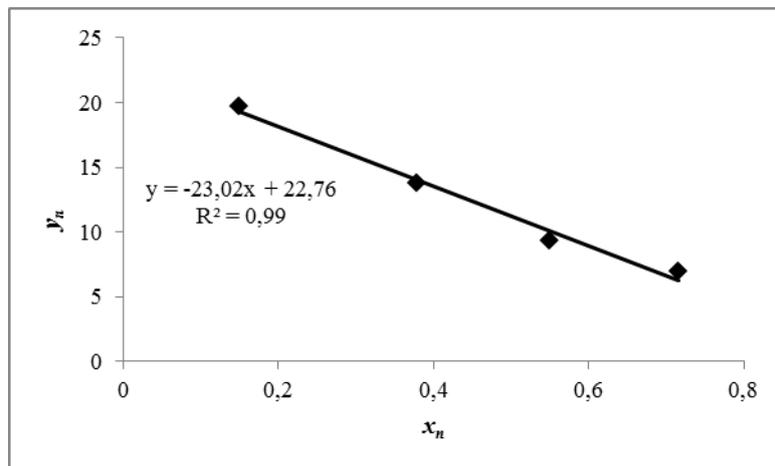


Grafico 2.2 – Grafico ottenuto a partire dalle coordinate x_n , y_n per la trave T03, utilizzato per determinazione del Modulo di Taglio, secondo la soluzione proposta da Bordonné (1989).

2.5 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO MEDIANTE PROVE DINAMICHE

Diverse prove dinamiche sono state studiate per il calcolo di un Modulo Elastico Dinamico per il legno. Normalmente vengono utilizzate prove a risonanza, in cui un elemento viene fatto vibrare, longitudinalmente o trasversalmente, al fine di misurare le frequenze proprie di risonanza che permettono di calcolare il Modulo Elastico. Altri

metodi invece si basano sulla misura della velocità di propagazione di onde di pressione all'interno del legno. I valori di Modulo Elastico calcolati con le prove dinamiche non coincidono necessariamente a quelli determinati sulla base di prove meccaniche (il cui calcolo si basa su un principio differente) ma i due risultano tra loro correlabili; e di conseguenza le prove dinamiche vengono impiegate per la stima del valore di Modulo Elastico ottenibile mediante prove statiche. Affinché le prove dinamiche siano realizzabili, si assume che la sezione sia costante e il valore di E omogeneamente distribuito. La loro affidabilità è stata ampiamente dimostrata, tanto per provini piccoli e netti quanto per segati in dimensioni d'uso, tuttavia non sono mai stati testati elementi con forma della sezione simile a quella delle travi sottoposte a tagli.

Al fine di individuare eventuali comportamenti differenti tra le porzioni di legno separate dopo il taglio, sono state eseguite prove diverse, posizionando gli accelerometri in punti differenti delle testate, sia per le prove di vibrazione longitudinale, sia per le prove di propagazione delle onde di pressione (Figura 2.10). In particolare sono state condotte 6 misurazioni diverse: ogni testata è stata divisa in due parti (una a destra ed una a sinistra del taglio), e l'accelerometro posizionato al centro di ognuna di esse a tre altezze differenti, corrispondenti alla metà della profondità dei tagli eseguiti (quindi al 12.5%, 37.5% e 62,5% dell'altezza media della sezione, rispettivamente per i tagli al 25%, 50% e 75%).

Per ogni condizione di prova e per ogni trave sono quindi stati calcolati 6 differenti valori di Modulo Elastico Dinamico, ognuno dei quali è stato riferito ad una diversa posizione; mentre il valore medio delle misurazioni è stato considerato come valore da assegnare all'intero elemento. In totale sono quindi stati calcolati, considerando tutte le prove dinamiche e le diverse condizioni (trave integra o tagliata), 676 valori di Modulo Elastico Dinamico: 52 per le prova a vibrazione trasversale (13 travi in 4 condizioni diverse); 312 per la prova a vibrazione longitudinale e 312 per quella di propagazione delle onde di pressione (6 per ogni trave, per 13 travi in 4 condizioni differenti).

2.5.1 Vibrazione libera trasversale

Il Modulo Elastico dinamico (E_f), calcolato sulla base della soluzione proposta da Bordonné (1989), risulta piuttosto laboriosa per la mole di calcoli richiesta. Il calcolo di E_f può comunque essere effettuato, portando agli stessi risultati, a partire dalle prove a

vibrazione trasversale impiegando l'equazione 24 (Bodig e Jayne, 1982). L'equazione 24 (Bodig e Jayne, 1982) è semplificata per essere impiegata utilizzando la sola frequenza fondamentale di risonanza (f_1) poiché è quella che fornisce i migliori risultati, risentendo meno dell'inerzia rotatoria e dello sforzo di taglio che si generano durante la vibrazione (Giordano, 1981).

$$E_f = \frac{4\pi^2 f_1^2 l^3}{k_i^4 J} m \quad (24)$$

Dove m corrisponde alla massa della trave e $k_i = 4.73$ (costante per la frequenza fondamentale in prove di vibrazione trasversale con estremità libere).

Tale metodo è stato ampiamente studiato ed utilizzato, sia su provini piccoli e netti (Bell *et al.*, 1954; Ilic, 2001; Olsson *et al.*, 2010), sia su materiale in dimensioni d'uso (Pellerin, 1965; Ceccotti e Togni, 1996; Piter *et al.*, 2004), ed è risultato, tra le tecniche dinamiche, quella in grado di fornire i migliori risultati, pur presentando alcuni limiti di applicazione, dovuti essenzialmente alla necessità che le testate delle travi siano libere, il tipo di vincolo agli appoggi noto e lo stato di sollecitazioni nullo.

Le prove sono state condotte sorreggendo le travi in corrispondenza dei nodi (in un'onda stazionaria si definisce *nodo* quello in cui le particelle in vibrazione sono ferme o di elongazione nulla, *ventre* il punto di elongazione massima delle particelle) per la frequenza fondamentale di vibrazione, posti a 0,224 volte la lunghezza dell'elemento. Le frequenze di vibrazione sono state registrate mediante un accelerometro modello PCB 480E09 collegato ad un computer portatile. L'individuazione delle frequenze di vibrazione è stata realizzata mediante la Trasformata Veloce di Fourier, eseguita automaticamente dal software di acquisizione GS Spectrum Analyser (Figura 2.11).

I risultati delle prove a vibrazione trasversale sono influenzati dall'inerzia rotatoria e dalla sollecitazione di taglio, in modo diverso, a seconda del rapporto di snellezza di una trave, definito come il rapporto tra altezza della sezione e sua lunghezza. Al fine di poter confrontare i dati ottenuti da travi di sezione e lunghezza differenti, e per proporre una metodologia estendibile anche a travi con caratteristiche geometriche diverse, i valori sono stati corretti sulla base della norma ASTM C 1548 -02 – “*Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio of refractory materials by impulse excitation of vibration*”. La norma permette di giungere ad un valore corretto di E_f , ottenuto moltiplicando il valore calcolato mediante l'equazione 24,

per un fattore di correzione T_l (equazione 25), che tiene conto delle dimensioni del materiale (l e h), e del Modulo di Poisson (μ). I valori medi dei coefficienti di Poisson utilizzati sono quelli riportati da Bodig e Jayne (1982). Nei paragrafi e nei capitoli successivi il valore riportato di E_f sarà da intendere sempre come valore corretto.

$$T_l = 1 + 6.585(1 + 0.0752\mu - 0.8109\mu^2)\left(\frac{h}{l}\right)^2 - 0.868\left(\frac{h}{l}\right) - \frac{\left\{8.340(1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2)\left(\frac{h}{l}\right)^4\right\}}{\left\{1 + 6.338(1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2)\left(\frac{h}{l}\right)^2\right\}} \quad (25)$$

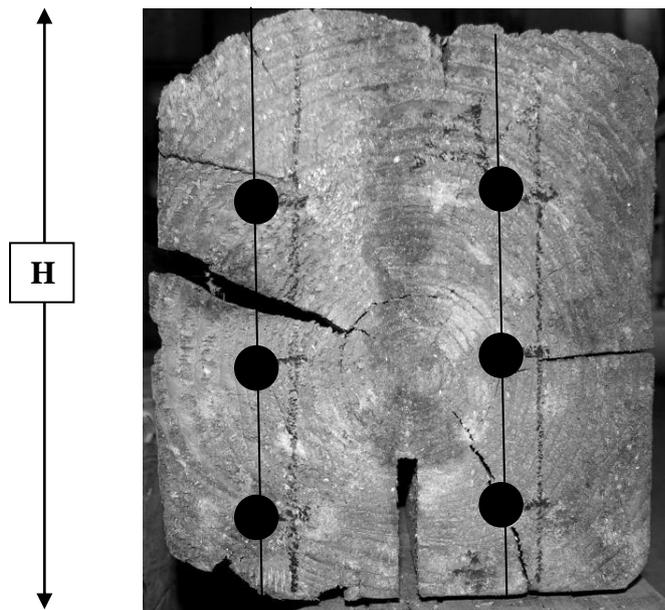


Figura 2.10- Posizione degli accelerometri per le prove di vibrazione libera longitudinale e di propagazione longitudinale di onde di pressione.

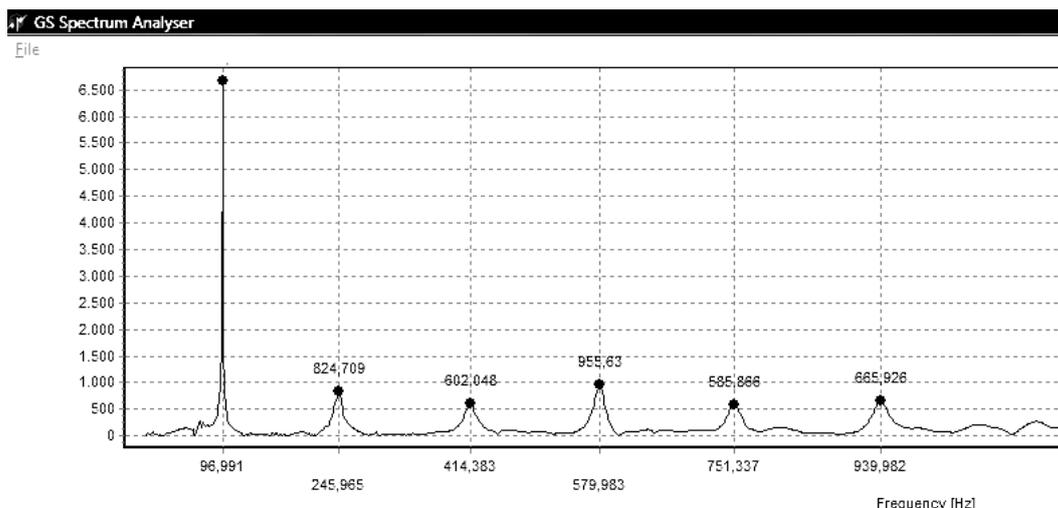


Figura. 2.11 – Trasformata Veloce di Fourier e frequenze di risonanza per prove a flessione trasversale.

2.5.2 Vibrazione libera longitudinale

Questo tipo di prove è stato condotto impiegando la stessa geometria di prova utilizzata per le prove a vibrazione trasversale, collegando l'accelerometro in corrispondenza delle testate, avendo l'accortezza di posizionarlo perpendicolarmente rispetto all'asse di vibrazione longitudinale di ogni trave. La vibrazione è stata indotta in corrispondenza della testata opposta e registrata mediante notebook. Il Modulo Elastico così calcolato (E_l) risulta normalmente più elevato rispetto a quello determinato mediante le prove a vibrazione trasversale, tuttavia viene spesso impiegato nella pratica, perché questo tipo di prove risulta di più semplice realizzazione rispetto quelle a vibrazione trasversale (può essere realizzata senza che sia rispettata una specifica geometria di prova). L'equazione 26 (Kollman e Krech, 1960), riferita all'impiego della sola frequenza fondamentale, è stata utilizzata per il calcolo di E_l .

$$E_l = 4\rho l^2 f_1^2 \quad (26)$$

2.5.3 Propagazione longitudinale di onde di pressione

Due accelerometri sono stati posizionati in corrispondenza delle testate delle travi e collegati ad un'oscilloscopio (modello Kenwood CS8010). Le onde di pressione sono state prodotte colpendo una delle testate mediante un martello. I due accelerometri, messi in movimento dalle onde, trasmettono due segnali all'oscilloscopio, che risultano distanziati in funzione del tempo che le onde impiegano a percorrere la trave. Tale dato

viene usato per calcolare la velocità di propagazione delle onde nella trave ed il valore del relativo Modulo Elastico Dinamico E_{sw} , applicando l'equazione 27 (Kolsky, 1963).

$$E_{sw} = \rho v^2 \quad (27)$$

Dove v = velocità di propagazione delle onde d'urto [km s^{-1}].

2.6 STIMA DELLA DENSITÀ MEDIANTE PILODYN

La densità è un parametro importante usato come espressione, a parità delle altre caratteristiche di un segato, della sua qualità ed è inoltre indispensabile per poter calcolare i valori di E_l e di E_{sw} secondo le formule riportate. La sua determinazione, per gli elementi in opera, non è tuttavia sempre di facile realizzazione: il calcolo del volume di un elemento, qualora alcune sue parti siano nascoste (ad esempio le testate inserite nei muri), e la misura del suo peso, possono essere impediti dalle condizioni di cantiere. Nel tempo diverse tecniche sono state proposte, ed alcuni strumenti commerciali sono stati realizzati sulla loro base. Tali strumenti, più o meno complessi, sfruttano le relazioni esistenti tra densità e durezza del legno. Tra le tecniche più diffuse quelle basate sull'estrazione della vite, che consiste nell'avvitare una vite, secondo una precisa metodologia, e nel misurare la forza necessaria ad estrarla e quelle basate sulla resistenza opposta dal legno a farsi penetrare da una punta (Pilodyn o Resistograph). Tra tutte queste tecniche la sola ad essere considerata come non distruttiva è il Pilodyn (Bobadilla *et al.*, 2012), mentre tutte le altre lasciano segni troppo evidenti sulle superfici del legno, e quindi non sempre compatibili con i principi della conservazione. Il Pilodyn (modello 6J) è costituito da un sistema a molla che, una volta caricato, può rilasciare con forza nota pari a 6 Joule, una punta all'interno del legno. Una scala graduata permette di leggere di quanto la punta è penetrata nel legno. Tale valore è legato in modo inversamente proporzionale alla densità del legno. Lo strumento è stato largamente impiegato, dapprima per stimare il livello di degrado dei pali delle linee telefoniche, poi esteso agli alberi in piedi ed ai segati. Numerosissime ricerche sono state pubblicate a testimonianza della sua utilità pratica (Gorlacher, 1987; Ceccotti e Togni, 1996; Hansen, 2000; Giubileo, 2005; Lourenco *et al.*, 2007; Iniguez, 2007; Ishiguri *et al.*, 2008; Mäkipää e Linkosalo, 2011).

La densità di una trave è espressione di una caratteristica globale, che può variare localmente in modo importante, anche in assenza di zone attaccate da funghi o insetti (tra legno giovanile e legno maturo, tra durame e alburno, tra due anelli di accrescimento ed anche all'interno degli anelli stessi). Il Pilodyn effettua una misura localizzata e dipendente dalle sole caratteristiche della parte più esterna della trave. La conseguenza di questo suo limite sta nel fatto che più misure effettuate in diversi punti sulla stessa trave, possono portare a risultati differenti. Al fine di ottenere una migliore stima della densità, mediante l'uso del Pilodyn, è stato identificato un valore medio, sulla base di un numero diverso di misurazioni, rilevate a distanza di 80 cm, ripetute per l'intera lunghezza della trave, e su tutte le facce.

Capitolo 3

Risultati

3.1 UMIDITÀ DEL LEGNO

3.1.1 Determinazione dell'umidità del legno

Le proprietà meccaniche del legno sono influenzate dalla sua umidità (Giordano, 1981; Wood Handbook, 2010). Eventuali sue variazioni tra una prova e l'altra hanno effetto sui valori di modulo elastico ottenuti. La norma UNI EN 384:2010 (Legno strutturale - Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica) riporta variazioni medie di E pari all'1% per ogni punto percentuale di variazione di umidità del legno, al di sotto del 20%.

La corretta determinazione dell'umidità del legno (anche indicata con MC) può essere effettuata solo col metodo gravimetrico (equazione 1), che prevede il prelievo di un campione, grande quanto l'intera sezione trasversale, da punti lontani dalle estremità, di ogni elemento ligneo.

$$u = \frac{P - P_0}{P_0} 100 \quad (1)$$

u = umidità del legno (%); p = peso umido; p_0 = peso anidro del legno.

Essendo tale metodo distruttivo, risulta realizzabile solo una volta terminate le prove, e non è quindi in grado di fornire informazioni circa le variazioni di umidità del legno nel tempo. Prima dell'esecuzione di ogni prova l'umidità del legno è stata misurata per mezzo di un igrometro di tipo capacitivo (modello Wagner L606). I valori ottenuti sono risultati costanti per tutto il tempo in cui le travi sono state oggetto di prova, con valori compresi tra 11 e 12%. Tali valori vanno comunque considerati come indicativi, per i limiti stessi dello strumento di misura, che fornisce un valore di umidità legato alle caratteristiche di pochi centimetri di profondità del legno e non rappresentativo dell'intera sezione. Per poter confrontare dati di E ottenuti in momenti diversi, è importante conoscere eventuali variazioni di MC, più che i suoi effettivi valori, allo scopo di distinguere le modificazioni del modulo elastico indotte dai tagli successivi da

quelle risultanti dalle eventuali differenze di umidità e, in caso i cambiamenti di umidità fossero significativi, tenerne conto nella elaborazione di *E*.

3.1.2 Variazione dell'umidità del legno durante le prove

Al fine di individuare eventuali variazioni nel contenuto di acqua nel tempo, ogni elemento è stato pesato più volte e le variazioni di peso analizzate

In Tabella 3.1 sono riportati i pesi registrati nel momento in cui sono state effettuate le prove statiche: ogni elemento è stato pesato integro, prima e dopo l'esecuzione di ogni taglio. Le variazioni di umidità sono state calcolate con riferimento ai diversi momenti: peso della trave integra al momento delle prove statiche/ peso della trave integra prima della realizzazione del primo taglio; peso della trave subito dopo la realizzazione del primo taglio /peso della trave prima della realizzazione del secondo taglio; peso della trave subito dopo la realizzazione del secondo taglio / peso della trave prima della realizzazione del terzo taglio.

Confrontando i valori di peso di ogni trave, misurati in periodi differenti (Maggio 2011-Ottobre 2011; Ottobre 2011 – Gennaio 2012; Gennaio 2012 – Marzo 2012),

Trave n°	Peso (kg)					Peso (kg)					Peso (kg)				
	elemento integro	prima I taglio	peso anidro (ipotizzando MC 11%)	MC prima I taglio	Δ MC	dopo I taglio	prima II taglio	peso anidro (ipotizzando MC 11%)	MC prima II taglio	Δ MC	dopo II taglio	prima III taglio	peso anidro (ipotizzando MC 11%)	MC prima III taglio	Δ MC
	mag-11	ott-11		(%)		ott-11	gen-12		(%)		gen-12	mar-12		(%)	
T01	25,00	24,84	22,52	10,3	-0,7	24,40	24,50	21,98	11,5	0,5	23,95	23,85	21,58	10,5	-0,5
T02	37,00	36,88	33,33	10,6	-0,4	36,40	37,00	32,79	12,8	1,8	36,45	36,40	32,84	10,8	-0,2
T03	56,00	56,17	50,45	11,3	0,3	55,35	55,55	49,86	11,4	0,4	54,75	54,65	49,32	10,8	-0,2
T04	55,00	54,49	49,55	10,0	-1,0	53,90	54,25	48,56	11,7	0,7	52,95	52,85	47,70	10,8	-0,2
T05	60,00	59,44	54,05	10,0	-1,0	58,80	59,10	52,97	11,6	0,6	58,10	57,90	52,34	10,6	-0,4
T06	40,00	39,51	36,04	9,7	-1,3	39,05	39,30	35,18	11,7	0,7	38,55	38,35	34,73	10,4	-0,6
T07	52,50	52,33	47,30	10,6	-0,4	51,50	51,70	46,40	11,4	0,4	50,90	50,45	45,86	10,0	-1,0
T08	40,00	40,11	36,04	11,3	0,3	39,55	39,80	35,63	11,7	0,7	39,15	39,00	35,27	10,6	-0,4
T09	92,50	91,54	83,33	9,9	-1,1	90,60	91,05	81,62	11,6	0,6	89,65	89,30	80,77	10,6	-0,4
T10	102,00	100,51	91,89	9,4	-1,6	99,50	99,80	89,64	11,3	0,3	98,35	97,85	88,60	10,4	-0,6
T11	78,00	77,29	70,27	10,0	-1,0	76,40	76,70	68,83	11,4	0,4	75,40	74,85	67,93	10,2	-0,8
T12	36,00	36,45	32,43	12,4	1,4	36,00	36,20	32,43	11,6	0,6	35,55	35,35	32,03	10,4	-0,6
T13	52,00	52,27	46,85	11,6	0,6	51,60	51,85	46,49	11,5	0,5	51,30	50,85	46,22	10	-1,0
media					-0,5					0,6					-0,5

Tabella 3.1 – Peso delle travi durante il periodo di prova e variazione di MC ipotizzando un valore iniziale dell'11%.

ma riferiti alle stesse dimensioni degli elementi (elemento integro – prima del I taglio; dopo il I taglio – prima del II taglio; dopo il II taglio – prima del III taglio) le eventuali variazioni di peso possono trovare giustificazione nella sola variazione di MC.

Dall'equazione 1, ipotizzando che il valore di umidità rilevato con l'igrometro fosse quello vero (11%), conoscendo peso e umidità del legno al momento iniziale, si può ricavare il peso anidro. Partendo da questo si può calcolare MC, per ogni trave in ogni momento successivo, applicando ancora l'equazione 1. Considerando ad esempio l'elemento T10, che ha fatto registrare una delle variazioni di peso più elevate tra Maggio e Ottobre 2011, ritenendo corretto il valore misurato con l'igrometro, il peso anidro dell'elemento sarebbe di circa 92 kg. Utilizzando tale valore si può calcolare il contenuto di acqua del legno in base al peso dell'elemento, prima della realizzazione del primo taglio, ottenendo un valore di poco superiore al 9%. In tal caso la variazione di MC, relativamente alla trave T10, nel periodo tra Maggio e Ottobre 2011, sarebbe stata pari all'1,6%. Ipotizzando che il valore di umidità fornito dall'igrometro non sia attendibile, si può ripetere la stessa operazione con valori di umidità differenti. Ipotizzando un valore iniziale di MC del 15%, e ripetendo i calcoli come descritto, si ottiene comunque, per la T10, una variazione di MC massima ancora inferiore al 2%. Volendo per assurdo ipotizzare che nessuna delle travi fosse al di sotto del punto di saturazione delle pareti cellulari ($MC \geq 30\%$; cosa impossibile vista la presenza di profonde fessurazioni da ritiro, la mancanza di attacchi fungini attivi, ecc.) solo per la trave T02 si calcola una variazione di MC di poco superiore al 2% tra Ottobre e Gennaio 2012. Le variazioni di peso sono contenute per tutte le travi, anche confrontando il peso delle travi ad inizio prove, con quelli misurati prima della realizzazione del terzo taglio (questi influenzati dalla quantità di legno asportato mediante i tagli). Se veramente il valore iniziale di MC fosse stato elevato, la variazione di peso di ogni trave sarebbe stata considerevole, tenendo conto che i pesi sono stati registrati in un periodo di quasi un anno e che le travi sono rimaste in laboratorio (e quindi in un luogo asciutto e caldo che favorisce la riduzione di MC). Il reale valore di MC può essere considerato quindi vicino a quello ottenuto mediante l'utilizzo dell'igrometro capacitivo (prossimo all'11%). In tal caso le variazioni di MC durante il periodo di esecuzione delle prove, può essere considerato come contenuto al di sotto del

2%. Questa variazione di umidità, in conformità a quanto previsto dalla UNI 384:2012 può avere determinato una variazione nei valori di E della stessa entità (sotto il 2%).

3.2 DENSITÀ DEL LEGNO

I valori di densità per le travi, calcolati come al § 2.4.1, sono riportati nella Tabella 3.2. Il valore medio risulta leggermente inferiore rispetto a quello riportato da Giordano (1982) per l'abete bianco, in condizioni di umidità normale, che è pari a 440 kg/m^3 .

Trave n°	ρ [kg/m^3]
T01	458
T02	488
T03	434
T04	408
T05	438
T06	319
T07	332
T08	379
T09	417
T10	479
T11	390
T12	329
T13	355
media	402
Min	319
Max	488
CV (%)	14

Tabella 3.2 – Densità degli elementi lignei (kg/m^3).

3.2.2 Variazione della densità media delle travi in seguito all'esecuzione dei tagli

La densità del legno è un parametro che influenza le prestazioni meccaniche tanto che, per la stessa specie, a parità di difetti, una maggiore densità comporta migliori proprietà meccaniche. Tuttavia la densità, è espressione di un valore medio che può, localmente, subire variazioni importanti (diversi tassi di accrescimento, differenze tra legno giovanile e legno maturo, ecc.). Di conseguenza anche la realizzazione dei tagli potrebbe aver influenzato la densità media delle travi, ed indirettamente le proprietà meccaniche, dal momento che si sarebbero potute asportare porzioni di legno più o meno denso dalle travi. Per individuare eventuali variazioni di densità, conseguenti ai tagli, e determinare se queste hanno avuto un effetto non trascurabile sulle proprietà meccaniche degli elementi lignei, nella Tabella 3.3 sono riportati i valori relativi a

volume e peso di ogni trave testata, determinati nelle diverse condizioni (elemento integro, dopo il primo taglio, dopo il secondo e dopo il terzo), e la loro variazione percentuale calcolata rispetto alla condizione iniziale. Il volume è stato calcolato sulla base delle dimensioni originali dell'elemento e delle dimensioni del taglio eseguito. Si può osservare come per i primi due tagli (profondità pari al 25 e 50% dell'altezza media della sezione) le variazioni di volume e peso calcolati siano decisamente contenuti. Per i tagli di profondità maggiore (75% dell'altezza media della sezione), ad una riduzione media del volume del 4%, corrisponde una riduzione media della massa pari al 5%. Immaginando la densità come omogeneamente distribuita in tutto l'elemento, ad una variazione di peso dovrebbe corrispondere la stessa variazione percentuale in volume. Tale differenza nei valori è probabilmente imputabile quasi esclusivamente alla variazione dell'umidità, e quindi del peso delle travi, nei differenti periodi di prova (§ 3.1), e in parte alla naturale variabilità di densità all'interno del tronco da cui le travi sono state ricavate (diversa densità tra legno giovanile e maturo o tra singoli anelli di accrescimento). Tuttavia, la variazione di densità che ne deriva nel tempo rimane molto contenuta in tutte le condizioni, tanto da poterla considerare ininfluenza, ai fini della valutazione delle variazioni di E e dovuta alle sole trascurabili variazioni di umidità del legno (§ 3.1).

3.3 RILIEVO DEI DIFETTI E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA

Tutte le travi sono state classificate, prima dell'inizio delle prove, conformemente alla UNI 11119:2004, ed i vari difetti sono stati determinati come riportato nel capitolo "Materiali e metodi" (§ 2.2.2 e 2.2.2.1). Tra i difetti presi in considerazione dalla norma adottata, ai fini dell'assegnazione delle Categorie solo quello relativo agli smussi è stato escluso, pur essendo stato rilevato. La scelta scaturisce dalla considerazione, condivisa da altri autori (Arriaga *et al.*, 2007; Mannucci *et al.*, 2011), che gli smussi non costituiscano un difetto in grado di condizionare negativamente le proprietà meccaniche del legno. Ogni trave è stata classificata sulla base delle caratteristiche rilevate osservando l'intero elemento. I risultati della classificazione sono riportati nella Tabella 3.4. La stessa Tabella contiene anche i dati relativi alle fessurazioni da ritiro, la cui

incidenza è stata determinata come valor medio della misura effettuata sulle due testate secondo la norma DIN 4074.

<i>Trave n°</i>	<i>smussi</i>	<i>nodi singoli</i>	<i>gruppo di nodi</i>	<i>inclinazione fibratura (%)</i>	<i>Fessurazioni da ritiro (0=non passanti; 1=passanti)</i>	<i>Categoria</i>	<i>Fessurazioni da ritiro (DIN 4074)</i>
T01	0,13	0,18	0,00	10	0	I	0,58
T02	0,19	0,21	0,00	9	0	II	0,28
T03	0,09	0,09	0,00	3	0	I	0,22
T04	0,25	0,11	0,00	4	0	I	0,49
T05	0,21	0,09	0,00	7	0	I	0,55
T06	0,10	0,20	0,00	9	0	I	0,28
T07	0,31	0,39	0,20	8	0	III	0,00
T08	0,17	0,22	0,00	18	0	II	0,57
T09	0,11	0,22	0,00	25	0	III	0,44
T10	0,11	0,10	0,00	4	0	I	0,23
T11	0,19	0,27	0,00	13	0	II	0,52
T12	0,17	0,14	0,04	12	0	II	0,54
T13	0,31	0,18	0,00	12	0	II	0,38

Tabella 3.4 – Valori dei principali difetti rilevati e Categoria assegnata. In grigio i difetti che hanno determinato l’assegnazione alla Categoria.

I Grafici 3.1 e 3.2 riportano rispettivamente i valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$, che verranno presentati in seguito, in relazione alla Categoria assegnata alle travi. Una generale diminuzione dei valori di E può essere osservata, procedendo dalla Categoria superiore (I) a quella inferiore (III), a testimonianza della relazione esistente tra Categoria assegnata e E . L’inclinazione della fibratura è stata determinata su tutte e quattro le facce mentre, i nodi, il cui effetto diventa importante solo nel caso in cui il tratto provato a flessione per la determinazione del valore di E sia breve (Hanhijärvi *et al.*, 2005; Machado e Palma, 2010), sono stati rilevati separatamente per ogni faccia dell’elemento, solo lungo il tratto centrale, corrispondente a quello considerato per la determinazione di $E_{m,l}$ (§. 2.4.2.2).

<i>Trave n°</i>	<i>volume elementi (m³)</i>				<i>peso elementi (kg)</i>				<i>variazione in volume (%)</i>			<i>variazione in peso (%)</i>		
	<i>elemento integro</i>	<i>dopo I taglio</i>	<i>dopo II taglio</i>	<i>dopo III taglio</i>	<i>elemento integro</i>	<i>dopo I taglio</i>	<i>dopo II taglio</i>	<i>dopo III taglio</i>	<i>integra/I taglio</i>	<i>integra/II taglio</i>	<i>integra/III taglio</i>	<i>integra/I taglio</i>	<i>integra/II taglio</i>	<i>integra/III taglio</i>
T01	0,055	0,054	0,053	0,052	25,0	24,4	24,0	23,3	-2	-3	-5	-2	-4	-7
T02	0,076	0,075	0,074	0,073	37,0	36,4	36,5	35,8	-1	-3	-4	-2	-1	-3
T03	0,129	0,127	0,126	0,124	56,0	55,4	54,8	53,9	-1	-3	-4	-1	-2	-4
T04	0,135	0,133	0,132	0,131	55,0	53,9	53,0	51,9	-1	-2	-3	-2	-4	-6
T05	0,137	0,136	0,134	0,133	60,0	58,8	58,1	57,3	-1	-2	-3	-2	-3	-5
T06	0,126	0,124	0,123	0,121	40,0	39,1	38,6	37,9	-1	-2	-3	-2	-4	-5
T07	0,158	0,156	0,155	0,153	52,5	51,5	50,9	50,0	-1	-2	-4	-2	-3	-5
T08	0,106	0,104	0,103	0,102	40,0	39,6	39,2	38,5	-1	-2	-4	-1	-2	-4
T09	0,222	0,220	0,217	0,215	92,5	90,6	89,7	88,4	-1	-2	-3	-2	-3	-4
T10	0,213	0,211	0,209	0,207	102,0	99,5	98,4	97,0	-1	-2	-3	-2	-4	-5
T11	0,200	0,198	0,196	0,194	78,0	76,4	75,4	74,2	-1	-2	-3	-2	-3	-5
T12	0,110	0,108	0,107	0,105	36,0	36,0	35,6	34,9	-1	-2	-4	0	-1	-3
T13	0,146	0,144	0,143	0,141	52,0	51,6	51,3	50,2	-1	-2	-4	-1	-1	-3
media									-1	-2	-4	-2	-3	-5

Tabella 3.3 - Volume, peso e variazioni percentuali dei valori dei singoli elementi nelle diverse condizioni di prova.

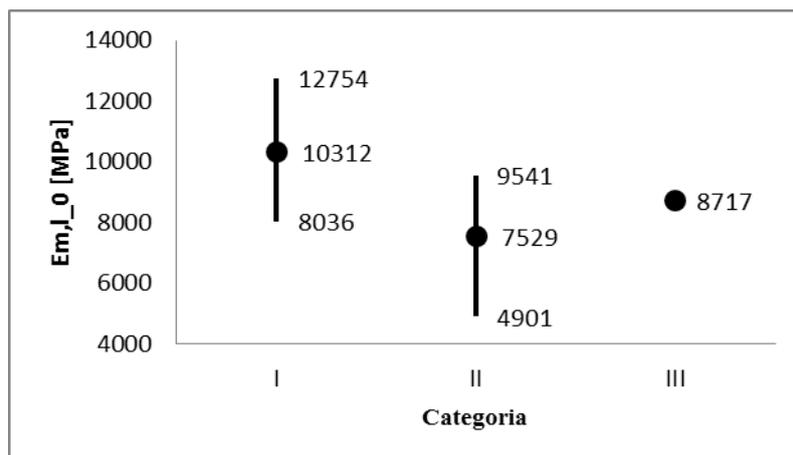


Grafico 3.1 – Valori minimi, medi e massimi di $E_{m,l}$ per Categoria assegnata (elementi interi).

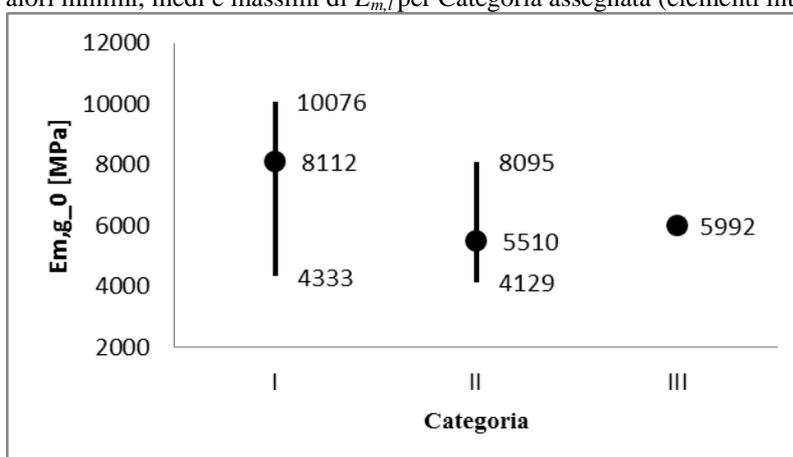


Grafico 3.2 – Valori minimi, medi e massimi di $E_{m,g}$ per Categoria assegnata (elementi interi).

Le quattro facce sono state numerate in modo casuale e progressivo. I valori relativi ai nodi ed all'inclinazione della fibratura, così determinati, sono riportati nella Tabella 3.5.; i nodi sulla faccia all'intradosso sono evidenziati, nella Tabella, in grigio poiché saranno utili nelle elaborazioni successive. Confrontando i dati relativi all'incidenza dei nodi nel tratto centrale di prova (Tabella 3.5), con quelli riferiti all'intero elemento (Tabella 3.4), si osserva che solo per gli elementi T07 e T09 il valore individuato è tale da determinare l'assegnazione a Categorie differenti: trave T07 da Categoria III per l'intero elemento a II per il tratto centrale, trave T09 da Categoria II per l'intero elemento a I per il tratto centrale. Quasi tutte le travi provate presentano midollo centrato, cosa consueta per travi di tali dimensioni. Nella Tabella 3.6 è riportata la posizione del midollo, espressa come rapporto tra la distanza del midollo dalla base (media delle due testate) e altezza della sezione, che servirà per le analisi successive.

Trave n°	Nodi singoli (tratto centrale di prova)				Inclinazione fibratura (intero elemento, valori in %)			
	faccia dell'elemento				faccia dell'elemento			
	1	2	3	4	1	2	3	4
T01	0,18	0,00	0,09	0,00	10	2	4	2
T02	0,14	0,21	0,17	0,21	9	7	2	6
T03	0,00	0,00	0,09	0,00	3	3	3	3
T04	0,00	0,00	0,00	0,00	4	4	4	3
T05	0,09	0,09	0,00	0,00	7	6	4	4
T06	0,13	0,11	0,08	0,11	3	9	7	7
T07	0,20	0,26	0,20	0,20	8	8	7	8
T08	0,19	0,19	0,13	0,22	14	18	15	17
T09	0,19	0,19	0,16	0,00	10	18	25	16
T10	0,09	0,10	0,08	0,10	4	3	4	3
T11	0,19	0,25	0,19	0,15	11	13	13	13
T12	0,14	0,14	0,14	0,14	5	3	12	6
T13	0,13	0,13	0,10	0,17	7	12	12	7

Tabella 3.5- Nodi singoli ed inclinazione della fibratura determinati su ognuna delle facce, riferiti al solo tratto centrale di prova (nodi) e all'intero elemento (inclinazione della fibratura). In grigio i valori misurati all'intradosso.

Trave n°	H (mm)	C (mm)	posizione midollo (rapporto C/H)
T01	160	71	0,44
T02	183	88	0,48
T03	223	156	0,70
T04	238	125	0,53
T05	240	124,5	0,52
T06	230	103,5	0,45
T07	210	211	-
T08	218	93	0,43
T09	268	127	0,47
T10	276	144	0,52
T11	264	136	0,52
T12	249	108,5	0,44
T13	258	127	0,49

Tabella 3.6- Posizione media del midollo rispetto all'altezza della sezione. Elemento T07 con midollo fuori sezione. H = altezza media della sezione; C = distanza midollo/intradosso.

3.4 EFFETTO DEI TAGLI SULLA VALUTAZIONE DEI NODI AI FINI DELLA CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA

L'esecuzione dei tagli lungo l'intradosso degli elementi divide la faccia in due parti che possono essere considerate come distinte, almeno per tutta la profondità del taglio. I nodi, relativamente al tratto centrale di prova, sono stati nuovamente misurati dopo la realizzazione del primo taglio, e la loro incidenza calcolata distintamente per le due

porzioni di legno divise dal taglio (sempre conformemente alla UNI 11119). Nell'esempio riportato nella Figura 3.1 il diametro minimo del nodo (d), che comparare all'intradosso, rimane invariato anche dopo l'esecuzione del taglio; ma la dimensione della faccia su cui esso incide diminuisce (da $b1$ a $b2$). Le due porzioni separate dal taglio presentano quindi caratteristiche differenti, poiché il nodo compare solo su una di esse, e diverso sarà anche il loro comportamento una volta sollecitate a flessione.

La presenza di due porzioni appaiate, con caratteristiche meccaniche diverse, fa sì che la più debole delle due influenzi negativamente le prestazioni meccaniche dell'insieme (§ 1.2.4.1). La meno rigida, inflettendosi maggiormente sotto carico, tenderà a deformarsi di più e la maggior parte del carico ad essere assorbito dalla porzione più rigida, sulla quale però si verrà a realizzare una sollecitazione molto elevata, che nuovamente si tradurrà in una maggiore inflessione dell'elemento.

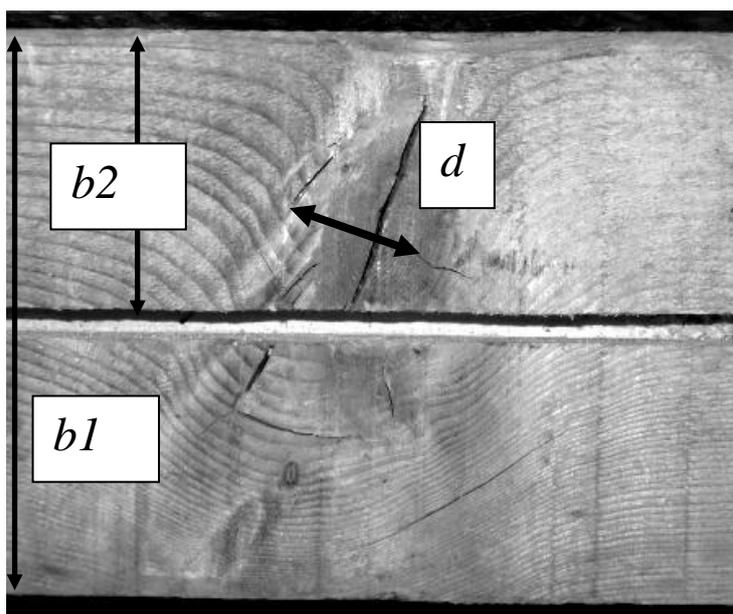


Figura 3.1 – Diversa incidenza dello nodo dopo l'esecuzione dei tagli.

3.4.1 Variazione della Categoria assegnata alle travi in funzione dell'effetto dei tagli sui nodi

Il valore assegnato ai nodi presenti nel tratto centrale dell'intradosso, e la relativa Categoria (calcolati sulla base della UNI 11119), sono riportati nella Tabella 3.7. Confrontandoli con quelli assegnati prima della realizzazione dei tagli, si può notare come tre travi (T01, T02, T07, T09, T10 e T12) il valore attribuito al difetto nodi aumenti fino a raddoppiare; Sebbene i valori di tensione ammissibile e di E medio

riportati nell'Appendice A (informativa) della UNI 11119 non siano sempre attendibili (Piazza e Riggio, 2008; Cavalli e Togni, 2011), la variazione della Categoria assegnata è comunque considerabile come indice di scadimento della qualità degli elementi e, di conseguenza, il taglio eseguito porterebbe, in base alla norma di classificazione, ad un peggioramento della qualità del materiale.

<i>Nodi singoli (tratto centrale di prova - intradosso) misurati come indicato in UNI 11119</i>					
<i>Ttrave n°</i>	<i>prima del taglio (a)</i>	<i>dopo il taglio (b)</i>	<i>variazione (b/a)</i>	<i>numero di nodi</i>	<i>Categoria</i>
T01	0,18	0,38	2,1	1	S
T02	0,21	0,32	1,5	1	III
T03	0,00	0,00	-	0	I
T04	0,00	0,00	-	0	I
T05	0,00	0,00	-	0	I
T06	0,11	0,12	1,0	2	I
T07	0,20	0,40	2,0	3	S
T08	0,19	0,27	1,4	2	III
T09	0,19	0,25	1,3	2	II
T10	0,10	0,24	2,2	3	II
T11	0,15	0,26	1,7	1	II
T12	0,14	0,35	2,5	3	S
T13	0,17	0,18	1,1	2	I

Tabella 3.7 – Variazione dell'incidenza dei nodi nel tratto centrale dell'intradosso (S = scartato).

Anche i nodi nelle parti interne del legno possono interagire con i tagli, determinando variazioni tali da influenzare sia la classificazione, sia le proprietà meccaniche degli elementi. Ogni taglio genera infatti due nuove facce parzialmente nascoste, le cui caratteristiche andrebbero considerate ai fini della classificazione. Nella maggior parte delle travi testate, il midollo è presente e approssimativamente centrato, analogamente a quanto succede per la maggior parte delle travi antiche oltre certe dimensioni. I nodi, che partono dal midollo, potranno quindi essere interessati dal taglio, in funzione della posizione del midollo stesso, dell'orientamento dei rami nell'albero da cui deriva l'elemento, della posizione e della profondità del taglio. La Figura 3.2 schematizza alcuni possibili casi. La condizione A corrisponde a quella dell'elemento T07, l'unico in cui il midollo non è presente: i nodi sono interessati dal primo taglio che, dividendo l'intradosso in due parti, riduce le dimensioni delle facce su cui i nodi stessi sono

presenti. Il successivo approfondimento del taglio non determina invece ulteriori effetti sui nodi poiché questi risultano troppo lontani dal taglio. La figura B rappresenta la sezione di un elemento ligneo con midollo incluso e centrato: il nodo 1 viene interessato dal primo taglio. Il successivo approfondimento del taglio raggiunge il midollo, e taglia quindi le fibre del legno in prossimità dei nodi 1 e 2. L'effetto sulle proprietà meccaniche rimane però contenuto, poiché il taglio interessa i nodi, e le zone circostanti, in prossimità dell'asse neutro dell'elemento sollecitato a flessione, cioè in corrispondenza della zona in cui la sollecitazione viene considerata nulla, di conseguenza anche l'indebolimento dovuto al taglio dei nodi, in prossimità dell'asse neutro rimane contenuto. Il terzo taglio avrà invece effetto sul nodo 3. Nella Figura C la disposizione dei nodi è analoga a quella della B ma il midollo, seppur centrato orizzontalmente rispetto alla sezione, risulta spostato verso l'intradosso dell'elemento. A differenza della situazione descritta per B il secondo taglio non raggiunge il midollo in corrispondenza dell'asse neutro, per cui un certo effetto sulle proprietà meccaniche del legno è prevedibile. La Figura D serve allo scopo di evidenziare come non solo la posizione del midollo, ma anche l'orientamento dei nodi all'interno della sezione, sia importante al fine di determinarne le interazioni rispetto ai tagli. In tal caso infatti, la realizzazione del primo e del terzo taglio non esercitano effetti sui nodi, mentre il secondo taglio eserciterà o meno un effetto in funzione della posizione del midollo. Nella Figura E è riportato un caso particolare in cui il midollo è presente ma non centrato. In queste condizioni solo il primo dei tagli esercita un effetto sui nodi 1 e 2, mentre quelli successivi non interesseranno ulteriormente nessuno dei nodi.

I casi possibili nella realtà possono essere moltissimi, ed il reale effetto sulle proprietà meccaniche non sempre facile da prevedere, poiché legato a diverse variabili: posizione del midollo rispetto ai tagli; profondità di taglio e suo spessore; dimensione, numerosità ed orientamento dei rami nel tronco. Nella pratica poi il tutto diventa più complicato poiché complicata è la determinazione della reale posizione del midollo (soprattutto per specie legnose come l'abete e per elementi di grandi dimensioni, per il diverso andamento della fibratura in funzione della distanza dal midollo) qualora le testate degli elementi non siano accessibili. Tuttavia, per l'effetto che esercitano, le nuove facce verticali generate a seguito dei tagli, e le loro caratteristiche, andrebbero considerate ai fini della classificazione.

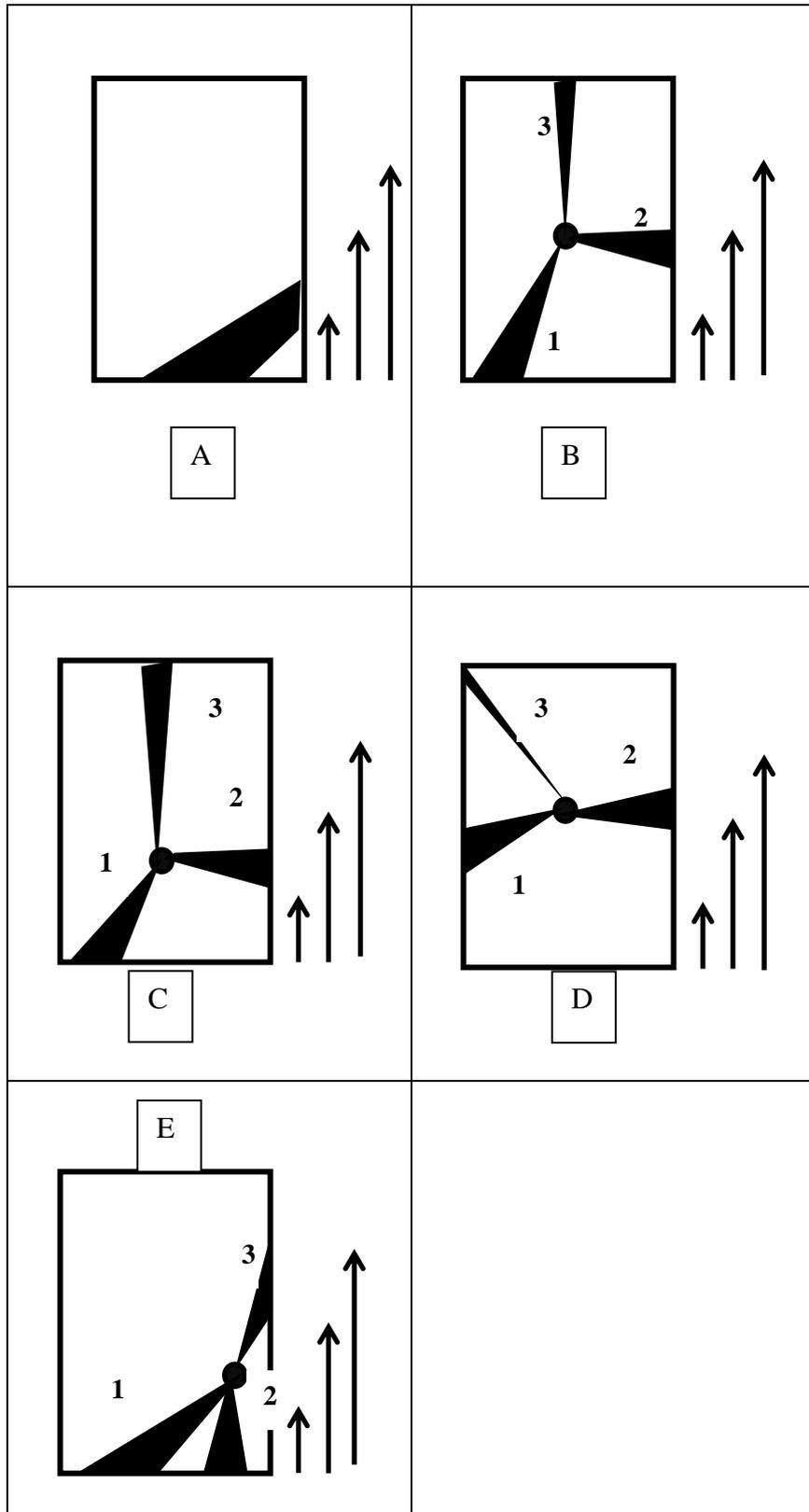


Figura 3.2 – Interazione tra tagli e nodi all'interno dell'elemento. Le frecce indicano le tre diverse profondità di taglio rispetto all'altezza della sezione (25%, 50% e 75%).

3.4.2 Considerazioni sulla scelta della Categoria da assegnare alle travi dopo la realizzazione dei tagli

Quale Categoria deve essere quindi assegnata ad un elemento ligneo sottoposto a tali tipi di interventi? Quella stabilita originariamente o quella determinata dopo l'esecuzione dei tagli? Anche se stabilire le relazioni tra classificazione delle travi antiche e interventi di rinforzo non è l'obiettivo di questo lavoro, non si può fare a meno di sottolineare un chiaro problema pratico. Le norme di classificazione del legno assegnano un segato ad una Categoria sulla base delle caratteristiche dei difetti presenti, considerando il peggior valore individuato per ogni difetto. La Categoria fornisce indicazioni circa la qualità di un elemento, tanto per il legno nuovo, quanto per quello antico. Se i rapporti dimensionali dei difetti cambiano, anche la Categoria assegnata ad un segato può esserne influenzata. Immaginando una trave, come quella riportata nella Figura 3.1, la realizzazione dei tagli porta ad un peggioramento del valore attribuito al difetto "nodi singoli", e l'assegnazione della stessa ad una Categoria inferiore. In sostanza la realizzazione anche di un solo taglio, genera una nuova trave, le cui caratteristiche andrebbero riconsiderate, poiché assegnare ad essa, la stessa Categoria assegnata prima della realizzazione del taglio, potrebbe portare ad errori grossolani. Nel caso pratico della pianificazione di interventi di rinforzo, lo scopo della Classificazione secondo la Resistenza è quello di fornire indicazioni circa la qualità del materiale (che è espressione delle prestazioni meccaniche), al fine di poter meglio progettare gli interventi. Da questo punto di vista la Categoria che interessa è quella assegnata dopo la realizzazione dei tagli, sia che questa sia rimasta identica o che sia cambiata a seguito dei tagli realizzati.

3.5 MODULO ELASTICO

Le travi sono state testate, prima della realizzazione dei tagli, nel mese di Maggio 2011 ed i valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ ottenuti sono riportati nella Tabella 3.8. Le differenze tra i due valori di E trovano spiegazione nell'influenza del modulo di taglio e dei difetti sull'intero elemento che si riscontrano quando si determina il valore di $E_{m,g}$ (§ 2.4.2.4). Tali differenze, in certi casi arrivano ad essere molto elevate: gli elementi T06 e T12 presentano valori di $E_{m,g}$ di circa la metà rispetto a quelli di $E_{m,l}$. La stessa tabella riporta anche i valori del rapporto tra E e densità, comunemente considerato come indicatore di

qualità. Gli elementi T01, T07 e T12 presentano valori di $E_{m,l}/\rho$ pari o superiore a 26, che corrisponde al valore deducibile dalla UNI EN 338:2009 (Legno Strutturale – Classi di Resistenza) per la Classe di Resistenza C27 (E medio = 11.5 GPa; ρ media = 450 kg/m³; $E/\rho = 25.6$). Il valore medio del rapporto E/ρ , calcolato considerando tutti gli elementi, è pari a 22 e risulta di poco inferiore al valore previsto dalla UNI EN 338 per la Classe C16 (E medio = 8.0 GPa; ρ media = 370 kg/m³; $E/\rho = 21.6$).

<i>Trave n°</i>	<i>E_{m,l,0} [MPa]</i>	<i>E_{m,g,0} [MPa]</i>	<i>E_{m,l} /ρ</i>	<i>E_{m,g} /ρ</i>
T01	12754	10076	28	22
T02	9541	8095	20	17
T03	10682	9582	25	22
T04	8036	7241	20	18
T05	10576	9866	24	23
T06	7616	4333	24	14
T07	8717	5992	26	18
T08	4901	4922	13	13
T09	5761	4129	14	10
T10	10756	7574	22	16
T11	7711	5073	20	13
T12	9207	4643	28	14
T13	8051	6200	23	17
min	4901	4129	13	10
max	12754	10076	28	23
media	8793	6748	22	17
CV (%)	24	32	22	24

Tabella 3.8 – Valori di Modulo Elastico Locale ($E_{m,l,0}$) e Globale ($E_{m,g,0}$) determinati sulle travi integre e rapporto E/ρ .

3.5.1 Relazioni tra Moduli Elastici e caratteristiche delle travi

In questo paragrafo verranno presentate solo alcune relazioni tra i valori di E e le caratteristiche degli elementi, considerate utili ai fini della ricerca, per individuare eventuali interazioni tra tagli e caratteristiche delle travi (nodi e inclinazione della fibratura) e tra tagli e densità. L'interpretazione delle relazioni non è sempre agevole, poiché i dati sono stati ottenuti a partire da elementi testati in prove con geometrie differenti (in tali circostanze l'effetto dei difetti ed il contributo della sollecitazione di taglio possono influenzare in modo differente i valori di E) e per la scarsissima disponibilità di dati bibliografici riferiti a travi antiche della stessa specie e dimensioni paragonabili.

Le principali relazioni sono riportate nei Grafici 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8, unitamente ai valori di significatività di R^2 : $p < 0,01$ (***); $0,01 < p < 0,05$ (**); $0,05 < p < 0,1$ (*) riassunti anche nella Tabella 3.9. In questa ricerca la qualità della correlazione verrà indicata sulla base delle indicazioni fornite dal “Joint Committee on Structural Safety” che riporta, per il coefficiente di correlazione r , le seguenti soglie: $r \geq 0.8$ correlazione alta; $0.8 > r \geq 0.6$ correlazione media; $0.6 > r \geq 0.4$ correlazione bassa; $0.4 > r \geq 0.2$ correlazione molto bassa; $r < 0.2$ nessuna correlazione.

Sia $E_{m,l}$ che $E_{m,g}$ mostrano una correlazione media con l’inclinazione della fibratura (R^2 rispettivamente di 0.5^{***} e 0.41^{**}). La relazione tra densità e $E_{m,l}$ risulta invece bassa (R^2 0.24^{**}) contro un valore di 0.49^{***} calcolato rispetto a $E_{m,g}$. Essendo $E_{m,l}$ riferito al solo tratto centrale di prova, la relazione tra i suoi valori ed i nodi è stata determinata considerando i valori riferiti allo stesso tratto.

	<i>Nodi singoli</i>	<i>Inclinazione fibratura</i>	ρ
E_{m,l_0}	0,27*	0,47**	0,24**
E_{m,g_0}	0,24*	0,41**	0,49***

Tabella 3.9 – Relazioni tra valori di E e principali difetti (nodi singoli ed inclinazione della fibratura) e densità.

Il valore di $E_{m,l}$ risente non solo della dimensione dei nodi ma anche del numero di nodi presenti, di conseguenza per il calcolo della relazione tra nodi e $E_{m,l}$ è stato escluso l’elemento T04, che non presenta nodi nel tratto di prova; poiché è evidente che il valore di $E_{m,l}$ non può essere influenzato dai nodi presenti. La relazione tra $E_{m,g}$ e nodi è invece stata calcolata utilizzando tutti i dati provenienti dai 13 elementi, e determinati sull’intera lunghezza della trave. I valori di R^2 di 0.28^* e 0.24^* ottenuti rispettivamente per $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ risultano leggermente superiori a quelli riportati da García *et al.* (2007) per segati di grandi dimensioni di Pino Laricio e Pino Silvestre.

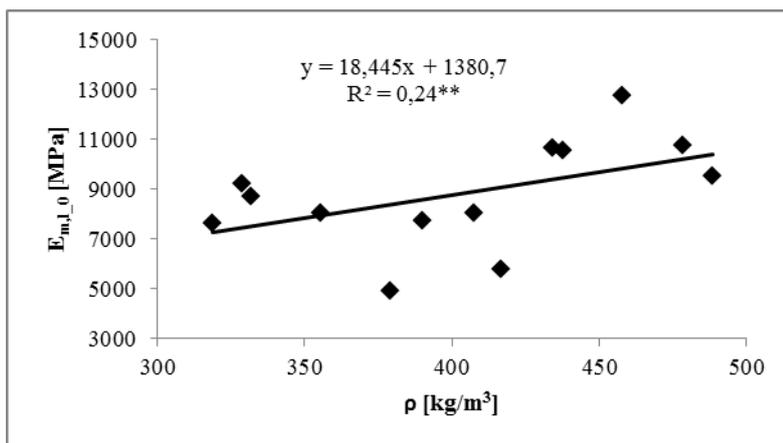


Grafico 3.3 – Relazione tra densità e Modulo Elastico Locale prima dell'esecuzione dei tagli.

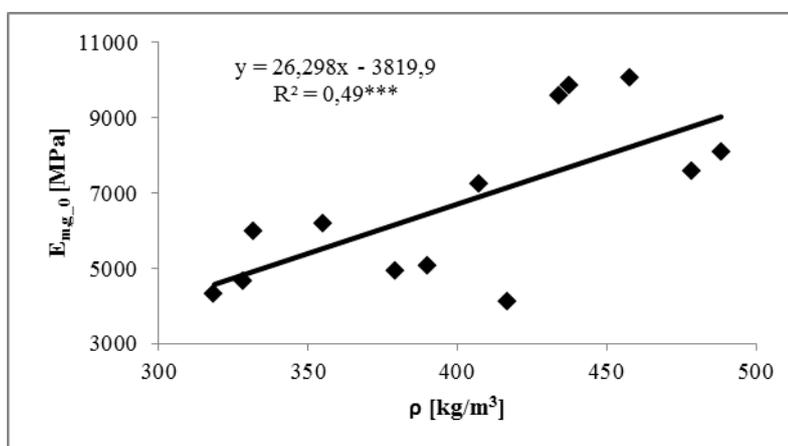


Grafico 3.4 - Relazione tra densità e Modulo Elastico Globale prima dell'esecuzione dei tagli.

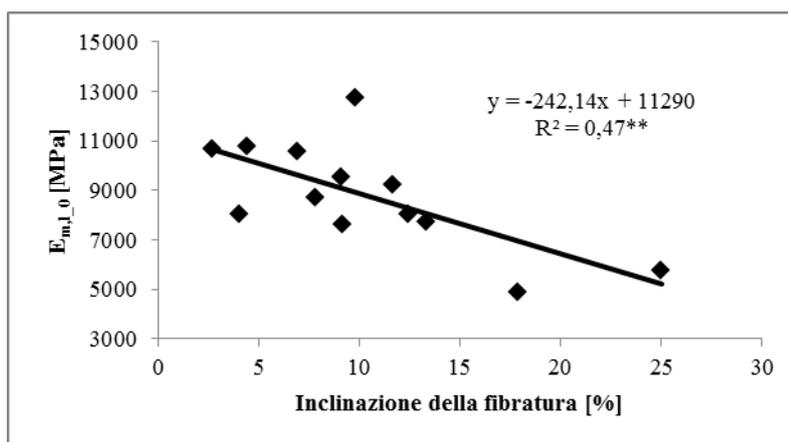


Grafico 3.5 - Relazione tra inclinazione della fibratura e Modulo Elastico Locale prima dell'esecuzione dei tagli.

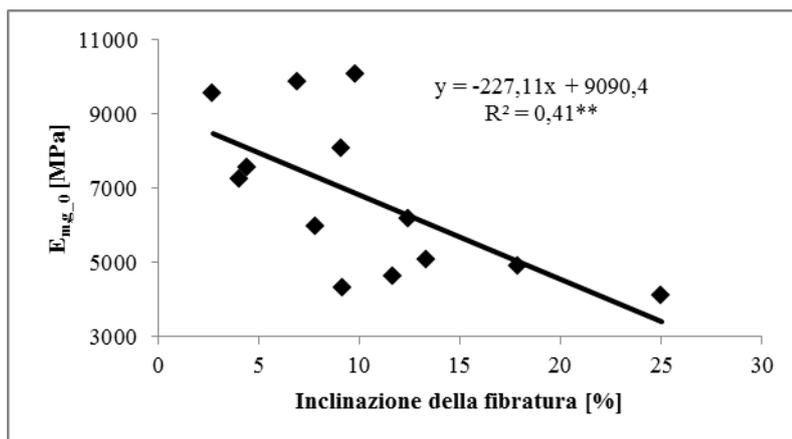


Grafico 3.6 - Relazione tra inclinazione della fibratura e Modulo Elastico Globale prima dell'esecuzione dei tagli.

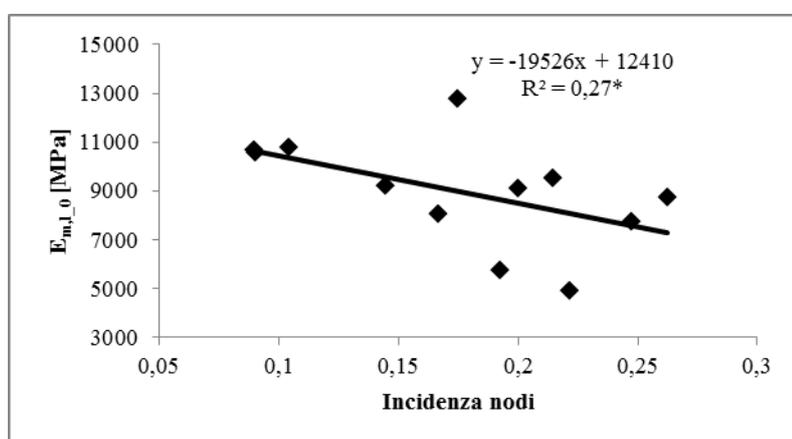


Grafico 3.7 - Relazione tra incidenza dei nodi e Modulo Elastico Locale prima dell'esecuzione dei tagli.

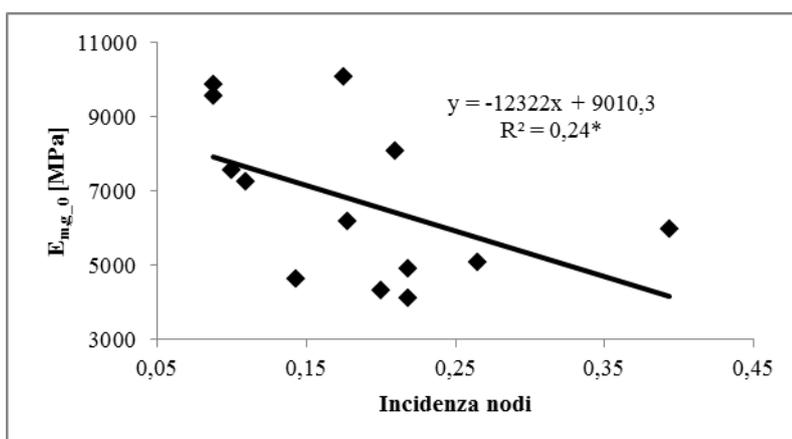


Grafico 3.8 - Relazione tra incidenza dei nodi e Modulo Elastico Globale prima dell'esecuzione dei tagli.

3.6 VARIAZIONE DEI MODULI ELASTICI STATICI DOPO LA REALIZZAZIONE DEI TAGLI

I valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ sono stati determinati sulla trave integra e dopo la realizzazione di ciascuno dei tagli a profondità diversa, calcolati sulla base delle dimensioni e del momento d'inerzia effettivi delle sezioni post taglio. I risultati sono riportati nelle Tabelle 3.10 e 3.11. Ogni valore di E è indicato mediante un indice numerico, corrispondente al momento in cui è stata eseguita la prova: $_0$ per le travi integre; $_1$ per le travi dopo la realizzazione del taglio con profondità pari al 25% dell'altezza della sezione media; $_2$ per le travi dopo la realizzazione del taglio con profondità pari al 50% dell'altezza della sezione media e $_3$ per le travi dopo la realizzazione del taglio con profondità pari al 75% dell'altezza della sezione media. Nella stessa Tabella vengono anche riportate le variazioni percentuali di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$.

Sulla base delle considerazioni che riguardano le variazioni di umidità delle travi durante il periodo di prova (§ 3.1) e sulla naturale variabilità che si ottiene ripetendo la stessa prova sullo stesso provino, possiamo considerare una variazione di E pari o inferiore al 5% come trascurabile, cioè non imputabile ad una effettiva variazione delle proprietà meccaniche del legno

3.6.1 Variazione del Modulo Elastico Locale

Primo taglio: le variazioni di $E_{m,l}$, per le travi con taglio pari al 25% dell'altezza media della sezione, calcolate rispetto a quelle integre, risultano trascurabili nella maggior parte dei casi: T02, T03, T04, T06, T08, T09, T11 e T13. Per gli elementi T01, T05 e T10 tali differenze diventano sensibili (comprese tra il 7% ed il 9%); mentre per T07 e T12 raggiungono valori prossimi al 25%.

Secondo taglio: dopo l'approfondimento del taglio, fino al 50% dell'altezza media della sezione di ogni trave, le variazioni di $E_{m,l}$, rispetto ai valori ottenuti per il primo taglio, risultano molto contenute, con valori superiori al 5% solo per gli elementi T01 e T05.

Terzo taglio: con il successivo approfondimento del taglio solo due elementi subiscono una riduzione di $E_{m,l}$ importante (T08 e T13), rispetto al secondo taglio, con valori dal 16% al 21%. Il valore medio della variazione massima di $E_{m,l}$ è del 12%, con 3 elementi che hanno subito una riduzione superiore al 20% (T07, T08 e T12), e due (T05 e T13) che hanno subito una riduzione di $E_{m,l}$ di poco inferiore al 20%.

Per 5 degli elementi testati le variazioni massime di $E_{m,l}$ possono essere considerate come assolutamente trascurabili, poiché inferiori al 5% (T02, T03, T04, T06, T09 e T11), per quattro elementi la riduzione è compresa tra il 9% ed il 19% (T01, T05, T10 e T13). Per i restanti tre (T07, T08 e T12) $E_{m,l}$ varia tra il 21% ed il 29%.

<i>Trave</i> <i>n°</i>	E_{m,l_0}	E_{m,l_1}	E_{m,l_2}	E_{m,l_3}	$\frac{E_{m,l_1}}{E_{m,l_0}}$	$\frac{E_{m,l_2}}{E_{m,l_0}}$	$\frac{E_{m,l_3}}{E_{m,l_0}}$	$\frac{E_{m,l_2}}{E_{m,l_1}}$	$\frac{E_{m,l_3}}{E_{m,l_2}}$	<i>max var</i> $E_{m,l}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
T01	12754	12036	11277	11555	6	12	9	6	-2	12
T02	9541	9590	9733	9749	-1	-2	-2	-1	0	-1
T03	10682	10724	10844	10852	0	-2	-2	-1	0	0
T04	8036	8053	7877	7960	0	2	1	2	-1	2
T05	10576	9578	8721	8774	9	18	17	9	-1	18
T06	7616	7522	7415	7198	1	3	5	1	3	5
T07	8717	6411	6500	6199	26	25	29	-1	5	29
T08	4901	4835	4861	3858	1	1	21	-1	21	21
T09	5761	5587	5565	5616	3	3	3	0	-1	3
T10	10756	9889	9903	9553	8	8	11	0	4	11
T11	7711	7595	7677	7624	2	0	1	-1	1	2
T12	9207	7100	7039	7203	23	24	22	1	-2	24
T13	8051	8061	7758	6519	0	4	19	4	16	19
min	4901	4835	4861	3858	-1	-2	-2	-1	-2	-1
max	12754	12036	11277	11555	26	25	29	9	21	29
media	8793	8229	8090	7897	6	7	10	1	3	11
CV (%)	24	25	24	27						

Tabella 3.10 – Valori di $E_{m,l}$ per le travi integre e dopo la realizzazione di ogni taglio e variazioni percentuali.

3.6.2 Variazione del Modulo Elastico Globale

Le variazioni di $E_{m,g}$ sono riportate in Tabella 3.11. Per i motivi già illustrati, analogamente a quanto fatto per $E_{m,l}$, i valori di variazione di $E_{m,g}$ inferiori al 5% sono stati considerati come trascurabili.

Primo taglio: la realizzazione del primo taglio ha determinato una riduzione di $E_{m,g}$ pari o inferiore al 5% per molte travi (T02, T03, T04, T06, T07, T10 e T13). Le altre travi hanno mostrato una riduzione di $E_{m,g}$ compresa tra il 7% ed il 25% (in ordine crescente T11, T09, T05, T01, T12 e T08).

Secondo taglio: l'approfondimento del taglio fino al 50% dell'altezza della sezione ha determinato un'ulteriore diminuzione del valore di $E_{m,g}$ (calcolato come differenza percentuale tra E_{m,g_1} e E_{m,g_2}): la variazione è rimasta contenuta per molti elementi

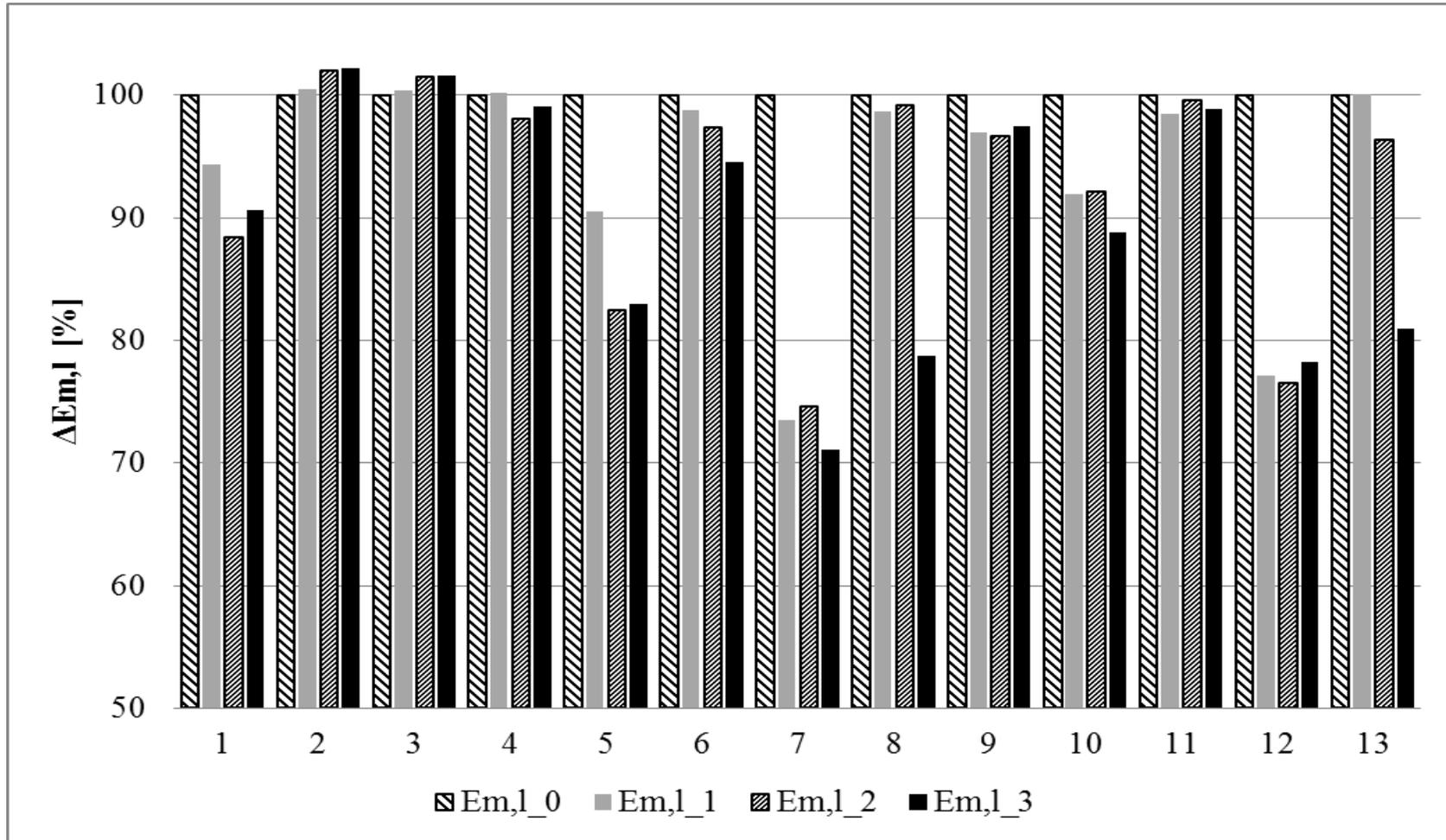


Grafico 3.9 – Variazioni percentuali di $E_{m,l}$ per le 13 travi ($E_{m,l_0} = 100\%$).

(T01, T03, T06, T07, T08, T09, T11 e T13) mentre per T02, T04, T05, T10 e T12, è risultata compresa tra l'8% ed il 23%.

Variazioni consistenti di $E_{m,g}$, a seguito della realizzazione del secondo taglio, hanno interessato sia elementi che non avevano subito variazioni dopo il primo taglio (T02, T04 e T10), sia elementi che avevano fatto registrare variazioni importanti (T05 e T12). D'altra parte, molte delle travi, indipendentemente dalle variazioni di $E_{m,g}$ fatte registrare dopo il primo taglio, non hanno subito variazioni di $E_{m,g}$ importanti dopo la realizzazione del secondo taglio (T01, T03, T06, T07, T08, T09, T11, e T13).

Terzo taglio: con la realizzazione del terzo taglio (profondità pari al 75% dell'altezza della sezione media) ben cinque elementi hanno fatto registrare diminuzioni importanti di $E_{m,g}$ rispetto al taglio precedente (T04, T05, T11, T12 e T13), con variazioni comprese tra il 9% ed il 19%. Tutti gli altri elementi hanno subito invece variazioni ridottissime (massimo 2%) rispetto ai valori ottenuti in seguito al secondo taglio. Ad esclusione dei soli elementi T01 e T08, gli elementi che hanno subito in assoluto le maggiori variazioni di $E_{m,g}$ (valori superiori al 15%), hanno anche subito variazioni elevate dopo la realizzazione del terzo taglio. Complessivamente la variazione media di $E_{m,g}$, rispetto alla condizione originale (travi integre), è risultata pari al 19%, e nessuno degli elementi ha subito variazioni di $E_{m,g}$ pari o inferiori al 5%.

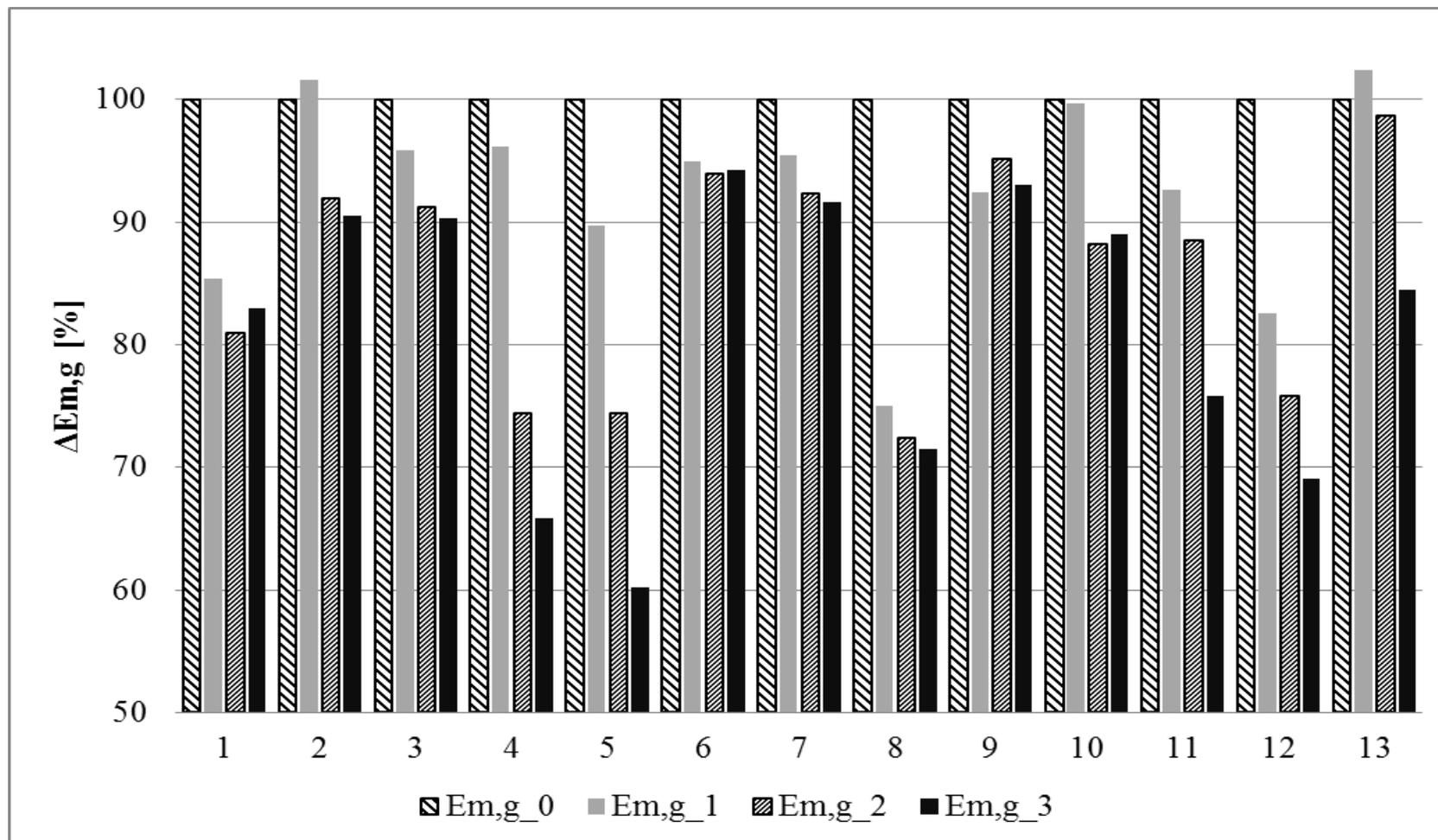


Grafico 3.10 – Variazioni percentuali di $E_{m,g}$ per le 13 travi ($E_{m,g_0} = 100\%$).

<i>Trave</i> <i>n</i> [*]	E_{m,g_0}	E_{m,g_1}	E_{m,g_2}	E_{m,g_3}	$\frac{E_{m,g_1}}{E_{m,g_0}}$	$\frac{E_{m,g_2}}{E_{m,g_0}}$	$\frac{E_{m,g_3}}{E_{m,g_0}}$	$\frac{E_{m,g_2}}{E_{m,g_1}}$	$\frac{E_{m,g_3}}{E_{m,g_2}}$	<i>max var</i> $E_{m,g}$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
T01	10076	8599	8158	8363	15	19	17	5	-3	19
T02	8095	8223	7436	7328	-2	8	9	10	1	9
T03	9582	9186	8743	8656	4	9	10	5	1	10
T04	7241	6964	5387	4769	4	26	34	23	11	34
T05	9866	8855	7334	5939	10	26	40	17	19	40
T06	4333	4112	4068	4084	5	6	6	1	0	6
T07	5992	5719	5534	5489	5	8	8	3	1	8
T08	4922	3690	3562	3518	25	28	29	3	1	29
T09	4129	3818	3926	3840	8	5	7	-3	2	8
T10	7574	7547	6681	6744	0	12	11	11	-1	12
T11	5073	4699	4487	3846	7	12	24	5	14	24
T12	4643	3835	3517	3209	17	24	31	8	9	31
T13	6200	6349	6116	5238	-2	1	16	4	14	16
min	4129	3690	3517	3209	-2	1	6	-3	-3	6
max	10076	9186	8743	8656	25	28	40	23	19	40
media	6748	6277	5765	5463	7	14(13)	19(17)	7(6)	5(4)	19(17)
CV										
(%)	32	33	31	34						

Tabella 3.11 - Valori di $E_{m,g}$ per le travi integre e dopo la realizzazione di ogni taglio e variazioni percentuali (tra parentesi i valor medi escludendo T05).

3.6.3 Considerazioni aggiuntive sulla variazione dei valori di E

In diversi casi le variazioni massime di $E_{m,l}$ e di $E_{m,g}$ assumono valori anche molto differenti (elementi T02 T03, T04, T05, T07 e T11) suggerendo che non sono necessariamente gli stessi fattori ad influenzare i valori dei due moduli elastici.

Le variazioni percentuali medie, registrate dopo il primo taglio, sono simili tanto per $E_{m,l}$ che per $E_{m,g}$ (6% e 8% rispettivamente). Tali variazioni possono essere considerate come contenute, pur tenendo conto della limitatezza della profondità del taglio eseguito e dell'effetto delle variazioni di umidità del legno già descritto. Proprio la diversa umidità del legno, al momento delle prove, spiega i valori più alti di E , fino ad un massimo del 2%, ottenuti per gli elementi T02 e T03 (variazioni percentuali di E negative).

Solo 3 degli elementi testati dopo la realizzazione del primo taglio hanno fatto registrare variazioni consistenti, sia per $E_{m,g}$ che per $E_{m,l}$ (T01, T05, T08 e T12).

Gli elementi T02, T03, T06, T07 e T09 hanno fatto registrare le variazioni di $E_{m,g}$ più contenute (pari o inferiori al 10%), sempre riscontrate tra il primo ed il secondo taglio. Per questi elementi un ulteriore approfondimento del taglio non ha determinato

diminuzioni di $E_{m,g}$ significative. Gli elementi T04, T05, T08 e T12 hanno subito riduzioni di $E_{m,g}$ superiori al 20% già dopo la realizzazione del secondo taglio; tali valori sono aumentati fino a superare il 30%, dopo che il taglio è stato approfondito fino al 75% dell'altezza della sezione.

3.7 ANALISI STATISTICA

Al fine di determinare la significatività statistica delle variazioni nei valori di E , tra una condizione e quella successiva (travi integre - primo taglio; primo taglio – secondo taglio; secondo taglio – terzo taglio) sono stati condotti due diversi test statistici per dati appaiati tenendo conto dell'intero gruppo di travi: uno parametrico (Test t per dati appaiati) ed uno non parametrico (Test dei ranghi con segno di Wilcoxon per dati appaiati). Il test parametrico è stato usato previa verifica della normalità della distribuzione dei dati (testata tramite il Test di Shapiro-Wilk) e della verifica dell'omogeneità delle varianze. Tuttavia, essendo il campione costituito da un numero contenuto di elementi, qualche difficoltà e limite, nella determinazione della normalità della distribuzione, va considerato. Per ovviare a tale problema è stato impiegato anche un test di tipo non parametrico, che, come tale, risulta applicabile anche in presenza di distribuzioni non normali.

L'analisi statistica è stata condotta avvalendosi del programma di statistica "R" ed i dati ottenuti sono riportati nelle Tabelle 3.12 e 3.13.

	<i>test di normalità (p-value)</i>
E_{m,g_0}	0,159
E_{m,g_1}	0,107
E_{m,g_2}	0,360
E_{m,g_3}	0,262
E_{m,l_0}	0,896
E_{m,l_1}	0,997
E_{m,l_2}	0,882
E_{m,l_3}	0,996

Tabella 3.12 - Test di normalità per I diversi valori di E .

Per ogni test è riportato il *p-value* che permette di stabilire se l'ipotesi nulla H_0 possa essere accettata o meno. Nel caso del Test di Shapiro-Wilk l'ipotesi H_0 è che la distribuzione sia normale, per cui valori di *p-value* superiori a 0.05 implicano l'accettazione dell'ipotesi nulla (cosa verificata per tutti i set di dati). Discorso analogo vale per il test dell'omogeneità delle varianze ove l'ipotesi nulla H_0 (varianze omogenee) è accettata con *p-value* maggiore di 0.05.

	<i>omogeneità</i>	<i>t student</i>	<i>Wilcoxon</i>
	<i>(p-value)</i>	<i>(p-value)</i>	<i>(p-value)</i>
$E_{m,g_0}/E_{m,g_1}$	0,922	0,006	0,002
$E_{m,g_1}/E_{m,g_2}$	0,607	0,005	0,001
$E_{m,g_2}/E_{m,g_3}$	0,942	0,034	0,021
$E_{m,l_0}/E_{m,l_1}$	0,924	0,018	0,011
$E_{m,l_1}/E_{m,l_2}$	0,851	0,086	0,305
$E_{m,l_2}/E_{m,l_3}$	0,712	0,148	0,382

Tabella 3.13 – Test di omogeneità delle varianze, t Student Test per dati appaiati e test di Wilcoxon per dati appaiati.

Secondo l'ipotesi nulla, per i Test di Wilcoxon e per il Test t per dati appaiati, non vi sono differenze tra le due misure. Osservando i valori di *p-value* riportati nella Tabella 3.10 si nota come per entrambi i test l'ipotesi nulla debba essere accettata, confrontando i valori di E_{m,l_1} e E_{m,l_2} e quelli di E_{m,l_2} e E_{m,l_3} . L'alto valore del *p-value* ottenuto, nei due casi citati, impedisce di rifiutare l'ipotesi nulla, cioè non si può affermare che la media delle differenze tra le due misure (prima e dopo i tagli) sia significativa. L'analisi statistica è stata effettuata considerando l'intero campione, ed i risultati ottenuti risentono degli elementi che non hanno subito variazioni nei valori di $E_{m,l}$ (T02, T03, T04, T06, T09 e T11), e del fatto che solo pochi di essi abbiano subito variazioni rilevanti tra il primo ed il secondo o tra il secondo ed il terzo taglio (T01, T05 nel primo caso e T07, T08 e T13 nel secondo). Inoltre è necessario ricordare che, oltre al comportamento generale dell'intero gruppo di travi, risulta rilevante il comportamento dei singoli, la cui trattazione sarà affrontata Nel Capitolo 4.

3.8 CONTRIBUTO DELLA SOLLECITAZIONE DI SCORRIMENTO ALLA FRECCIA DI INFLESSIONE

La freccia di inflessione registrata per la determinazione di $E_{m,g}$ comprende sia la freccia dovuta alla sollecitazione di sola flessione, sia quella dovuta alla sollecitazione di scorrimento. Nessuna ricerca è mai stata effettuata in precedenza, per cui l'effetto dei tagli sul modulo di scorrimento G è sconosciuto, ma non per questo trascurabile a priori. La realizzazione del taglio riduce l'area della sezione (A_s) e ne modifica la forma, influenzando anche il fattore di taglio k (§ 2.8). Modulo di scorrimento, fattore di taglio ed area della sezione sono legati, in modo inversamente proporzionale, alla freccia di inflessione dovuta alla sollecitazione di scorrimento. La loro diminuzione, dovuta alla realizzazione dei tagli, influenza la freccia di inflessione totale registrata durante le prove e, di conseguenza, il valore attribuito a $E_{m,g}$. I valori di k e G sono stati considerati solo come prodotto, per le difficoltà nel determinare con precisione k , soprattutto dopo la realizzazione dei tagli (§ 2.8). Questi valori, insieme all'area della sezione, determinati prima della realizzazione dei tagli e dopo l'esecuzione del terzo taglio, sono riportati nella Tabella 3.14.

Attribuendo, un valore di k pari a 1.2, come proposto per gli elementi di sezione rettangolare (Cowper, 1966; Brancheriau, 2006), si può calcolare il valore di G , per ogni elemento, prima della realizzazione di ogni taglio. Osservando i dati in tabella si nota come, per la maggior parte degli elementi testati (T01, T02, T03, T04, T05, T07, T10, T11 e T13), il rapporto tra E/G si attesta nell'intervallo tra 20 e 30; come riportato in bibliografia per prove condotte su elementi in dimensioni d'uso (Palka e Barrett, 1985; Chui, 1991).

L'attendibilità dei risultati dei valori di $k \cdot G$ ottenuti dalle prove a vibrazione condotte sugli elementi T05 e T09, dopo l'esecuzione del terzo taglio, è ridotta, in seguito alla presenza di profonde fessurazioni da ritiro che arrivano a toccare il taglio, influenzando probabilmente il modo di vibrare dei due elementi, introducendo errori elevati, per le frequenze successive a quella fondamentale, dovuti allo sforzo di taglio ed all'inerzia rotatoria (Chui e Smith, 1990): nell'elemento T05 una fessurazione tocca il taglio partendo da una faccia laterale, nel T09 partendo dall'estradosso. La diversa disposizione delle fessurazioni rispetto al taglio con cui giungono a contatto, per i due elementi citati, potrebbe spiegare il differente comportamento: nella T05 il valore di

$k*G$ aumenta, nella T09 diminuisce, dopo la realizzazione del terzo taglio. L'elemento T05 fa inoltre registrare un rapporto E/G molto elevato, indice che anche il modo di vibrare dell'elemento, durante la prova prima della realizzazione del primo taglio, potrebbe essere influenzata in modo significativo dalla profonda fessurazione. Escludendo il solo elemento T05, il coefficiente di determinazione R^2 stabilito tra $E_{m,g}$ e G (Grafico 3.11), prima della realizzazione dei tagli, risulta pari a 0.29, in linea con quanto riportato in bibliografia da Doyle e Markwardt (1966), che hanno ottenuto valori tra 0.11 e 0.3 testando diverse conifere nord americane.

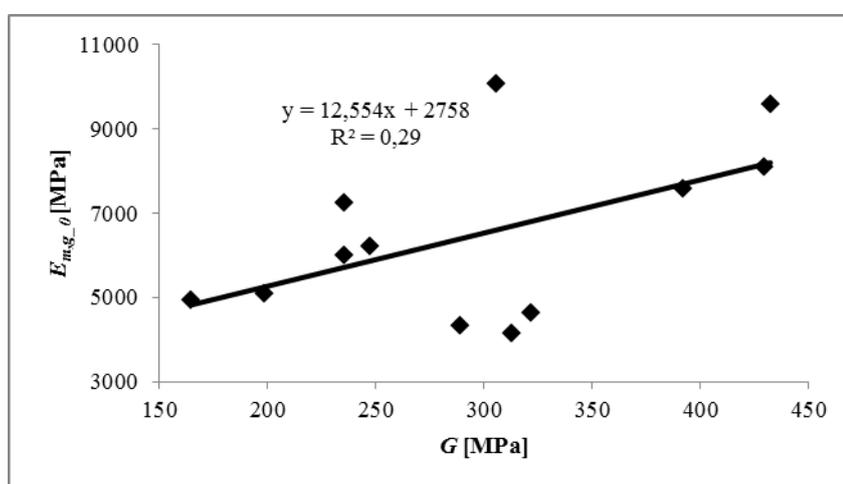


Grafico 3.11 – Relazione tra Modulo di scorrimento G e E_{m,g_0} .

3.8.1 Calcolo della freccia di inflessione dovuta alla sollecitazione di scorrimento

Ipotizzando di applicare a tutti gli elementi un carico P pari a 500 daN, sulla base della sezione di ogni elemento e della geometria di prova, è possibile calcolare l'abbassamento teorico della linea elastica (η_g), determinato dalla sollecitazione di scorrimento, applicando l'equazione 18 (§ 2.8), sia per gli elementi nelle condizioni originarie, sia dopo la realizzazione del terzo taglio. Impiegando le equazioni delle curve carico-deformazione per gli elementi integri, determinate mediante le prove statiche a flessione, si può calcolare la deformazione di ogni elemento allo stesso valore di carico. Tale carico corrisponde a sollecitazioni molto diverse a seconda dell'elemento, poiché le travi differiscono per dimensioni e geometria di prova; tuttavia, i risultati rimangono invariati, indipendentemente dal carico considerato, poiché le prove statiche sono state condotte all'interno del campo elastico, e deformazioni e carico rimangono direttamente proporzionali tra di loro. Conoscendo quindi il valore della

freccia di inflessione totale η (determinato mediante le prove a flessione) e quello di η_g (calcolato partendo dall'equazione 18, § 2.8) per le travi integre, si può calcolare, per semplice differenza, il valore della freccia dovuta alla sola sollecitazione di flessione (η_f). Volendo verificare se la riduzione di $E_{m,g}$ sia imputabile ad un aumento della freccia di inflessione dovuta alla sollecitazione di scorrimento, si può ipotizzare che il valore di η_f subisca una variazione dovuta solamente alla riduzione del momento di inerzia della sezione trasversale di ogni trave (come conseguenza dei tagli realizzati). Partendo da tale presupposto, il valore del prodotto $\eta_f * J$ si può considerare costante, anche dopo la realizzazione dei tagli e, di conseguenza, l'aumento percentuale di η_f corrisponderebbe alla diminuzione percentuale di J . Nella Tabella 3.14 sono riportati i valori di η_f e η , prima della realizzazione dei tagli e dopo la realizzazione del terzo taglio. Conoscendo la freccia di inflessione totale (η), e quella dovuta alla sollecitazione di scorrimento (η_g), determinate a parità di carico nei due momenti considerati, si può calcolare il diverso contributo della seconda sulla prima, e di conseguenza, rispetto al valore di $E_{m,g}$. La variazione di η_g riassunta nell'ultima colonna della Tabella 3.14, è stata calcolata come differenza tra i rapporti η_g e η , prima della realizzazione dei tagli e dopo la realizzazione del terzo taglio. Includendo gli elementi T05 e T09 la variazione media del contributo di η_g su η rimane contenuta all'1%. Escludendo invece T05 e T09 il valore medio rimane simile e la variazione massima del contributo di η_g su η raggiunge il 2%. Ne consegue che l'aumento della freccia di inflessione totale, e la conseguente diminuzione dei valori di $E_{m,g}$, per le travi che l'hanno fatta registrare, non sia imputabile alla sollecitazione di scorrimento, se non in modo del tutto trascurabile; è inoltre opportuno ricordare che variazioni contenute della forma della sezione trasversale, delle travi sollecitate a flessione, per prove condotte all'interno del campo elastico, hanno effetti trascurabili sul comportamento a flessione degli elementi stessi (§ 2.4.3).

3.9 UN CASO PARTICOLARE: LA TRAVE T05

L'elemento T05 presenta delle caratteristiche particolari che hanno reso difficile il calcolo dei valori di E , determinati durante le prove statiche, e l'individuazione dei valori di $k * G$ basate sui metodi vibratorii. I valori di $E_{m,g}$ diminuiscono progressivamente rispetto al valore iniziale (trave integra) per raggiungere valori molto bassi (rispettivamente inferiori del 10%, 26% e 40%). Per $E_{m,l}$ le variazioni sono più

<i>Trave n°</i>	<i>A_s 0%</i> (mm ²)	<i>A_s 75%</i> (mm ²)	<i>a (mm)</i>	<i>ΔJ</i> (%)	<i>k*G</i> <i>0%</i> (MPa)	<i>k*G</i> <i>75%</i> (MPa)	<i>G</i> <i>MPa</i>	<i>E_{m,g}/G</i>	<i>P</i> (daN)	<i>η</i> (mm) <i>0%</i>	<i>η_g</i> (mm) <i>0%</i>	<i>η_f</i> (mm) <i>0%</i>	<i>η_g</i> (mm) <i>75%</i>	<i>η_f</i> (mm) <i>75%</i>	<i>η</i> (mm) <i>75%</i>	<i>η_g/η(75%)-</i> <i>η_g/η (0%)</i> (%)
T01	21760	20725	625	4	367	291	306	33	500	4,20	0,39	3,81	0,52	3,95	4,47	2
T02	29829	28614	625	3	516	492	430	19	500	0,99	0,20	0,79	0,22	0,81	1,03	1
T03	36850	35365	1015	3	519	494	432	22	500	3,67	0,27	3,41	0,29	3,53	3,82	0
T04	49980	48360	620	3	282	285	235	31	500	1,37	0,22	1,15	0,23	1,18	1,41	0
T05	50400	48798	620	8	278	388	231	43	500	0,85	0,22	0,63	0,16	0,68	0,85	-7
T06	46000	44434	620	3	347	317	289	15	500	1,58	0,19	1,38	0,22	1,43	1,65	1
T07	39060	37665	1270	3	283	249	236	25	500	10,16	0,57	9,59	0,68	9,89	10,57	1
T08	38368	36928	620	3	198	191	165	30	500	2,55	0,41	2,15	0,44	2,20	2,64	1
T09	58424	56597	1000	3	376	120	313	13	500	4,48	0,23	4,25	0,74	4,38	5,12	9
T10	60720	58866	850	2	471	384	392	19	500	1,51	0,15	1,36	0,19	1,39	1,58	2
T11	53328	51600	1000	2	238	235	199	26	500	3,38	0,39	2,99	0,41	3,06	3,47	0
T12	43824	42159	510	2	386	353	322	14	500	2,16	0,15	2,01	0,17	2,04	2,21	1
T13	47988	46233	645	3	297	303	247	22	500	2,21	0,23	1,98	0,23	2,04	2,27	0
media					351	315	292	24								1
min					198	120	165	13								-7
max					519	494	432	43								9
CV (%)					29	34	29	35								

Tabella 3.14 – Contributo della sollecitazione di scorrimento alla freccia di inflessione globale, prima della realizzazione dei tagli e dopo la realizzazione del terzo taglio. η determinato sperimentalmente; η_g e η_f calcolati.

contenute e si limitano al primo e secondo taglio, mentre la realizzazione del terzo taglio non determina ulteriori riduzioni (rispettivamente 9%, 18% e 17%). Il calcolo dei valori di E nella prove statiche e di vibrazione trasversale passa attraverso la determinazione di J , che proprio per T05 risulta particolarmente difficile. La Figura 3.3 mostra l'aspetto delle due testate A e B della trave con il midollo posto asimmetricamente sulle due: più vicino alla faccia 1 sulla testata A e più vicino alla faccia 3 sulla testata B.



Figura 3.3 – Testate A (a sinistra) e B (a destra) della trave T05. Faccia 1 a sinistra, faccia 2 all'estradosso, faccia 3 a destra, faccia 4 all'intradosso per entrambe le testate.

Una sola profonda fessurazione da ritiro è presente sulla testata A ed estesa a partire dalla faccia 3, in direzione del midollo, fino a metà della base della sezione trasversale; sulla testata B compaiono invece 2 fessurazioni da ritiro: una che raggiunge il midollo partendo dalla faccia 1 ed una, meno profonda, che parte dalla faccia 3 della trave. La trave presenta quindi una profonda fessurazione da ritiro sulla faccia 1, che procede dalla testata A verso la B, diminuendo di profondità, mentre sulla faccia opposta un'altra importante fessurazione da ritiro si propaga dalla testata B verso la A, senza però raggiungerla. La posizione del midollo è inoltre diversa sulle due testate, non solo orizzontalmente, ma anche verticalmente: il midollo è al di sotto del centro della sezione trasversale in B ed al di sopra in A (valori del rapporto distanza midollo-intradosso/altezza della sezione rispettivamente di 0.46 e 0.58). Ne consegue che già dopo la realizzazione del secondo taglio (profondità pari al 50% dell'altezza della sezione media della trave) parte della fessurazione da ritiro che si propaga dalla testata A, viene raggiunta dal taglio stesso. La presenza di un taglio che tocca la fessurazione

da ritiro, per una porzione considerevole della lunghezza, riduce in modo molto importante il valore di J , e di conseguenza influenza il valore di E . Stabilire la profondità raggiunta dalle fessurazioni da ritiro all'interno dell'elemento, ed in quali punti entrano in contatto con le fessurazioni, in zone lontane dalle testate, presenta una serie di difficoltà che rendono le misurazioni poco attendibili: la variazione dell'andamento della fessurazione per la variazione dell'inclinazione della fibratura, il ridotto spazio che separa le due porzioni di legno della fessurazione e la scarsa accessibilità al taglio rendono difficoltoso l'inserimento di lamine sottili utilizzate per misurare la profondità dello spacco; mentre il particolare andamento del midollo nella trave introduce un ulteriore elemento di incertezza. Diventa quindi difficile individuare con precisione per quale lunghezza della trave le fessurazioni da ritiro sono interessate, a partire dal secondo taglio, e quindi determinare con precisione il valore di J , a partire dalla realizzazione del secondo taglio. Dalle misure effettuate è comunque emerso che il taglio ha toccato la fessurazione da ritiro fin al tratto centrale di prova della trave, influenzando sia $E_{m,l}$ che $E_{m,g}$.

Limitando le considerazioni agli effetti del primo taglio sui valori di $E_{m,l}$ ed $E_{m,g}$, si osserva come tali diminuzioni siano pressoché identiche per entrambi (rispettivamente 9% e 10%). Nel caso di $E_{m,l}$, tale variazione non trova giustificazione nelle interazioni tra tagli e nodi, poiché nel tratto centrale di prova i nodi sono assenti. Il primo taglio, pur non raggiungendo la profonda fessurazione da ritiro che parte dalla testata A, riduce di circa la metà l'estensione della porzione di legno che lega la parte sottostante la fessurazione da ritiro al resto della trave, poiché la fessurazione giunge fino al centro della larghezza della sezione trasversale. Questo fa sì che la porzione di trave compresa tra la proiezione verticale del taglio, e la fessurazione da ritiro, risulti meno saldamente collegata al resto della trave. Ne conseguirebbe una ridotta capacità della porzione di legno identificata di sostenere eventuali carichi applicati, tanto nelle prove per determinare il valore di $E_{m,l}$ quanto in quelle per determinare $E_{m,g}$.

Anche in questo caso la riduzione dei Valori di E non sarebbe tanto legata alla riduzione delle proprietà meccaniche, quanto spiegabile come una riduzione di sezione resistente (e quindi del momento di inerzia J). I valori di E rimangono comunque validi come espressione del mutato comportamento della trave sollecitata a flessione.

Anche la determinazione dei valori di $k*G$ ha suscitato qualche perplessità fornendo valori di E/G , per le travi integre, pari a 43, valore sicuramente elevato, giustificabile solo per travi con modulo elastico eccezionalmente alto (Palka e Barrett, 1985). In questo caso la presenza di una profonda fessurazione da ritiro introduce sicuramente errori importanti, almeno nella determinazione delle frequenze di vibrazione successive a quella fondamentale (§ 3.4.3), rendendo imprecisa la stima di $k*G$ mediante la metodologia proposta (§ 2.4.4).

3.10 PREVISIONE DI DENSITÀ E MODULO ELASTICO MEDIANTE PROVE NON DISTRUTTIVE

3.10.1 Previsione di E tramite prove non distruttive

La Tabella 3.15 riporta i valori di Modulo Elastico Dinamico, calcolati mediante le tecniche diverse, per le travi nelle diverse condizioni ($_0$ = trave integra; $_1$ = trave dopo la realizzazione del primo taglio; $_2$ = dopo la realizzazione del secondo taglio; $_3$ = dopo la realizzazione del terzo taglio). La Tabella 3.16 riassume invece i valori di R^2 , la significatività statistica e l'Errore Assoluto Percentuale Medio, per ogni prova condotta, confrontando i moduli elastici dinamici con tutti i valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$. In generale si può affermare che i dati confermano come i migliori risultati siano raggiungibili impiegando il metodo delle vibrazioni trasversali, seguite dalle prove a vibrazione longitudinale e mediante onde di pressione. Si nota inoltre un generale miglioramento delle correlazioni con il procedere dell'esecuzione dei tagli, che trova spiegazione nella riduzione dei valori di E , e della variabilità del campione. I valori di E_f ottenuti nelle prove a vibrazione trasversale sono quelli che più si avvicinano, in termini di valore, a quelli calcolati, con Errore Assoluto Percentuale Medio tra il 7.3 e l'11.7% per $E_{m,l}$, e tra 10.5 e 11.9% per $E_{m,g}$. Per le altre due prove l'Errore Assoluto Percentuale Medio è compreso tra valori più alti, che arrivano anche a superare il 19% nel caso di E_{sw} .

Poche ricerche sono state condotte nel tempo su materiale in dimensione d'uso (ed ancor meno su materiale antico di grande dimensioni) e pochi risultati, a volte contrastanti, sono disponibili: Ceccotti e Togni (1996) riportano valori di R^2 di 0.83 tra E_f ed $E_{m,l}$, mentre Capecchi (2002), confrontando gli stessi valori di E , ha ottenuto valori di 0.65. Iniguez *et al.* (2008) e Casado *et al.* (2010), riportano valori di R^2 , confrontando E_l ed $E_{m,l}$ su elementi lignei nuovi di grande dimensione, prossimi a 0.77. Ancora

Ceccotti e Togni (1996) e Branco *et al.* (2010) hanno pubblicato rispettivamente valori di R^2 di 0.85 e 0.36 tra E_{sw} e $E_{m,l}$. Si può inoltre notare come i metodi vibratorii non perdano sostanzialmente di efficacia, nel prevedere E , anche dopo la realizzazione dei tagli. Nonostante la variazione della forma della sezione degli elementi, il loro modo di vibrare rimane poco influenzato dai tagli, probabilmente come conseguenza del ridotto spessore degli stessi rispetto alla sezione delle travi. Si può affermare che anche le prove non distruttive di tipo vibratorio, condotte su elementi dopo la realizzazione dei tagli, in condizioni analoghe a quelle delle travi testate, possono essere considerate valide, ed utilizzabili per prevedere i valori di E calcolati mediante prove statiche.

3.10.2 Previsione delle variazioni di E tramite le prove non distruttive

L'impiego delle prove basate sulla trasmissione di onde di pressione, che pur potrebbero essere realizzate con facilità in opera, permette di stimare $E_{m,l}$ con una certa accuratezza (R^2 sempre superiore a 0.6***) ma non sono in grado di individuare le variazioni di E . In questo caso infatti i valori di E_{sw_0} e E_{sw_3} restano praticamente invariati (Tabella 3.16) e la massima differenza percentuale registrata per un elemento rimane contenuta al di sotto del 6%. Tale fenomeno è spiegato da Andrews (2002) secondo cui, soprattutto per elementi tozzi, parte dell'energia si propagherebbe lungo l'elemento molto rapidamente, poco influenzata dalle caratteristiche dello stesso. Identico ragionamento può essere fatto per le prove a vibrazione longitudinale: sebbene i valori di R^2 siano medio alti, la massima differenza percentuale calcolata per un solo elemento è pari al 10%, mentre per diverse travi, tanto per $E_{m,l}$ quanto per $E_{m,g}$, sono state osservate variazioni anche doppie. Analogamente, anche le misurazioni condotte in più punti sulle testate delle travi, sia in prove a vibrazione longitudinale, sia in quelle di trasmissione delle onde di pressione, hanno fornito risultati pressoché identici, e quindi privi di utilità ai fini della previsione della variazione dei valori di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$. Per questi motivi, sia per le prove a vibrazione longitudinale, sia per quelle basate sulla propagazione delle onde di pressione, la stima del valore di E deve passare obbligatoriamente attraverso un modello lineare di previsione, la cui validità, per altre specie legnose, andrebbe verificata. L'impiego delle prove a vibrazione trasversale invece, pur con i limiti applicativi che comporta, permette di ottenere valori di E_f che approssimano meglio quelli di $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ ed ha confermato la sua applicabilità anche

dopo la realizzazione dei tagli. Di conseguenza, le prove a vibrazione trasversale permettono anche di prevedere, con una certa precisione, le variazioni dei valori di E : in particolare, essendo E_{f_0} meglio correlato rispetto a E_{m,g_0} piuttosto che a E_{m,l_0} , la previsione della massima variazione di $E_{m,g}$ risulta più precisa (Grafici 3.12 e 3.13). La relazione tra massima variazione di $E_{m,l}$ e quella di E_f risente in particolare delle considerevoli differenze tra i due, ottenute per le travi T04, T07 e T11, mentre per le altre travi i valori risultano simili.

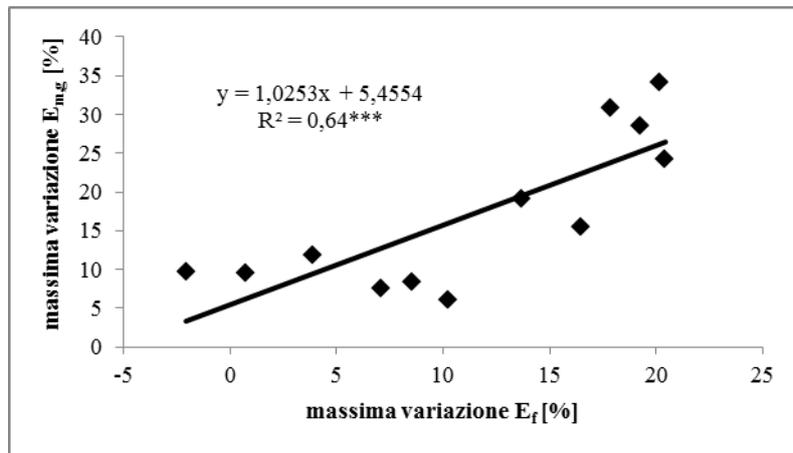


Grafico 3.12 – Confronto tra le massime variazioni di $E_{m,g}$ e E_f .

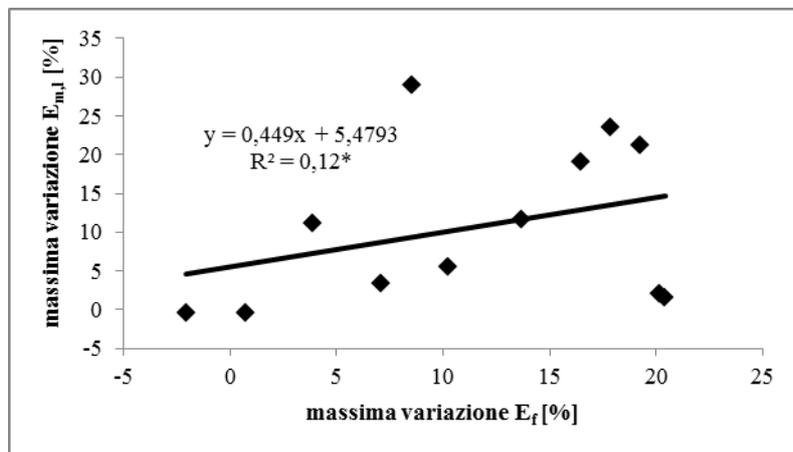


Grafico 3.13 – Confronto tra le massime variazioni di $E_{m,l}$ e E_f .

3.10.3 Stima della densità mediante Pilodyn

I valori medi delle misurazioni effettuate attraverso il Pilodyn, su ogni faccia delle travi è stato riportato in Tabella 3.17 insieme alla media ottenuta considerando tutte le facce di ogni trave o solo tre facce (estradosso escluso).

<i>Trave n°</i>	E_{f_0} [MPa]	E_{f_1} [MPa]	E_{f_2} [MPa]	E_{f_3} [MPa]	E_{l_0} [MPa]	E_{l_1} [MPa]	E_{l_2} [MPa]	E_{l_3} [MPa]	E_{sw_0} [MPa]	E_{sw_1} [MPa]	E_{sw_2} [MPa]	E_{sw_3} [MPa]
T01	11734	11338	10643	10127	14679	13858	13741	13509	17637	17569	17563	17864
T02	9296	9651	9356	9224	12496	12496	12088	12544	14832	14985	14693	14256
T03	11260	11624	11825	11493	14249	13922	13381	13955	14453	14256	13866	13857
T04	8665	8491	8255	6916	12227	12318	12300	11681	13117	12678	12899	12933
T05	10518	9771	9236	10027	12280	13203	13260	12988	15749	15986	15932	14882
T06	6672	6376	6026	5987	9023	8766	8562	8689	11583	11256	11458	11326
T07	5598	5334	5247	5118	6630	5365	6373	7232	6295	5792	5466	5976
T08	4926	4176	4055	3978	8565	8853	8255	8264	6883	6899	6937	7048
T09	5716	5563	5523	5312	8781	8291	8455	8321	8307	8541	8354	8322
T10	11191	11849	11035	10756	14451	13816	13769	14605	18377	18872	18236	17890
T11	6547	6232	6329	5210	9303	8654	8766	8563	11850	11545	11022	11389
T12	5973	5312	5056	4907	8758	8235	8425	8358	8934	8236	8659	8944
T13	8160	8264	8140	6816	10963	10224	9963	9832	11601	11298	11209	11675
min	4926	4176	4055	3978	6630	5365	6373	7232	6295	5792	5466	5976
max	11734	11849	11825	11493	14679	13922	13769	14605	18377	18872	18236	17890
media	8174	7998	7748	7375	10954	10615	10564	10657	12278	12147	12023	12028
CV (%)	30	33	33	35	24	26	25	24	32	34	33	31

Tabella 3.15 – Valori dei Moduli Elastici Dinamici determinati nelle diverse condizioni ($_0$ = trave integra; $_1$ = dopo la realizzazione del primo taglio; $_2$ = dopo la realizzazione del secondo taglio; $_3$ = dopo la realizzazione del terzo taglio).

	E_{f_0}	E_{f_1}	E_{f_2}	E_{f_3}	E_{l_0}	E_{l_1}	E_{l_2}	E_{l_3}	E_{sw_0}	E_{sw_1}	E_{sw_2}	E_{sw_3}
E_{m,l_0}	0,73*** (10,6)				0,54*** (14,1)				0,62*** (13,9)			
E_{m,l_1}		0,88*** (7,3)				0,72*** (11,8)				0,80*** (7,9)		
E_{m,l_2}			0,88*** (7,8)				0,73*** (11,9)				0,76*** (9,8)	
E_{m,l_3}				0,79*** (11,7)				0,73*** (14,5)				0,73*** (14,5)
E_{m,g_0}	0,83*** (11,8)				0,7*** (14,8)				0,6*** (18)			
E_{m,g_1}		0,84*** (11,2)				0,7*** (17,2)				0,63*** (18,9)		
E_{m,g_2}			0,85*** (10,5)				0,66*** (16,5)				0,55*** (18,7)	
E_{m,g_3}				0,81*** (11,9)				0,68*** (15,8)				0,50*** (19,4)

Tabella 3.16 – Valori di R^2 , significatività statistica ($p < 0,01$ (***) ; $0,01 < p < 0,05$ (**); $0,05 < p < 0,1$ (*) ed Errore Percentuale Medio Assoluto (tra parentesi), tra Moduli Elastici dinamici e Moduli Elastici Statici determinati su travi integre e dopo la realizzazione di ogni taglio. $E_{f_}$ = Modulo Elastico Dinamico determinato in prove a vibrazione trasversale; $E_{l_}$ = Modulo Elastico Dinamico determinato in prove a vibrazione longitudinale; $E_{sw_}$ = Modulo Elastico Dinamico determinato mediante misura della velocità di propagazione delle onde di pressione; $E_{m,l}$ = Modulo Elastico Locale; $E_{m,g}$ = Modulo Elastico Globale.

Si può notare come, per alcune travi, esista una certa variabilità nella profondità di penetrazione della punta del Pilodyn ottenuta sulle diverse facce (T05, T07, T08 e T11). Il fenomeno, già illustrato nel § 2.4.6, giustifica la scelta di effettuare più misurazioni, per meglio poter giungere ad un valore più rappresentativo e meglio correlato alla densità reale del legno. Confrontando i valori medi ottenuti considerando tutte le facce, con quelli ottenuti escludendo l'estradosso, le differenze risultano sempre contenute (differenza massima di 1 mm per la trave T07). La necessità di investigare le relazioni esistenti tra densità e misurazioni effettuate col Pilodyn, escludendo l'estradosso, nasce dalla necessità di individuare un metodo, applicabile in opera, per la determinazione della densità, da poter utilizzare nel calcolo dei Moduli Elastici Dinamici E_l ed E_{sw} (§ 2.4.5.2 e 2.4.5.3).

Trave n°	Profondità penetrazione Pilodyn [mm]				media	media
	faccia				4 facce	3 facce
	1	2	3	4	[mm]	[mm]
T01	10,2	10,2	10,6	10,8	10,5	10,5
T02	12,2	12	13,6	10,4	12,1	12,1
T03	13	11,4	12,4	12,8	12,4	12,7
T04	11,4	12,4	12	14	12,5	12,5
T05	12	10,4	14	11,8	12,1	12,6
T06	19,8	19,6	18	22,4	20,0	20,1
T07	13,4	17,2	17,6	18,4	16,7	17,7
T08	20,2	15,2	18	18	17,9	17,8
T09	15,4	14,2	14	15,2	14,7	14,9
T10	11,8	11,2	13,6	15,6	13,1	13,7
T11	17,6	19,2	16	16,4	17,3	16,7
T12	17,6	18,4	17,2	19	18,1	17,9
T13	18,4	17,2	17,6	19,6	18,2	18,5

Tabella 3.17 – Profondità di penetrazione del Pilodyn: valori medi per ogni faccia, per l'intero elemento e per sole tre facce (escluso estradosso).

I due metodi infatti, sono realizzabili in opera con una certa facilità, spesso senza dover necessariamente rimuovere gli elementi lignei dalla posizione originale, offrendo quindi importanti vantaggi operativi. Tuttavia le condizioni di lavoro in opera spesso non permettono di accedere a tutte le facce di un elemento, classico esempio l'estradosso delle travi di solaio. I Grafici 3.14 e 3.15 mostrano come sia considerando tutte le facce delle travi, sia escludendo l'estradosso, i valori di R^2 tra le misurazioni effettuate col Pilodyn e la densità degli elementi sia sostanzialmente identica (rispettivamente 0.77 e 0.78) ed altamente significativa in entrambi i casi. Questi valori sono simili a quelli riportati in bibliografia per elementi di conifera di grosse dimensioni: 0.74 (Ceccotti e Togni, 1996), 0.81 (Branco *et al.*, 2008), 0.61 Iniguez *et al.* (2010).

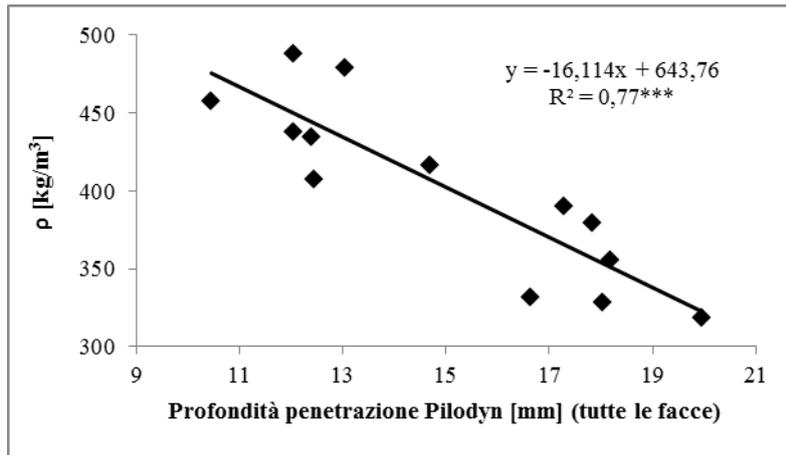


Grafico 3.14 – Relazione tra profondità di penetrazione del Pilodyn, determinate su tutte le facce delle travi, e densità.

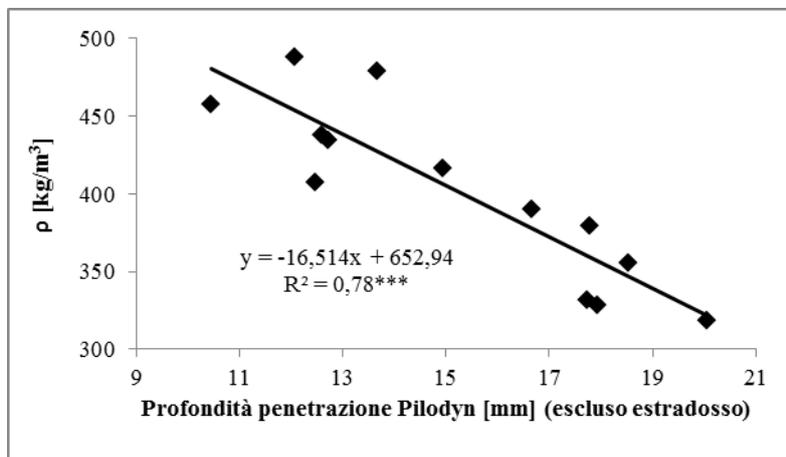


Grafico 3.15 – Relazione tra profondità di penetrazione del Pilodyn, determinate su tutte le facce delle travi, e densità.

Capitolo 4

Cause della variazione del Modulo Elastico

4.1 CAUSE DELLA VARIAZIONE DEL MODULO ELASTICO LOCALE

Osservando le variazioni di $E_{m,l}$ per singoli casi, si nota come la variabilità nei risultati sia molto ampia, con travi che non hanno subito alcuna variazione (T02, T03, T04, T06, T09 e T11), ed altre per le quali il valore di $E_{m,l}$ è diminuito fino a valori prossimi, o superiori, al 20% (T05, T07, T08, T12 e T13).

Riduzione significativa di E dopo il primo taglio: la riduzione del valore di $E_{m,l}$, dopo la realizzazione del primo taglio, può trovare una giustificazione nell'effetto dei nodi presenti all'intradosso delle travi, così come descritto in precedenza (§ 3.4). Nella Tabella 3.7 sono riportati i valori di incidenza dei nodi, e la loro variazione dopo la realizzazione del primo taglio, riferiti al tratto centrale di prova all'intradosso. E' facile notare come travi che hanno fatto registrare elevate diminuzioni nel valore di $E_{m,l}$, dopo la realizzazione del primo taglio, sono quelle che hanno subito una maggiore variazione dell'incidenza dei nodi sulla faccia dell'intradosso, e che presentano un maggior numero di nodi proprio in quel tratto (T01, T07, T10 e T12). L'unica eccezione è rappresentata dalla trave T05 che, pur non presentando nodi nel tratto centrale ha subito una variazione pari al 9% ma che, per le sue caratteristiche particolari è stata già oggetto di esame particolare nel capitolo 3.8 e verrà trattata successivamente in un paragrafo separato. A conferma dell'influenza dei nodi sul valore di E il comportamento dell'elemento T07, che subisce una riduzione di $E_{m,l}$ pari al 26% contro una riduzione di $E_{m,g}$ di solo il 5%. Tale differenza trova giustificazione nell'effetto più importante dei difetti localizzati su un tratto breve di misura (1200 mm per $E_{m,l}$) rispetto ad un tratto di dimensioni maggiori (3840 mm per $E_{m,g}$). Moltiplicando il numero di nodi che hanno subito una variazione nell'incidenza sulla faccia all'intradosso del tratto centrale di prova, per la variazione del valore dell'incidenza dei nodi (Tabella 3.7), si ottiene un indice (indicato nei grafici successivi come $I_n =$ indice nodi) da impiegare nella previsione della variazione di $E_{m,l}$, dopo la realizzazione del primo taglio (Grafico 4.1).

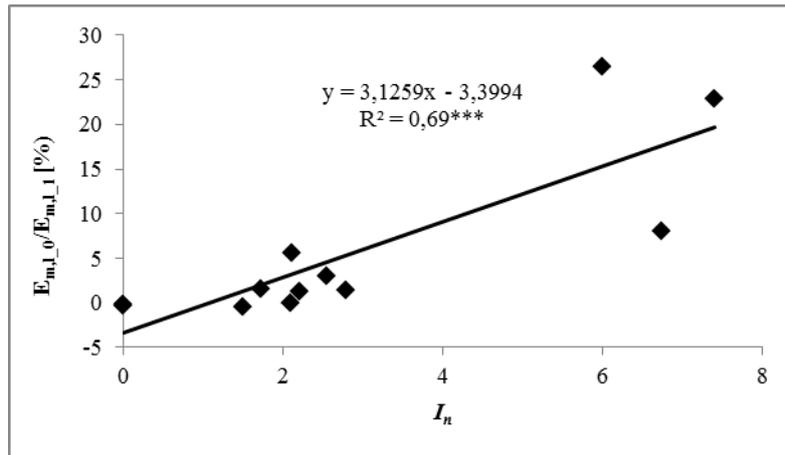


Grafico 4.1 – Modello di previsione della variazione percentuale di $E_{m,l}$ tra elemento intero e dopo il primo taglio ($E_{m,l_0}/E_{m,l_1}$) in funzione dell'effetto del taglio sui nodi all'intradosso del tratto centrale di prova. I_n = indice ottenuto moltiplicando il numero di nodi per il valore dell'incidenza dei nodi dopo la realizzazione del primo taglio.

Dal grafico è stato escluso il solo elemento T05 le cui particolari caratteristiche fanno sì che debba essere trattato separatamente (§.3.9). L'indice, così calcolato, permette di ottenere una relazione alta ($R^2 = 0.69***$) per individuare la variazione percentuale tra E_{m,l_0} e E_{m,l_1} . Volendo impiegare lo stesso metodo per prevedere la massima variazione di $E_{m,l}$, calcolata rispetto a E_{m,l_0} , indipendentemente dal momento in cui essa è stata registrata, non si raggiunge un risultato altrettanto buono: il valore di R^2 scende a $0.59**$ (Grafico 4.2).

Questo comportamento trova spiegazione nel fatto che le variazioni importanti di $E_{m,l}$ non sono sempre avvenute dopo la realizzazione del primo taglio mentre I_n tiene conto della situazione riferita al primo taglio.

Riduzione significativa di E dopo il secondo e terzo taglio: la trave T01 ha subito la massima riduzione di $E_{m,l}$ dopo la realizzazione del secondo taglio mentre T08 e T13, dopo la realizzazione del terzo. Per questi 3 elementi l'ulteriore diminuzione di $E_{m,l}$ trova giustificazione nell'interazione tra tagli e nodi descritta nel § 3.4.1. L'elemento T01 risponde al caso riportato in Figura 3.2C: midollo approssimativamente centrato orizzontalmente ma leggermente spostato verso l'intradosso. Per questa trave il secondo taglio tocca alcuni nodi influenzando $E_{m,l}$. Gli elementi T08 e T13 rispondono invece al caso illustrato nella Figura 3.2 B dove il primo ed il secondo taglio determinano una variazione ridotta dell'incidenza dei nodi sulle facce su cui compaiono, mentre l'ulteriore approfondimento del taglio interessa il nodo 3. In generale, la variazione media registrata approfondendo il taglio dal 25% al 50%, e dal 50% al 75% dell'altezza della sezione, non ha avuto effetti importanti sui valori di $E_{m,l}$ (riduzioni rispettivamente

dell'1% e del 3%) come conseguenza del fatto che il peggioramento delle caratteristiche meccaniche in zone prossime all'asse neutro di una trave inflessa hanno scarso effetto sul comportamento a flessione della stessa.

Nessuna riduzione significativa di E dopo i tagli: gli elementi che non presentano nodi nel tratto centrale di prova (T04), o che presentano nodi molto piccoli (incidenza pari a 0.09 per T03), non hanno subito alcuna variazione di $E_{m,l}$. Questo confermerebbe, tenendo conto del numero ridotto di casi osservati, l'effetto dei nodi, e la loro interazione con i tagli, sul valore di $E_{m,l}$.

La maggiori variazioni dell'incidenza dei nodi sono state subite da quelle travi i cui nodi vengo tagliati asimmetricamente, questo genera un effetto su entrambe le porzioni separate dal taglio, provocando una riduzione della qualità del materiale, che si ripercuote se entrambe le porzioni. Al contrario i nodi non tagliati asimmetricamente influiscono solo una delle due porzioni separate dal taglio, riducendo solo la qualità di una delle due.

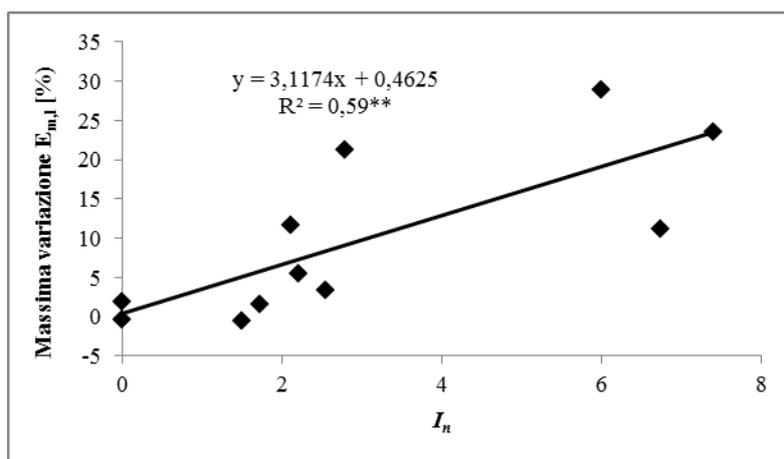


Grafico 4.2 – Modello di previsione della variazione percentuale massima di $E_{m,l}$ in funzione dell'effetto del taglio sui nodi all'intradosso del tratto centrale di prova. I_n = indice ottenuto moltiplicando il numero di nodi per il valore dell'incidenza dei nodi dopo la realizzazione del primo taglio.

Considerazioni relative al solo difetto dell'inclinazione della fibratura, e la sua interazione con i tagli, non sono possibili, poiché solo T03 e T04 non presentano nodi nel tratto centrale di prova e fibratura poco deviata. Risulta quindi difficile individuare un eventuale effetto, sui valori di E , dovuto alla relazione tra tagli ed inclinazione della fibratura, presumibile per travi con inclinazione della fibratura elevata. E' tuttavia possibile che i tagli realizzati sulle travi oggetto della ricerca, per effetto delle ridotte dimensioni e della posizione, non esercitino un effetto rilevante, dovuto all'interruzione

della continuità della fibratura, sui valori di $E_{m,l}$; o che tale effetto sia mascherato da altro. Non si può tuttavia escludere che l'interruzione della fibratura, dovuta a tagli diversi da quelli realizzati sulle travi oggetto di prova, per dimensioni, numero o posizione, non possano influenzare i valori di $E_{m,l}$.

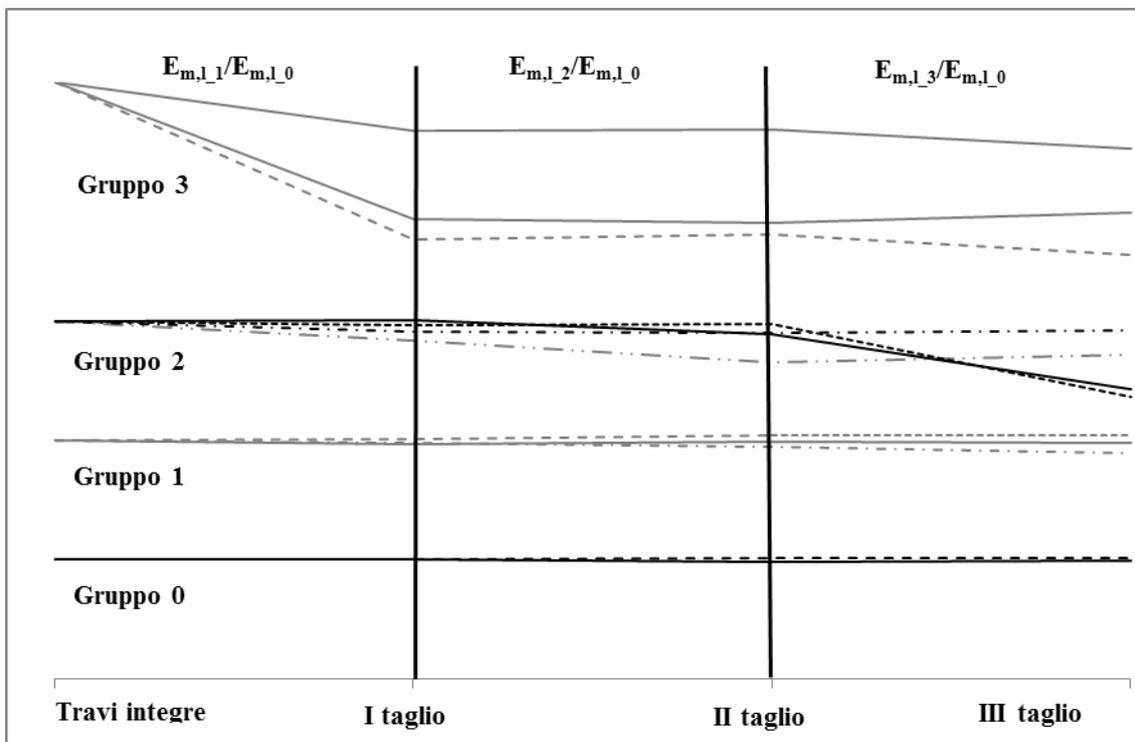


Grafico 4.3 – Variazioni percentuali di $E_{m,l}$ per gruppi omogenei di travi in funzione dell'effetto dei tagli sull'incidenza dei nodi all'intradosso. Asse y - 1 cm = 10% $\Delta E \cong$.

Il Grafico 4.3 riporta gli andamenti di $E_{m,l}$ per le travi divise in gruppi omogenei in base alla variazione dell'incidenza dei nodi all'intradosso, in seguito alla realizzazione del primo taglio. Al Gruppo 0 appartengono le travi che non presentano nodi nel tratto centrale di prova (T03, T04); al Gruppo 1 le travi T02, T06, T11, che presentano un valore di $I_n \leq 2$ (indice ottenuto moltiplicando il valore della variazione dell'incidenza dei nodi calcolato tra trave integra e dopo il primo taglio per il numero di nodi che la subiscono); al Gruppo 2 quelle con $2 < I_n \leq 2.8$ (T01, T08, T09 e T13); al Gruppo 3 quelle con $I_n \geq 6$ (T07, T10, T12). Si può osservare come i Gruppi 0 e 1, in cui i tagli hanno effetto nullo o trascurabile sui nodi all'intradosso, presentano variazioni di $E_{m,l}$ pressoché nulle, mentre per i Gruppi 2 e 3 tali variazioni aumentano diventando particolarmente visibili per il Gruppo 3 per il quale si verificano sempre dopo la realizzazione del primo taglio.

4.2 CAUSE DELLA VARIAZIONE DEL MODULO ELASTICO GLOBALE

Osservando le testate delle travi che hanno subito le maggiori diminuzioni dei valori di $E_{m,g}$, si può ipotizzare una relazione tra la profondità delle fessurazioni da ritiro e la diminuzione di $E_{m,g}$: tutte le travi che hanno subito variazioni massime di $E_{m,g}$ superiori al 15%, presentano valori delle fessurazioni da ritiro maggiori di 0.35. Oltre alle fessurazioni da ritiro, anche la distanza di queste rispetto al taglio, che può essere espressa dalla posizione del midollo, esercita un certo effetto sulla variazione di $E_{m,g}$.

Gli elementi T01, T08 e T12, che subiscono le variazioni più alte di $E_{m,g}$ dopo la realizzazione del primo taglio presentano il midollo posizionato più vicino all'intradosso, e valori delle fessurazioni da ritiro tra i più alti (superiori a 0.5). Al contrario travi come T04 e T10, il cui midollo è posizionato al di sopra della metà dell'altezza della sezione, subiscono variazioni contenute di $E_{m,g}$ dopo la realizzazione del primo taglio (rispettivamente 4% e 0%); mentre il successivo approfondimento del taglio comporta una riduzione importante del valore di $E_{m,g}$ (rispettivamente pari al 23% e 11%).

Variazioni consistenti di $E_{m,g}$ sono state registrate a tutte le profondità, questo suggerisce che l'effetto dei tagli su $E_{m,g}$ non sia limitato ad un peggioramento delle proprietà meccaniche del legno, come ipotizzato per $E_{m,l}$. La presenza di un taglio centrato rispetto alla larghezza della sezione, ed esteso in altezza fino ad arrivare in prossimità del midollo (considerando il midollo come riferimento per la posizione delle fessurazioni da ritiro), renderebbe più difficile il trasferimento dei carichi all'interno dell'elemento ligneo, da una parte ad un'altra. Se la distanza del midollo dal taglio influenza la capacità delle travi di sopportare tagli di profondità differente, le travi che hanno un midollo più lontano dalla base, una volta che il taglio sia giunto in sua prossimità, potrebbero comunque subire variazioni importanti di $E_{m,g}$, per la maggior difficoltà nel trasferire il carico alla parte di legno, consistente, sottostante le fessurazioni. Tuttavia, per il campione di travi sottoposte a prove, la massima riduzione di $E_{m,g}$ (da 20% in su) è stata ottenuta con incidenza delle fessurazioni elevata (0.5 e oltre). La ridotta variabilità della posizione del midollo, per gli elementi oggetto della ricerca, non permette ulteriori considerazioni. L'elemento T07, che non presenta fessurazioni da ritiro, ha comunque subito una variazione massima di $E_{m,g}$ dell'8%, ed il T03, che presenta midollo incluso, ma decentrato verticalmente ed orizzontalmente, e fessurazioni poco profonde, ha comunque subito una riduzione massima di $E_{m,g}$ pari al

10%. Questo a significare che non sono solamente le fessurazioni da ritiro a determinare la riduzione di $E_{m,g}$.

Nessuna delle travi ha subito, dopo il terzo taglio, riduzioni di $E_{m,g}$ inferiori al 5%, e solo tre di esse (T02, T06, T07 e T09) hanno subito una riduzione inferiore al 10%.

L'effetto sui valori di $E_{m,g}$, della presenza delle fessurazioni da ritiro, non sembra essere legato alla variazione del modulo di scorrimento G (§ 3.8), mentre è ipotizzabile un effetto combinato di più fattori:

1. Minor efficacia del legno nel trasferire i carichi all'interno della sezione, sia dalle parti di legno poste al di sopra delle fessurazioni a quelle poste al di sotto, sia, soprattutto, tra le porzioni separate dal taglio che, per la presenza del taglio stesso, lavorano separatamente, almeno per un tratto della trave. L'effetto potrebbe essere assimilato a quello conseguente ad una diminuzione della sezione resistente, più che ad una variazione delle proprietà meccaniche del legno. Tuttavia è più probabile che i due effetti si sovrappongano, e dal punto di vista pratico la variazione di $E_{m,g}$ evidenzia una variazione nel comportamento deformativo delle travi sollecitate a flessione.
2. La generazione di due porzioni separate dal taglio, con diverse caratteristiche meccaniche, con la peggiore delle due che influenza maggiormente il comportamento della trave inflessa (§ 1.2.4.1).

Relazioni tra fessurazioni da ritiro e variazione di $E_{m,g}$: nella Tabelle 3.4 sono riportati i dati medi per ogni trave, relativi alle fessurazioni da ritiro, calcolati conformemente alla DIN 4074. Escludendo dall'analisi gli elementi T05, riportata nel § 3.9, e T07, poiché non presenta fessurazioni da ritiro in quanto assortimento "fuori midollo" (midollo non incluso), alcune interessanti relazioni tra l'incidenza delle fessurazioni da ritiro e la riduzione di $E_{m,g}$ possono essere individuate (Grafici 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14) La correlazione tra estensione delle fessurazioni da ritiro e variazione di $E_{m,g}$, dopo la realizzazione del primo taglio, è alta (R^2 0.70***), ma tende a diminuire approfondendo successivamente il taglio (0.67*** e 0.68*** rispettivamente dopo il secondo ed il terzo taglio); mentre considerando la massima diminuzione registrata di $E_{m,g}$ (Grafico 3.14) si ottiene un R^2 di 0.71***. L'andamento delle curve suggerisce un comportamento incerto per le travi che presentano fessurazioni poco estese e tagli poco profondi, per le quali evidentemente altri fattori contribuiscono a determinare il valore di $E_{m,g}$. Osservando invece la relazione tra fessurazioni da ritiro e massima variazione di $E_{m,g}$, questa può essere approssimata ad una retta, o meglio suggerisce che i due tratti della

curva (per valori dell'incidenza delle fessurazioni al di sotto ed al di sopra di 0.5) abbiano lo stesso andamento.

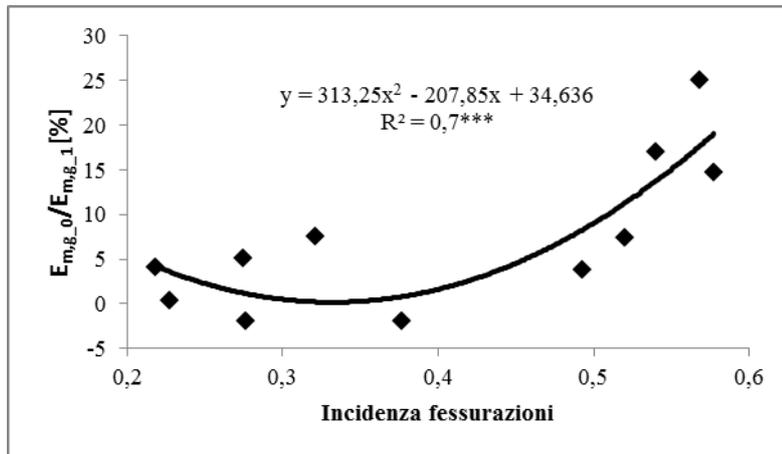


Grafico 4.4 – Relazione tra variazione di $E_{m,g}$ dopo la realizzazione del primo taglio e fessurazioni da ritiro.

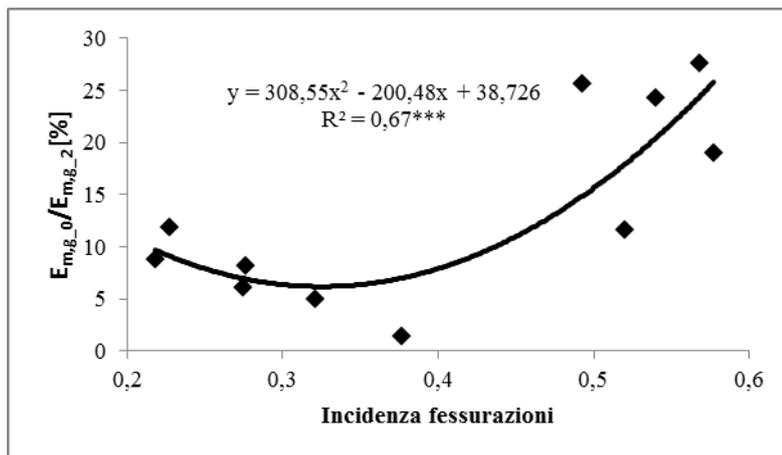


Grafico 4.5 – Relazione tra variazione di $E_{m,g}$ dopo la realizzazione del secondo taglio e fessurazioni da ritiro.

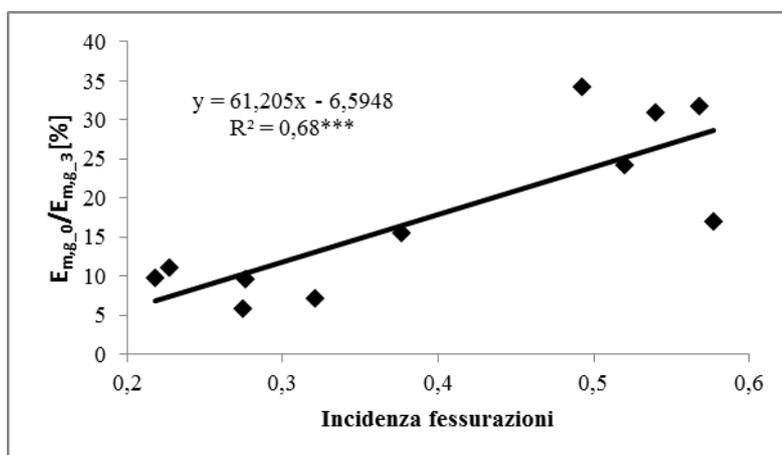


Grafico 4.6 – Relazione tra variazione di $E_{m,g}$ dopo la realizzazione del terzo taglio e fessurazioni da ritiro.

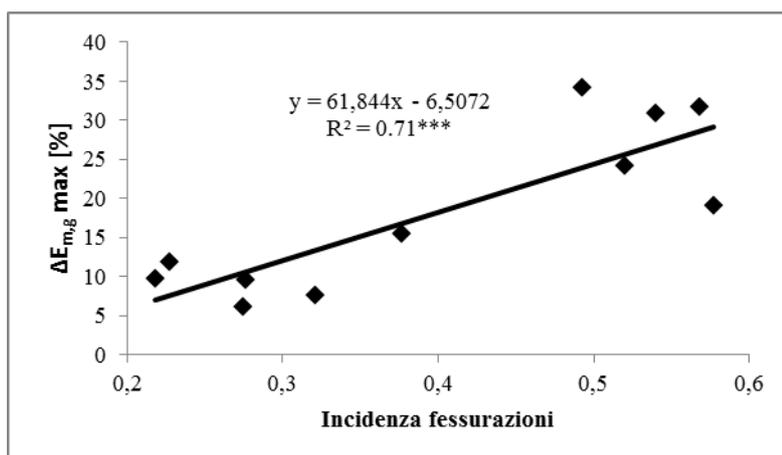


Grafico 4.7 – Relazione tra massima variazione di $E_{m,g}$ e fessurazioni da ritiro.

Il Grafico 4.8 presenta il comportamento delle travi raggruppate per gruppi omogenei in funzione dell'estensione delle fessurazioni da ritiro sulle testate: Gruppo 0 formato dalle travi con fessurazioni da ritiro fino a 0.38 (T02, T03, T06, T07 e T10); Gruppo 1 formato da travi con fessurazioni da ritiro ≤ 0.52 ma superiore a 0.38 (T04, T09, T11 e T13); Gruppo 2 contenente travi con fessurazioni da ritiro oltre 0.52 (T01, T08 e T12). All'interno del Gruppo 1 si osserva il comportamento anomalo, rispetto alle altre travi dello stesso gruppo, di una trave (T04) che subisce una variazione di $E_{m,g}$ molto consistente (se paragonata a quelle delle altre travi dello stesso gruppo), che trova giustificazione nella presenza di un valore di inclinazione della fibratura pari al 4%, contro valori compresi tra il 12% ed il 25% per le altre.

4.2.1 Effetto dell'inclinazione della fibratura sulla variazione di $E_{m,g}$

Lo stesso risultato riportato nel Grafico 4.7 si può ottenere combinando, all'interno di un modello lineare di previsione, il valore delle fessurazioni da ritiro con quello dell'inclinazione della fibratura (Grafico 4.9). Confrontando i valori delle correlazioni si osserva lo stesso valore: nel caso della correlazione multivariata il valore di R^2 era più alto, ma è stato riportato il valore di R^2_{adj} ($R^2_{adj} = R^2$ aggiustato, cioè corretto in funzione dei gradi di libertà e del numero dei regressori) al fine di poterlo confrontare col modello precedente. Il modello riportato nel Grafico 4.9 non apporta quindi un miglioramento nella previsione della massima variazione di $E_{m,g}$ ma indica un effetto dell'inclinazione della fibratura nel mitigare le variazioni di $E_{m,g}$. Osservando i dati nella Tabella 4.1 si

vede come anche la variabile indipendente “fibratura”, che corrisponde al valore dell’inclinazione della fibratura, risulti significativa. Il suo contributo è però inverso rispetto a quello delle fessurazioni da ritiro (valore negativo nel modello), cioè, tanto più l’inclinazione della fibratura è accentuata, tanto minore è l’effetto dei tagli sulla variazione di $E_{m,g}$.

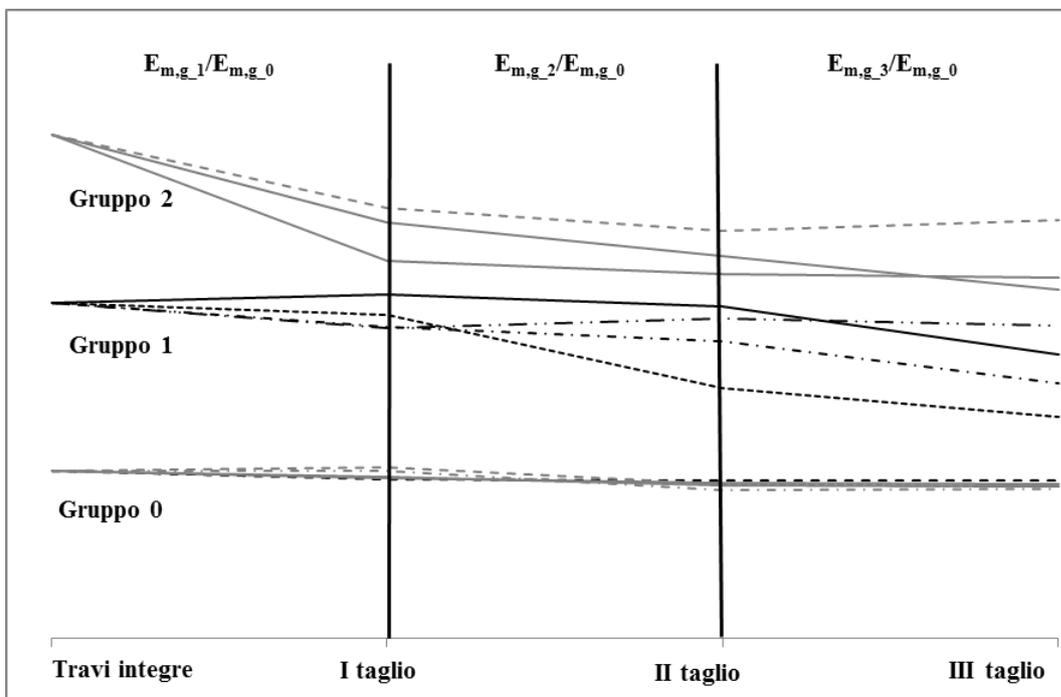


Grafico 4.8 – Variazioni percentuali di $E_{m,g}$ per gruppi omogenei di travi in funzione dell’estensione delle fessurazioni da ritiro sulle testate. Valori assoluti non reali. 1 cm = 10% $\Delta E_{m,g}$.

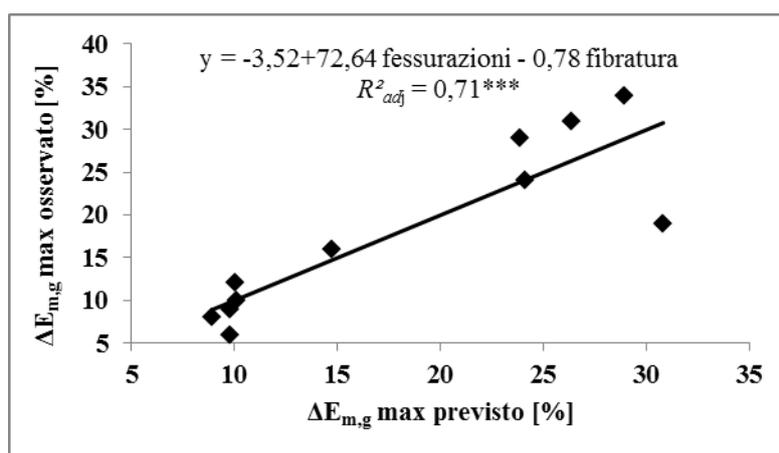


Grafico 4.9- Previsione della massima variazione di $E_{m,g}$ tramite inclinazione della fibratura ed estensione delle fessurazioni da ritiro.

Questo comportamento va a favore delle ipotesi fatte per spiegare le variazioni di $E_{m,g}$, confermando che l’interruzione della fibratura ha un effetto marginale per tagli come

quelli realizzati, anche in presenza di fibratura deviata. Al contrario, la presenza di fibratura inclinata favorirebbe il trasferimento del carico, tra le parti di legno separate dalle fessurazioni da ritiro, collegandole in modo più efficace di quanto non sia possibile per travi, che hanno subito i tagli, e presentano fibratura poco o per nulla inclinata. Per completezza è opportuno ricordare che le travi con fibratura più inclinata hanno valori di E (a trave intatta) significativamente inferiori(grafico 3.6) a quello delle travi con fibratura diritta, di conseguenza la diminuzione di $E_{m,g}$ risulta incidere maggiormente sulle travi a fibratura più diritta, che hanno un modulo elastico sensibilmente maggiore, a parità di incidenza delle fessurazioni da ritiro.

	coefficiente	p-value
Costante	-3,52	
Fibratura	-0,78	(0,034)**
fessurazioni	72,64	(0,009) ***

Tabella 4.1– Coefficienti e significatività statistica delle variabili utilizzate nel modello riportato in Grafico 4.9),

4.3 DETERMINAZIONE DELLA PROFONDITÀ DI TAGLIO CRITICA

Oltre alle variazioni dei valori di E è interessante individuare in quale momento tali variazioni si sono verificate, per avere informazione sulla capacità delle travi di sopportare tagli più o meno profondi, al fine di definire una sorta di “*profondità di taglio critica*”, definita come quella che ha determinato la maggiore variazione di E . Tale approccio potrà fornire indicazioni utili ai fini pratici che sarà oggetto del Capitolo 5. Osservando i Grafici 4.3 e 4.8 si possono identificare alcuni andamenti comuni, per gruppo omogeneo, rispettivamente per $E_{m,l}$ e per $E_{m,g}$.

Per $E_{m,l}$ si può notare che la profondità di taglio critica, per le travi appartenenti al Gruppo 3 ($I_n \geq 6$), corrisponde a quella raggiunta dal primo taglio; per quelle appartenenti al Gruppo 2 ($2 < I_n \leq 2.8$) corrisponde alla profondità raggiunta con la realizzazione del terzo taglio, mentre le travi che appartengono ai Gruppi 0 e 1 ($I_n \leq 2$) non subiscono variazioni significative di $E_{m,l}$ indipendentemente dalla profondità dei tagli realizzati.

Nel caso di $E_{m,g}$, le travi appartenenti al Gruppo 0 (incidenza fessurazioni < 0.38) subiscono variazioni contenute fino a valori massimi del 12% entro il secondo taglio, che può essere quindi considerato come corrispondente alla profondità di taglio critica per il gruppo. Per il Gruppo 1 ($0.38 < \text{incidenza fessurazioni} \leq 0.52$) la profondità di taglio

critica può essere identificata con quella raggiunta dopo la realizzazione del primo e secondo taglio, corrisponde ad una riduzione di $E_{m,g}$ prossima o superiore al 10%; nel caso del Gruppo 2 (incidenza fessurazioni > 0.52) la profondità di taglio critica corrisponde a quella raggiunta dal primo dei tagli realizzati.

Per entrambi i valori di E si può osservare che il peggioramento delle caratteristiche (che corrisponde ad un aumento del numero assegnato ad ogni gruppo) individuate come le principali responsabili delle variazioni dei valori di E quali incidenza dei nodi per $E_{m,l}$ ed estensione delle fessurazioni da ritiro per $E_{m,g}$, corrisponde ad una riduzione della profondità di taglio critica, cioè si traduce in una minor capacità di sopportare tagli di profondità elevata.

Capitolo 5

Metodologia per la stima del Modulo Elastico e la previsione delle sue variazioni

5.1 L'IMPIEGO DELLE PROVE NON DISTRUTTIVE PER LA PREVISIONE DELLE VARIAZIONI DI E IN OPERA

L'efficacia delle prove a vibrazione trasversale nel fornire un valore simile a quello reale (soprattutto per $E_{m,g}$), e la loro attendibilità anche dopo la realizzazione dei tagli, le rende idonee all'impiego diretto in cantiere, qualora le condizioni lo consentano. Il loro utilizzo potrebbe essere di aiuto, in fase preliminare, per determinare l'effetto dei tagli realizzati su travi predisposte per l'esecuzione di interventi di rinforzo. Le modalità operative possono essere diverse, a seconda che l'intervento previsto sia da realizzare su un numero elevato di elementi o su pochi:

1. nel primo caso si può individuare un campione di elementi da sottoporre alle prove di vibrazione trasversale, dopo la realizzazione dei tagli, ed utilizzare i risultati per meglio dimensionare gli interventi, o per decidere se estendere l'intervento realizzato mediante tagli a tutti gli elementi che necessitano di rinforzo, o ad una sola parte di essi. Vista l'elevata variabilità nella riduzione dei valori di E delle travi sottoposte ai tagli (travi che hanno subito variazioni molto consistente, travi in cui è variato il valore di $E_{m,l}$ ma non quello di $E_{m,g}$ e viceversa), la composizione del campione di travi da sottoporre ad indagine preventiva può portare a risultati molto diversi. La scelta del campione risulta quindi importante, per ottenere informazioni realmente utili. Per eliminare tale incertezza si potrebbe pensare di costituire un campione di elementi scelti in modo del tutto casuale, o selezionandolo in base alle caratteristiche dei singoli, operando in due modi differenti:

- a. Individuare il campione in base alle caratteristiche medie degli elementi per i quali è stato previsto l'intervento di consolidamento. Tale procedura è possibile in strutture antiche che presentano materiale omogeneo per qualità, caratteristiche e specie

legnosa. Il campione dovrebbe comprendere almeno 10-15 elementi, vista la variabilità nella risposta del materiale.

- b. Costituire il campione partendo da elementi per i quali ci si aspettano variazioni consistenti di E , sulla base dei risultati presentati in questa tesi (abbondanza di nodi sulla faccia interessata dal taglio, presenza di fessurazioni da ritiro profonde, interazione tra difetti e tagli), ed altri dai quali ci si aspetta di ottenere, dopo la realizzazione dei tagli, variazioni contenute di E .
2. Nel caso in cui gli elementi da sottoporre a rinforzo siano pochi, la realizzazione di prove preliminari può essere comunque attuata, non più allo scopo di verificare preventivamente la risposta degli elementi sottoposti a tagli, prima di estendere l'intervento a tutti gli altri, ma per stimare il valore di E , per meglio dimensionare il tipo di intervento da realizzare su ognuno degli elementi testati. In questo caso, essendo la realizzazione dei tagli non reversibile, e realizzata su tutti gli elementi (pochi) per i quali è stata progettata, il risultato dell'indagine non permette di adottare soluzioni di intervento alternative.

5.2 PREVISIONE DELLA VARIAZIONE DI E MEDIANTE IL RILIEVO DELLE CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI

Per scegliere un campione rappresentativo, come indicato al punto 1.b del paragrafo precedente o per valutare le possibili riduzioni di E , conseguenti la realizzazione di un taglio simile a quello effettuato per le prove oggetto della tesi, senza eseguire prove preliminari, si può comunque far riferimento alle indicazioni ottenute dalle prove eseguite ed illustrate nel Capitolo 3, su cui sono basati gli schemi riportati al termine del paragrafo (Figure 5.1 e 5.2). Tali schemi permettono, sulla base delle caratteristiche di ogni singolo elemento, di individuare quale livello di variazione è possibile aspettarsi, dopo la realizzazione dei tagli, sulla base di alcune caratteristiche macroscopiche degli elementi e della profondità di taglio. Considerando la naturale variabilità del comportamento del legno, non è possibile fornire indicazioni dettagliate sulle variazioni di E ; per questo negli schemi vengono considerati tre livelli di variazione di E : A ($E < 10\%$); B ($10\% < E \leq 20\%$); C ($E \geq 20\%$). Nella realtà gli interventi di consolidamento, realizzati mediante l'inserimento di materiali di rinforzo in tagli praticati nel legno, possono essere eseguiti in modo diverso da quello studiato (§ 1.2.2.1), con un maggior numero di tagli, con tagli di larghezza maggiore praticati dall'estradosso o dall'intradosso. Per questo motivo le variazioni riportate di seguito possono essere

considerate come minime, poiché l'aumento del numero dei tagli e della loro dimensione, potrà, solo nel caso migliore, portare agli stessi risultati.

L'esito di tagli eseguiti a partire dall'estradosso, anziché dall'intradosso, dovrebbe fornire risultati simili a quelli ottenuti testando le travi oggetto della tesi, poiché l'interazione tra difetti e tagli genera, a parità di sollecitazione, lo stesso effetto sul comportamento elastico della trave, indipendentemente dal fatto che il difetto si trovi in zona tesa o compressa (contrariamente a quanto avviene per il modulo di rottura).

Un approccio semplice, e cautelativo, per la stima degli effetti dei tagli, passa attraverso il solo rilievo delle caratteristiche individuate come responsabili delle variazioni di $E_{m,g}$ (estensione delle fessurazioni da ritiro e posizione del midollo), poiché $E_{m,g}$ assume, normalmente, un valore simile, o inferiore, rispetto a quello di $E_{m,l}$; le variazioni percentuali massime di $E_{m,g}$ sono sempre risultate maggiori rispetto a quelle di $E_{m,l}$, ed anche il valore finale, ottenuto dopo la realizzazione dei tagli, è maggiore per $E_{m,l}$.

I risultati di E sono riferiti a tratti di misura diversi: $E_{m,l}$ è stato calcolato su di una lunghezza compresa tra 90 e 120 cm, $E_{m,g}$ tra 250 e 400 cm. Operativamente si potrà procedere determinando le caratteristiche dell'intero elemento e la loro influenza su E , e, qualora necessario (ad es. per elementi che sorreggono carichi concentrati in più punti posti a distanza fino a 120 cm), anche procedere alla valutazione della variazione di E su un tratto minore, tramite il rilievo delle dimensioni e del numero di nodi. In base alla lunghezza del tratto considerato l ($l \geq 240$ cm, basato sui dati di variazione di $E_{m,g}$; $l < 120$ cm basato sui dati di variazione di $E_{m,l}$) si potrà utilizzare uno o l'altro degli schemi, a seconda delle valutazioni riportate in precedenza.

E' necessario ricordare che l'eventuale utilizzo degli schemi riportati in seguito dovrebbe avvenire a cura di un tecnologo del legno specializzato, poiché il rilievo delle caratteristiche necessarie può non essere sempre facile e perché la naturale variabilità del legno, la presenza di caratteristiche non considerate, che potrebbero comunque avere un effetto importante (ad esempio lesioni o cipollature potrebbero svolgere un ruolo simile a quello delle fessurazioni da ritiro) andrebbe considerato con grande attenzione e cautela.

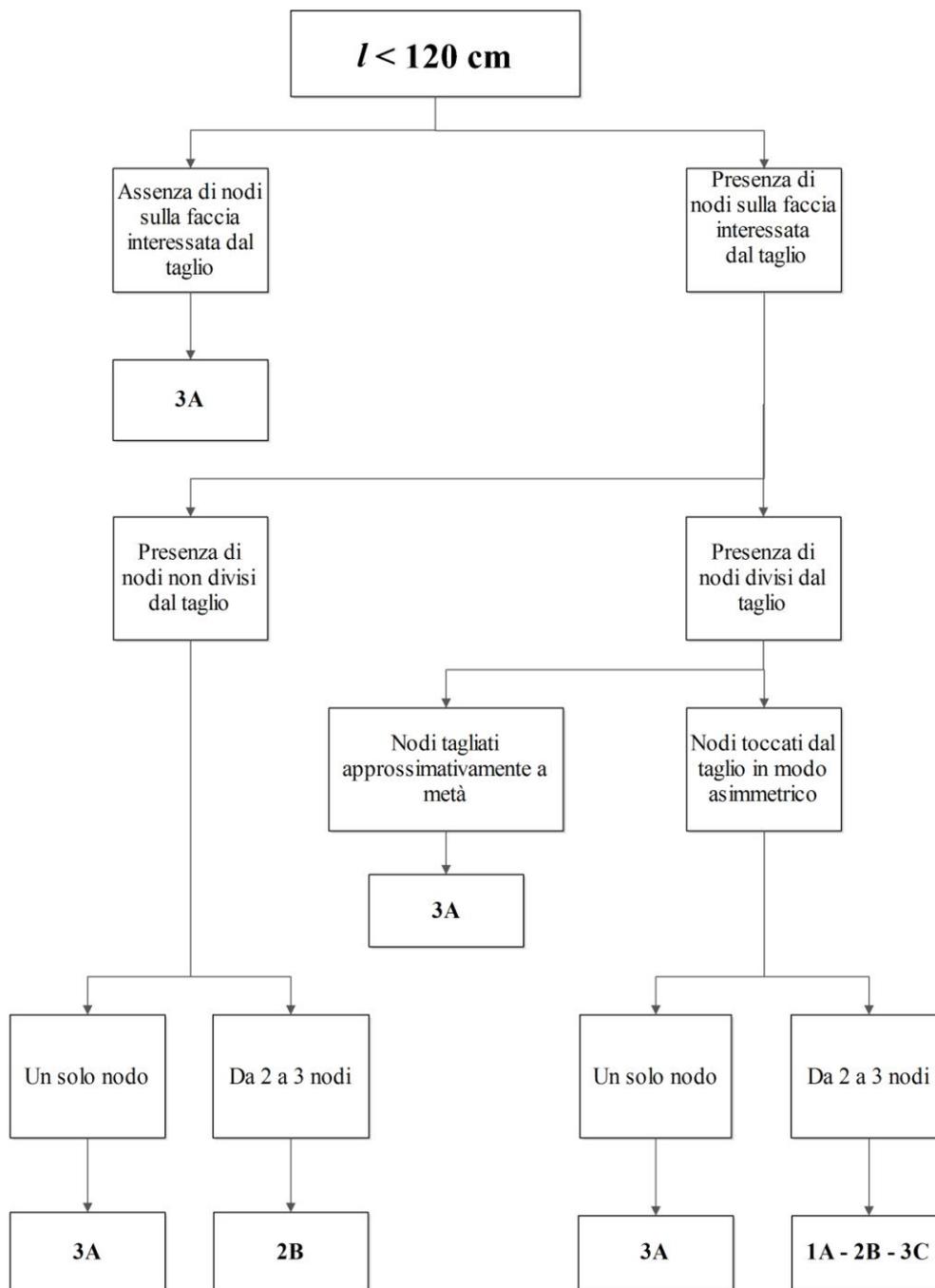


Figura 5.1 – Schema per la previsione delle variazioni di E su tratti di lunghezza inferiore a 120 cm. (1, 2 e 3 indicano le profondità di taglio pari al 25%, 50% e 75% dell'altezza della sezione media; A, B e C indicano i tre livelli di variazione di E pari rispettivamente a $E < 10\%$; $10\% < E \leq 20\%$; $E \geq 20\%$). **1A** = riduzione di $E < 10\%$ per tagli fino al 25% dell'altezza della sezione media; **3A** = riduzione di $E < 10\%$ per tagli fino al 75% dell'altezza della sezione media; **2B** = riduzione di $10\% < E \leq 20\%$ per tagli compresi tra il 25% ed il 50% dell'altezza della sezione media; **3C** = riduzione di $E \geq 20\%$ per tagli compresi tra il 50% ed il 75% dell'altezza della sezione media.

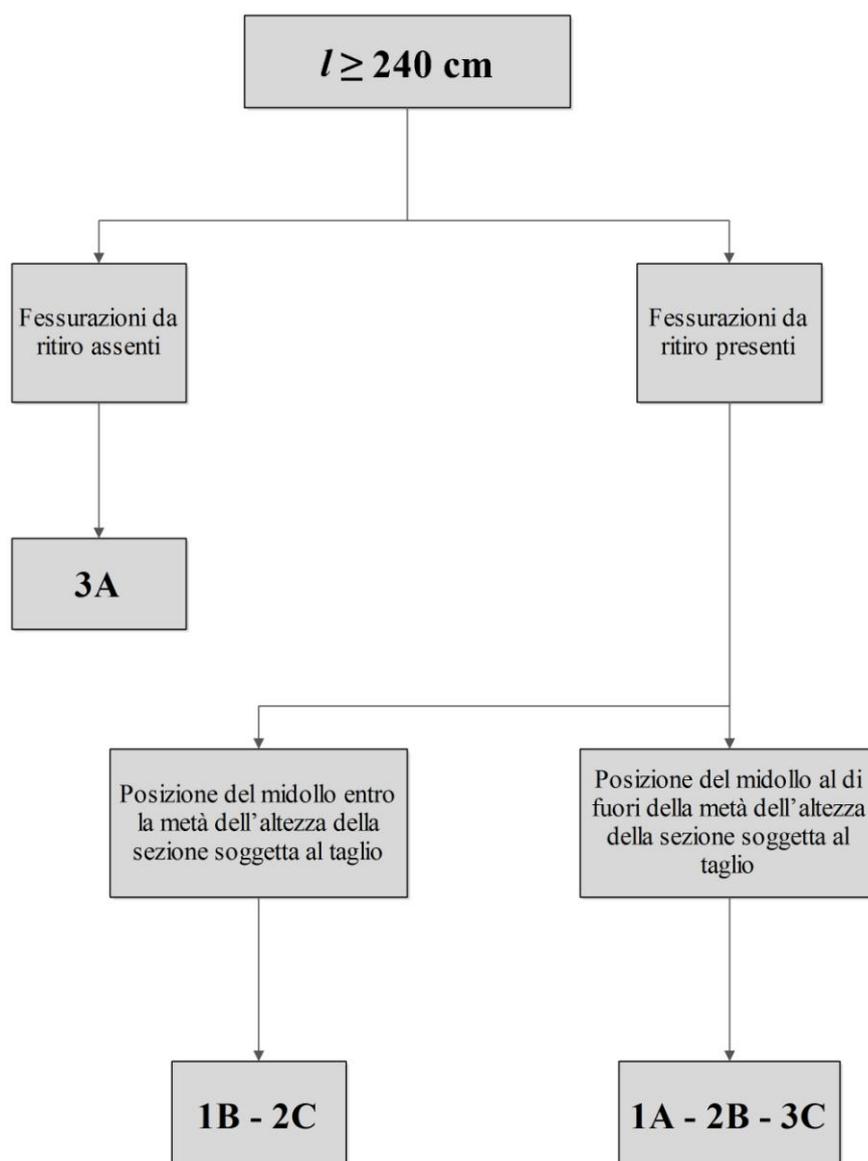


Figura 5.2 – Schema per la previsione delle variazioni di E su tratti di lunghezza pari o superiore a 240 cm. (1, 2 e 3 indicano le profondità di taglio pari al 25%, 50% e 75% dell'altezza della sezione media; A, B e C indicano i tre livelli di variazione di E pari rispettivamente a $E < 10\%$; $10\% < E \leq 20\%$; $E \geq 20\%$). **1A** = riduzione di $E < 10\%$ per tagli fino al 25% dell'altezza della sezione media; **3A** = riduzione di $E < 10\%$ per tagli fino al 75% dell'altezza della sezione media; **1B** = riduzione di $10\% < E \leq 20\%$ per tagli compresi entro il 25% dell'altezza della sezione media; **2B** = riduzione di $10\% < E \leq 20\%$ per tagli compresi tra il 50% ed il 75% dell'altezza della sezione media; **2C** = riduzione di $E \geq 20\%$ per tagli compresi tra il 25% ed il 50% dell'altezza della sezione media; **3C** = riduzione di $E \geq 20\%$ per tagli compresi tra il 50% ed il 75% dell'altezza della sezione media.

Capitolo 6

Conclusioni

Le prove eseguite hanno permesso di verificare l'effetto di un taglio, simile a quelli realizzati per gli interventi di consolidamento, prodotto al centro della faccia all'intradosso di travi antiche di abete bianco, sulle caratteristiche meccaniche delle travi sollecitate a flessione, e di verificare le relazioni esistenti tra profondità del taglio (pari al 25%, 50% e 75% dell'altezza della sezione), variazione di E , caratteristiche e difetti delle travi stesse.

La riduzione dei valori di $E_{m,l}$ è stata, in media, inferiore rispetto a quella di $E_{m,g}$, e, per il passaggio tra il secondo ed il terzo taglio, statisticamente non significativa (se riferita all'intero campione). Sia l'entità delle variazioni di E , sia la profondità di taglio a cui si sono verificate, sono state caratterizzate da grande variabilità: travi che non hanno subito variazioni, altre che le hanno subite dopo la realizzazione del primo, del secondo o del terzo taglio, altre ancora che hanno subito variazioni graduali e progressive con l'approfondimento dei tagli. La massima variazione media registrata rispettivamente per $E_{m,g}$ e $E_{m,l}$, considerando tutte le travi testate, è stata pari al 17% ed all'11%, con valori massimi di 34% e 29%.

La maggiore riduzione di $E_{m,l}$ è stata riscontrata nelle travi in cui il dimezzamento della faccia della trave, dovuto all'esecuzione del taglio, interagendo con i nodi presenti, ha determinato una riduzione della qualità del materiale, per la maggior incidenza relativa dei nodi.

Le travi che hanno subito le maggiori variazioni di $E_{m,g}$ sono quelle che presentano le fessurazioni da ritiro più estese, mentre la vicinanza delle fessurazioni alla faccia su cui è stato realizzato il taglio (espressa dalla posizione del midollo), ha influenzato la capacità del materiale di sopportare tagli di profondità diversa: travi con midollo vicino alla faccia su cui sono stati eseguiti i tagli hanno subito le maggiori variazioni di $E_{m,g}$ già dopo la realizzazione del primo taglio; travi con midollo più lontano hanno sopportato meglio il primo taglio. L'inclinazione della fibratura sembra invece

esercitare un effetto favorevole al contenimento della riduzione di $E_{m,g}$, favorendo il trasferimento dei carichi tra le porzioni di legno separate dalle fessurazioni da ritiro.

La mancanza di relazioni evidenti tra l'effetto dei tagli sui nodi, nel caso di $E_{m,g}$, o tra l'interazione tra tagli e fessurazioni da ritiro, nel caso di $E_{m,l}$, non permette di escludere a priori che i due fenomeni non influenzino entrambi i valori di E , ma potrebbero, a seconda dei casi, essere meno importanti, o il loro effetto mascherato da altro.

Le variazioni di E riscontrate sono imputabili principalmente a due effetti distinti:

- a) il primo sulla riduzione della qualità del materiale, come nel caso dell'aumento dell'incidenza dei nodi sulle nuove facce generate dal taglio.
- b) l'altro sulla capacità del legno di trasferire i carichi tra le diverse parti, dovute all'interazione tra profonde fessurazioni da ritiro e tagli.

Nel primo caso l'effetto influenza direttamente il valore di E , nel secondo può essere paragonato alla diminuzione della sezione resistente, e le variazioni di E , in tal caso, interpretabili come la variazione della risposta dell'intera trave alla sollecitazione di flessione.

L'esecuzione di un solo taglio di dimensioni ridotte non ha generato effetti importanti sulla freccia di inflessione dovuta alla sollecitazione di taglio, verificata mediante prove a vibrazione trasversale.

Tra i metodi non distruttivi indagati solo quello basato sulle vibrazioni trasversali ha permesso di ottenere valori altamente correlati ad E (valori di R^2 sempre $> 0.7^{***}$, con Errore Percentuale Medio Assoluto sempre inferiore al 12%) e di stimare con buona approssimazione le variazioni dovute alla realizzazione dei tagli, a tutte le profondità, soprattutto nel caso di $E_{m,g}$. Questo permette di proporre l'utilizzo di tale metodo per stimare le variazioni di E , su elementi sottoposti a tagli preparatori alla realizzazione di interventi di consolidamento, per meglio dimensionare l'intervento stesso; oppure, di usare la tecnica per stimare, in via preventiva, l'effetto dei tagli su un campione rappresentativo di elementi scelti tra quelli per cui l'intervento di consolidamento è stato pianificato, prima di estenderlo a tutti gli altri.

Al termine del lavoro sono stati inoltre predisposti schemi utili alla stima della possibile riduzione dei valori di E sulla base delle caratteristiche degli elementi e dei risultati presentati nella tesi. Tali schemi consentono una prima valutazione di massima dei potenziali effetti degli interventi sulle travi antiche, anche se deve essere considerata come indicativa, poiché altri fattori e difetti possono concorrere, in modo diverso, ad

influenzare i valori di E (ad esempio presenza di cipollature, dimensione e numero dei tagli differente, ecc.).

Sebbene rimanga difficile stabilire il peso delle diverse caratteristiche delle travi sulle variazioni di E (variabilità del materiale e variabilità di comportamento per lo stesso difetto), ciò che si osserva chiaramente è che il comportamento a flessione di alcuni elementi varia, a volte anche in modo molto importante, il che assume una notevole importanza pratica, indipendentemente dalle cause della variazione.

L'elevata variabilità nella riduzione dei valori di E , e dei valori massimi che questa può raggiungere (oltre al 30% del valore iniziale), come conseguenza degli interventi di rinforzo che passano attraverso l'esecuzione di tagli nel legno, indicano che:

1. i tagli non possono essere considerati come ininfluenti sul comportamento a flessione delle travi;
2. i tagli non possono essere realizzati nello stesso modo su tutti gli elementi strutturali, se non rischiando, in certi casi, importanti indebolimenti;
3. non è accettabile prescindere dalle caratteristiche dei singoli elementi lignei in fase di progettazione degli interventi di consolidamento.

I risultati illustrati possono essere considerati utili ai fini della progettazione degli interventi di rinforzo, poiché forniscono indicazioni necessarie al dimensionamento degli stessi e offrono al progettista strumenti per la valutazione degli effetti dei tagli sul legno, guidandolo verso scelte idonee e consapevoli, ai fini della conservazione.

Allegato B: prove statiche

Trave n°	J_{θ} [mm ⁴]	l [mm]	a [mm]	g [mm]	$(l/2-g)$ [mm]	E_{m,l_0}		E_{m,g_0}	
						$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	E_{m,l_0} (daN/mm ²)	$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	E_{m,g_0} (daN/mm ²)
T01	38250000	2350	625	725	450	771	1275	99	1008
T02	83245282	2350	625	725	450	1255	954	172	809
T03	153166343	3330	1015	1065	600	896	1068	119	958
T04	241920000	2540	620	670	600	1742	804	371	724
T05	241920000	2540	620	670	600	2293	1058	519	987
T06	202783333	2540	620	670	600	1384	762	191	433
T07	123480000	3840	1270	1320	600	471	872	37	599
T08	151950069	2540	620	670	600	667	490	163	492
T09	360855000	3500	1000	1150	600	1155	576	106	413
T10	385450560	3200	850	1000	600	2710	1076	296	757
T11	309729024	3500	1000	1150	600	1327	771	115	507
T12	226427652	2320	510	560	600	2271	921	328	464
T13	266189436	2790	645	795	600	1846	805	283	620

Trave n°	J_I [mm ⁴]	l [mm]	a [mm]	g [mm]	$(l/2-g)$ [mm]	$E_{m,l,l}$		$E_{m,g,l}$	
						$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	$E_{m,l,l}$ (daN/mm ²)	$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	$E_{m,g,l}$ (daN/mm ²)
T01	37061259	2350	625	725	450	705	1204	82	860
T02	81264425	2350	625	725	450	1232	959	171	822
T03	148679307	3330	1015	1065	600	873	1072	111	919
T04	237336628	2540	620	670	600	1713	805	359	696
T05	237336628	2540	620	670	600	2037	958	457	885
T06	198673489	2540	620	670	600	1339	752	178	411
T07	120250530	3840	1270	1320	600	337	641	34	572
T08	148369820	2540	620	670	600	643	484	119	369
T09	354353460,4	3500	1000	1150	600	1100	559	99	382
T10	378527948	3200	850	1000	600	2447	989	290	755
T11	303547316	3500	1000	1150	600	1281	759	105	470
T12	224070612	2320	510	560	600	1733	710	268	383
T13	260358962	2790	645	795	600	1808	806	284	635

Trave n°	J_2 [mm ⁴]	l [mm]	a [mm]	g [mm]	$(l/2-g)$ [mm]	$E_{m,l,2}$		$E_{m,g,2}$	
						$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	$E_{m,l,2}$ (daN/mm ²)	$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	$E_{m,g,2}$ (daN/mm ²)
T01	36952557	2350	625	725	450	658	1128	77	816
T02	80827327	2350	625	725	450	1243	973	154	744
T03	148106712	3330	1015	1065	600	879	1084	105	874
T04	236342293	2540	620	670	600	1668	788	277	539
T05	223157907	2540	620	670	600	1692	872	356	733
T06	197937049	2540	620	670	600	1315	742	175	407
T07	119932242	3840	1270	1320	600	341	650	33	553
T08	147905091	2540	620	670	600	644	486	114	356
T09	353112116	3500	1000	1150	600	1092	557	102	393
T10	377206415	3200	850	1000	600	2442	990	256	668
T11	302610894	3500	1000	1150	600	1291	768	100	449
T12	223014173	2320	510	560	600	1710	704	244	352
T13	258889721	2790	645	795	600	1730	776	272	612

Trave n°	$J_{-3} [mm^4]$	l [mm]	a [mm]	g [mm]	$(l/2-g)$ [mm]	E_{m,l_3}		E_{m,g_3}	
						$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	E_{m,l_3} (daN/mm ²)	$\Delta P/\Delta w$ (daN/mm)	E_{m,g_3} (daN/mm ²)
T01	36819085	2350	625	725	450	672	1155	79	836
T02	80754619	2350	625	725	450	1244	975	151	733
T03	147811044	3330	1015	1065	600	878	1085	104	866
T04	234257973	2540	620	670	600	1671	796	243	477
T05	222396971	2540	620	670	600	1702	877	287	594
T06	195926901	2540	620	670	600	1264	720	174	408
T07	119586428	3840	1270	1320	600	324	620	33	549
T08	147852634	2540	620	670	600	511	386	113	352
T09	349864558	3500	1000	1150	600	1092	562	98	384
T10	376551518	3200	850	1000	600	2351	955	258	674
T11	302106123	3500	1000	1150	600	1280	762	85	385
T12	222590125	2320	510	560	600	1747	720	223	321
T13	258199519	2790	645	795	600	1450	652	232	524

Allegato C: prove dinamiche

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	<i>ρ [kg/m³]</i>	<i>J_o [m⁴]</i>	<i>data</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>Ef</i>	<i>T1</i>	<i>E_{f,0} [MPa]</i>
T01	2,51	25	458	0,000038	13/12/2010	122	12030	0,975	11734
T02	2,54	37	488	0,000083	30/11/2010	129	9518	0,977	9296
T03	3,5	56	434	0,000153	17/12/2010	97	11544	0,975	11260
T04	2,7	55	408	0,000242	16/12/2010	158	8825	0,982	8665
T05	2,72	60	438	0,000242	30/11/2010	165	10711	0,982	10518
T06	2,73	40	319	0,000203	01/12/2010	147	6806	0,980	6672
T07	4,05	53	332	0,000123	13/12/2010	51	5739	0,975	5598
T08	2,75	40	379	0,000152	30/11/2010	108	5034	0,979	4926
T09	3,8	93	417	0,000361	03/12/2010	73	5855	0,976	5716
T10	3,51	102	479	0,000385	03/12/2010	113	11439	0,978	11191
T11	3,75	78	390	0,000310	13/12/2010	80	6706	0,976	6547
T12	2,5	36	329	0,000226	17/12/2010	176	6046	0,988	5973
T13	3,05	52	355	0,000266	17/12/2010	138	8323	0,980	8160

<i>Trave n</i>	<i>l</i> [m]	<i>m</i> [kg]	ρ [kg/m ³]	<i>data</i>	<i>E</i> _{1,0} medio [MPa]	<i>f</i> ₁ [Hz]	<i>E</i> _{1,0,1} [MPa]	<i>f</i> ₁ [Hz]	<i>E</i> _{1,0,2} [MPa]	<i>f</i> ₁ [Hz]	<i>E</i> _{1,0,3} [MPa]	<i>f</i> ₁ [Hz]	<i>E</i> _{1,0,4} [MPa]	<i>f</i> ₁ [Hz]	<i>E</i> _{1,0,5} [MPa]	<i>f</i> ₁ [Hz]	<i>E</i> _{1,0,6} [MPa]
T01	2,51	25	458	13/12/2010	14679	1110	14222	1129	14703	1138	14926	1127	14659	1135	14869	1129	14695
T02	2,54	37	488	30/11/2010	12496	993	12433	999	12569	993	12432	999	12576	1000	12598	991	12368
T03	3,5	56	434	17/12/2010	14249	819	14274	824	14463	819	14288	820	14321	807	13843	820	14305
T04	2,7	55	408	16/12/2010	12227	1011	12156	1006	12018	1030	12606	1020	12369	1013	12202	1005	12011
T05	2,72	60	438	30/11/2010	12280	990	12698	963	12023	956	11836	981	12455	977	12369	974	12299
T06	2,73	40	319	01/12/2010	9023	1004	9566	985	9211	980	9117	975	9028	974	9011	930	8205
T07	4,05	53	332	13/12/2010	6630	541	6364	540	6340	572	7131	547	6512	551	6612	560	6822
T08	2,75	40	379	30/11/2010	8565	879	8865	864	8563	873	8732	825	7809	880	8874	863	8547
T09	3,8	93	417	03/12/2010	8781	605	8822	597	8569	609	8932	594	8478	591	8412	627	9473
T10	3,51	102	479	03/12/2010	14451	779	14322	789	14685	786	14574	776	14202	779	14318	787	14605
T11	3,75	78	390	13/12/2010	9303	664	9666	658	9512	671	9877	676	10033	580	7374	653	9356
T12	2,5	36	329	17/12/2010	8758	1040	8886	1072	9437	1066	9339	1013	8422	968	7698	1033	8766
T13	3,05	52	355	17/12/2010	10963	894	10569	913	11014	910	10952	923	11258	922	11229	902	10756

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	ρ [kg/m ³]	<i>data</i>	E_{sw_0} <i>medio</i> [MPa]	v_1 [m/s]	$E_{sw_0.1}$ [MPa]	v_2 [m/s]	$E_{sw_0.2}$ [MPa]	v_3 [m/s]	$E_{sw_0.3}$ [MPa]	v_4 [m/s]	$E_{sw_0.4}$ [MPa]	v_5 [m/s]	$E_{sw_0.5}$ [MPa]	v_6 [m/s]	$E_{sw_0.6}$ [MPa]
T01	2,51	458	13/12/2010	17637	6136	17233	6029	16638	6410	18807	6199	17589	6152	17322	6311	18233
T02	2,54	488	30/11/2010	14832	5660	15646	5698	15858	5378	14126	5648	15577	5283	13630	5384	14156
T03	3,5	434	17/12/2010	14453	6075	16025	5608	13655	5747	14338	5941	15327	5547	13358	5681	14015
T04	2,7	408	16/12/2010	13117	4852	9595	5697	13227	5967	14512	5660	13055	6033	14835	5751	13478
T05	2,72	438	30/11/2010	15749	5834	14899	6333	17555	6234	17011	5861	15033	5812	14785	5895	15211
T06	2,73	319	01/12/2010	11583	6146	12033	5950	11278	5826	10810	6159	12084	6002	11473	6092	11820
T07	4,05	332	13/12/2010	6295	4406	6443	4315	6178	4398	6420	4203	5863	4303	6144	4501	6722
T08	2,75	379	30/11/2010	6883	4249	6845	4707	8401	4341	7144	4048	6211	4036	6175	4148	6522
T09	3,8	417	03/12/2010	8307	5041	10589	4837	9748	4715	9263	4266	7584	3895	6321	3900	6337
T10	3,51	479	03/12/2010	18377	6060	17574	6108	17855	6177	18263	6108	17854	6540	20469	6175	18247
T11	3,75	390	13/12/2010	11850	5128	10256	5291	10919	6017	14122	5359	11203	5575	12122	5656	12478
T12	2,5	329	17/12/2010	8934	4838	7690	5670	10562	5230	8987	5106	8566	5274	9139	5134	8660
T13	3,05	355	17/12/2010	11601	5611	11184	5593	11113	5628	11255	5822	12042	5853	12171	5773	11841

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	<i>ρ [kg/m³]</i>	<i>J₁ [m⁴]</i>	<i>data</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>Ef</i>	<i>T1</i>	<i>E_{f,1} [MPa]</i>
T01	2,51	24	455	0,000037	03/10/2011	119	11624	0,975	11338
T02	2,54	36	487	0,000081	04/10/2011	131	9882	0,977	9651
T03	3,5	55	436	0,000149	05/10/2011	97	11917	0,975	11624
T04	2,7	54	404	0,000237	06/10/2011	157	8647	0,982	8491
T05	2,72	59	434	0,000237	04/10/2011	159	9951	0,982	9771
T06	2,73	39	315	0,000199	05/10/2011	144	6504	0,980	6376
T07	4,05	52	330	0,000120	04/10/2011	49	5461	0,975	5326
T08	2,75	40	380	0,000148	05/10/2011	99	4268	0,979	4176
T09	3,8	91	412	0,000354	05/10/2011	72	5698	0,976	5563
T10	3,51	100	472	0,000379	05/10/2011	116	12111	0,978	11849
T11	3,75	76	386	0,000304	04/10/2011	78	6383	0,976	6232
T12	2,5	36	333	0,000224	06/10/2011	165	5377	0,988	5312
T13	3,05	52	357	0,000260	06/10/2011	138	8429	0,980	8264

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	<i>ρ [kg/m³]</i>	<i>data</i>	<i>E_{l,1} medio [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{l,1,1} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{l,1,2} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{l,1,3} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{l,1,4} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{l,1,5} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{l,1,6} [MPa]</i>
T01	2,51	24	455	03/10/2011	13858	1078	13327	1087	13548	1087	13547	1131	14659	1114	14213	1099	13854
T02	2,54	36	487	04/10/2011	12496	1001	12589	975	11940	1000	12569	1013	12891	1007	12740	987	12247
T03	3,5	55	436	05/10/2011	13922	810	14012	790	13317	822	14425	818	14269	788	13256	817	14253
T04	2,7	54	404	06/10/2011	12318	1011	12023	1031	12510	1031	12510	1024	12338	1012	12057	1029	12470
T05	2,72	59	434	04/10/2011	13203	1000	12823	1053	14235	999	12803	1008	13024	1012	13147	1014	13186
T06	2,73	39	315	05/10/2011	8766	992	9235	910	7775	968	8788	980	9012	981	9035	966	8751
T07	4,05	52	330	04/10/2011	5365	532	6122	313	2128	520	5844	530	6084	515	5735	538	6277
T08	2,75	40	380	05/10/2011	8853	891	9124	920	9729	879	8893	845	8214	862	8547	865	8611
T09	3,8	91	412	05/10/2011	8291	600	8563	563	7548	588	8247	598	8521	587	8214	603	8653
T10	3,51	100	472	05/10/2011	13816	755	13254	772	13848	764	13574	756	13268	782	14202	797	14750
T11	3,75	76	386	04/10/2011	8654	651	9202	641	8923	635	8775	611	8126	616	8259	630	8639
T12	2,5	36	333	06/10/2011	8235	1010	8477	975	7902	1020	8655	981	8003	990	8156	994	8217
T13	3,05	52	357	06/10/2011	10224	908	10963	817	8865	874	10144	879	10273	918	11201	863	9898

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	ρ [kg/m ³]	<i>data</i>	$E_{sw,1}$ <i>medio</i> [MPa]	v_1 [m/s]	$E_{sw,1,1}$ [MPa]	v_2 [m/s]	$E_{sw,1,2}$ [MPa]	v_3 [m/s]	$E_{sw,1,3}$ [MPa]	v_4 [m/s]	$E_{sw,1,4}$ [MPa]	v_5 [m/s]	$E_{sw,1,5}$ [MPa]	v_6 [m/s]	$E_{sw,1,6}$ [MPa]
T01	2,51	455	03/10/2011	17569	6179	17365	6111	16984	6418	18732	6248	17756	6179	17365	6152	17212
T02	2,54	487	04/10/2011	14985	5652	15547	5684	15723	5433	14365	5695	15785	5408	14235	5412	14255
T03	3,5	436	05/10/2011	14256	6060	15996	5432	12851	5716	14230	5843	14870	5582	13569	5674	14020
T04	2,7	404	06/10/2011	12678	5579	12566	5381	11692	5509	12256	5462	12047	5881	13963	5792	13544
T05	2,72	434	04/10/2011	15986	5927	15231	6524	18456	5930	15244	5935	15271	6163	16467	5930	15247
T06	2,73	315	05/10/2011	11256	5654	10057	6020	11403	5846	10755	6149	11896	6011	11369	6190	12056
T07	4,05	330	04/10/2011	5792	4116	5591	4224	5889	4073	5476	4132	5636	4275	6033	4309	6127
T08	2,75	380	05/10/2011	6899	4498	7691	4517	7756	4185	6659	4286	6983	4039	6202	4007	6103
T09	3,8	412	05/10/2011	8541	4891	9863	4921	9986	4583	8660	4553	8547	4279	7551	4013	6639
T10	3,51	472	05/10/2011	18872	6304	18743	6220	18247	6522	20059	6123	17683	6453	19637	6324	18863
T11	3,75	386	04/10/2011	11545	5097	10039	5312	10904	5346	11045	5587	12062	5766	12851	5657	12369
T12	2,5	333	06/10/2011	8236	4503	6746	4977	8241	5200	8996	5072	8559	4976	8236	5096	8638
T13	3,05	357	06/10/2011	11298	5147	9460	5614	11254	5690	11563	5612	11247	5842	12188	5815	12076

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	ρ [kg/m ³]	J_2 [m ⁴]	<i>data</i>	f_1 [Hz]	<i>Ef</i>	<i>T1</i>	$E_{f,2}$ [MPa]
T01	2,51	24	453	0,000037	21/12/2011	116	10912	0,975	10643
T02	2,54	36	495	0,000081	22/12/2011	128	9580	0,977	9356
T03	3,5	55	436	0,000148	21/12/2011	99	12123	0,975	11825
T04	2,7	53	401	0,000236	22/12/2011	156	8407	0,982	8255
T05	2,72	58	433	0,000223	21/12/2011	151	9406	0,982	9236
T06	2,73	39	314	0,000198	21/12/2011	140	6147	0,980	6026
T07	4,05	51	329	0,000120	21/12/2011	49	5380	0,975	5247
T08	2,75	39	380	0,000148	21/12/2011	98	4144	0,979	4055
T09	3,8	90	412	0,000353	22/12/2011	72	5657	0,976	5523
T10	3,51	98	471	0,000377	22/12/2011	113	11279	0,978	11035
T11	3,75	75	386	0,000303	22/12/2011	79	6483	0,976	6329
T12	2,5	36	333	0,000223	22/12/2011	161	5118	0,988	5056
T13	3,05	51	359	0,000259	19/12/2011	137	8302	0,980	8140

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	<i>ρ [kg/m³]</i>	<i>data</i>	<i>E_{L2} medio [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L2,1} [MPa J]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L2,2} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L2,3} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L2,4} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L2,5} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L2,6} [MPa]</i>
T01	2,51	24	453	21/12/2011	13741	1032	12153	1086	13457	1078	13241	1135	14687	1135	14698	1116	14210
T02	2,54	36	495	22/12/2011	12088	958	11720	965	11886	964	11863	973	12077	981	12289	997	12693
T03	3,5	55	436	21/12/2011	13381	791	13369	780	13004	800	13665	789	13287	783	13100	806	13861
T04	2,7	53	401	22/12/2011	12300	1013	12000	1033	12475	1050	12881	1023	12236	1011	11963	1023	12245
T05	2,72	58	433	21/12/2011	13260	1001	12844	1050	14133	1025	13477	997	12751	1003	12896	1025	13459
T06	2,73	39	314	21/12/2011	8562	987	9125	931	8124	900	7599	970	8823	987	9136	956	8565
T07	4,05	51	329	21/12/2011	6373	506	5536	521	5869	551	6555	561	6806	562	6830	554	6642
T08	2,75	39	380	21/12/2011	8255	885	9007	891	9122	840	8114	822	7773	816	7659	826	7855
T09	3,8	90	412	22/12/2011	8455	588	8244	567	7666	610	8863	610	8869	588	8223	610	8865
T10	3,51	98	471	22/12/2011	13769	754	13202	773	13855	763	13516	778	14026	765	13566	789	14449
T11	3,75	75	386	22/12/2011	8766	652	9223	652	9211	648	9113	631	8634	597	7723	633	8692
T12	2,5	36	333	22/12/2011	8425	1024	8718	994	8217	1025	8740	994	8214	988	8125	1013	8536
T13	3,05	51	359	19/12/2011	9963	829	9176	844	9501	843	9486	841	9434	921	11327	902	10854

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	ρ [kg/m ³]	<i>data</i>	$E_{sw,2}$ <i>medio</i> [MPa]	v_1 [m/s]	$E_{sw,2,1}$ [MPa]	v_2 [m/s]	$E_{sw,2,2}$ [MPa]	v_3 [m/s]	$E_{sw,2,3}$ [MPa]	v_4 [m/s]	$E_{sw,2,4}$ [MPa]	v_5 [m/s]	$E_{sw,2,5}$ [MPa]	v_6 [m/s]	$E_{sw,2,6}$ [MPa]
T01	2,51	453	21/12/2011	17563	6189	17336	6136	17039	6443	18786	6281	17855	6138	17049	6185	17313
T02	2,54	495	22/12/2011	14693	5582	15411	5624	15644	5362	14217	5531	15128	5254	13649	5341	14109
T03	3,5	436	21/12/2011	13866	5869	15008	5468	13027	5691	14108	5712	14214	5456	12968	5643	13871
T04	2,7	401	22/12/2011	12899	5677	12926	5427	11810	5671	12896	5599	12574	5918	14047	5724	13141
T05	2,72	433	21/12/2011	15932	6375	17599	6369	17566	5967	15423	5885	15001	5857	14856	5914	15147
T06	2,73	314	21/12/2011	11458	5981	11247	6063	11555	5933	11064	6224	12178	5972	11210	6047	11494
T07	4,05	329	21/12/2011	5466	4228	5888	4066	5445	4109	5561	3987	5236	4270	6007	3761	4659
T08	2,75	380	21/12/2011	6937	4517	7755	4521	7769	4043	6214	4198	6699	4140	6517	4044	6218
T09	3,8	412	22/12/2011	8354	4846	9680	4890	9855	4228	7369	4585	8665	4395	7963	3999	6592
T10	3,51	471	22/12/2011	18236	6226	18247	6271	18512	6119	17625	6224	18230	6226	18247	6279	18555
T11	3,75	386	22/12/2011	11022	4998	9632	5236	10574	5339	10992	5240	10587	5580	12008	5657	12339
T12	2,5	333	22/12/2011	8659	4443	6566	5069	8547	5514	10114	5103	8663	5259	9201	5162	8863
T13	3,05	359	19/12/2011	11209	5271	9963	5685	11587	5514	10901	5606	11269	5658	11477	5799	12057

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	<i>ρ [kg/m³]</i>	<i>$J_{.3}$ [m⁴]</i>	<i>data</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>Ef</i>	<i>T1</i>	<i>$E_{f,3}$ [MPa]</i>
T01	2,51	23	447	0,000037	06/03/2012	115	10383	0,975	10127
T02	2,54	36	493	0,000081	08/03/2012	128	9445	0,977	9224
T03	3,5	54	435	0,000148	08/03/2012	98	11783	0,975	11493
T04	2,7	52	397	0,000234	07/03/2012	143	7044	0,982	6916
T05	2,72	57	431	0,000222	05/03/2012	158	10211	0,982	10027
T06	2,73	38	312	0,000196	05/03/2012	140	6107	0,980	5987
T07	4,05	50	327	0,000120	07/03/2012	49	5247	0,975	5118
T08	2,75	39	379	0,000148	07/03/2012	98	4066	0,979	3978
T09	3,8	88	411	0,000350	05/03/2012	71	5441	0,976	5312
T10	3,51	97	469	0,000377	05/03/2012	112	10994	0,978	10756
T11	3,75	74	383	0,000302	07/03/2012	72	5337	0,976	5210
T12	2,5	35	331	0,000223	07/03/2012	160	4967	0,988	4907
T13	3,05	50	356	0,000258	05/03/2012	126	6952	0,980	6816

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	<i>m [kg]</i>	<i>ρ [kg/m³]</i>	<i>data</i>	<i>E_{L3} medio [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L3.1} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L3.2} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L3.3} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L3.4} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L3.5} [MPa]</i>	<i>f₁ [Hz]</i>	<i>E_{L3.6} [MPa]</i>
T01	2,51	23	447	06/03/2012	13509	1043	12255	1070	12896	1070	12885	1109	13854	1173	15507	1101	13657
T02	2,54	36	493	08/03/2012	12544	994	12566	995	12582	990	12456	962	11755	1003	12785	1016	13120
T03	3,5	54	435	08/03/2012	13955	854	15560	806	13874	799	13605	792	13369	791	13355	809	13966
T04	2,7	52	397	07/03/2012	11681	982	11167	1024	12144	999	11567	1002	11632	1000	11587	1017	11989
T05	2,72	57	431	05/03/2012	12988	995	12633	1002	12805	1019	13259	1017	13202	1006	12927	1013	13102
T06	2,73	38	312	05/03/2012	8689	1001	9322	1008	9460	887	7315	908	7663	990	9120	997	9254
T07	4,05	50	327	07/03/2012	7232	557	6666	565	6854	585	7348	590	7480	581	7259	602	7785
T08	2,75	39	379	07/03/2012	8264	879	8856	903	9354	887	9029	812	7568	793	7208	812	7569
T09	3,8	88	411	05/03/2012	8321	600	8556	602	8609	573	7785	572	7756	592	8324	612	8896
T10	3,51	97	469	05/03/2012	14605	786	14296	823	15661	793	14536	794	14580	768	13625	804	14932
T11	3,75	74	383	07/03/2012	8563	647	9028	658	9336	630	8563	618	8247	591	7536	634	8668
T12	2,5	35	331	07/03/2012	8358	1010	8450	991	8127	1035	8863	1021	8630	974	7856	997	8222
T13	3,05	50	356	05/03/2012	9832	832	9175	845	9448	835	9236	829	9107	905	10856	918	11170

<i>Trave n°</i>	<i>l [m]</i>	ρ [kg/m ³]	<i>data</i>	E_{sw_3} <i>medio</i> [MPa]	v_1 [m/s]	$E_{sw_3.1}$ [MPa]	v_2 [m/s]	$E_{sw_3.2}$ [MPa]	v_3 [m/s]	$E_{sw_3.3}$ [MPa]	v_4 [m/s]	$E_{sw_3.4}$ [MPa]	v_5 [m/s]	$E_{sw_3.5}$ [MPa]	v_6 [m/s]	$E_{sw_3.6}$ [MPa]
T01	2,51	447	06/03/2012	17864	6231	17355	6250	17457	6529	19051	6321	17855	6358	18065	6240	17401
T02	2,54	493	08/03/2012	14256	5414	14439	5473	14752	5208	13362	5417	14455	5370	14203	5393	14325
T03	3,5	435	08/03/2012	13857	5771	14505	5439	12880	5711	14203	5866	14982	5475	13055	5571	13517
T04	2,7	397	07/03/2012	12933	5653	12704	5450	11808	5553	12255	5794	13342	5851	13609	5909	13880
T05	2,72	431	05/03/2012	14882	5862	14822	5992	15486	5842	14723	5871	14866	5918	15108	5755	14287
T06	2,73	312	05/03/2012	11326	5623	9865	6089	11570	5935	10992	6249	12186	6018	11299	6213	12044
T07	4,05	327	07/03/2012	5976	4143	5620	4215	5818	4384	6294	4198	5772	4326	6128	4360	6224
T08	2,75	379	07/03/2012	7048	4614	8070	4335	7125	4354	7186	4271	6915	4079	6308	4199	6684
T09	3,8	411	05/03/2012	8322	4848	9655	4997	10257	4472	8217	4480	8245	4196	7234	3924	6324
T10	3,51	469	05/03/2012	17890	6228	18202	6111	17523	6230	18214	6041	17122	6207	18078	6228	18201
T11	3,75	383	07/03/2012	11389	5081	9899	5313	10825	5426	11289	5585	11963	5651	12247	5620	12111
T12	2,5	331	07/03/2012	8944	4685	7269	5423	9739	5373	9560	5197	8945	5203	8963	5268	9188
T13	3,05	356	05/03/2012	11675	5170	9517	5617	11234	5943	12573	5751	11774	5889	12347	5950	12605

Allegato D : parametri per il calcolo di G

<i>Trave n°</i>	<i>l (m)</i>	<i>J (m⁴)</i>	<i>A (m²)</i>	<i>f₁</i>	<i>x_{n_1}</i>	<i>y_{n_1}</i>	<i>f₂</i>	<i>x_{n_2}</i>	<i>y_{n_2}</i>	<i>f₃</i>	<i>x_{n_3}</i>	<i>y_{n_3}</i>	<i>f₄</i>	<i>x_{n_4}</i>	<i>y_{n_4}</i>
T01	2,51	3,71E-05	0,0218	122	0,0958	27588642	296	0,2657	21205949	487	0,4041	14942390	690	0,5166	10976970
T03	2,54	8,13E-05	0,0298	129	0,1101	20306566	324,5	0,3271	16708720	529	0,48827	11558806	764	0,6486	8822883
T04	3,50	1,49E-04	0,0369	97	0,1178	27857852	245,8	0,3562	23328503	414	0,56783	17234090	580	0,7098	12378437
T05	2,70	2,37E-04	0,0500	158	0,1878	22448107	345,5	0,4189	13874692	486	0,46567	7146405	565	0,4008	3534550
T06	2,72	2,37E-04	0,0504	165	0,2074	25371500	333,4	0,3959	13418787	497	0,49423	7762163	-	-	-
T07	2,73	1,99E-04	0,0460	147	0,1651	22182263	324,7	0,3783	14082306	522	0,54922	9474102	747	0,7163	7100034
T08	4,05	1,20E-04	0,0336	51	0,0435	15536078	153	0,1848	18276621	268	0,31861	14597231	380	0,4079	10739653
T09	2,75	1,48E-04	0,0384	108	0,0908	13831563	220	0,1762	7434306	330	0,22273	4354224	-	-	-
T10	3,80	3,54E-04	0,0584	73	0,0785	14555156	172,2	0,2061	10587562	303	0,35854	8533021	445	0,4925	6735343
T11	3,51	3,79E-04	0,0607	113	0,1609	24754753	261,2	0,4047	17252392	428,5	0,61178	12086276	571,1	0,6921	7856648
T12	3,75	3,04E-04	0,0533	80	0,0928	17843165	171,7	0,1996	10637394	265,6	0,26829	6625805	-	-	-
T13	2,50	2,24E-04	0,0438	176	0,1987	18911373	402	0,4862	12822714	637	0,68586	8380976	-	-	-
T14	3,05	2,60E-04	0,0480	138	0,1825	24360609	306,3	0,4202	15544081	485	0,59178	10143119	651	0,6790	6687629

Prove realizzate prima dell'esecuzione dei tagli

Trave n°	l (m)	J (m⁴)	A (m²)	f_1	x_{n-1}	y_{n-1}	f_2	x_{n-2}	y_{n-2}	f_3	x_{n-3}	y_{n-3}	f_4	x_{n-4}	y_{n-4}
T01	2,51	3,68E-05	0,0207	115	0,0856	23627052	277	0,2329	18706585	454	0,3512	13071368	690	0,5166	11049170
T03	2,54	8,08E-05	0,0286	128	0,1096	19501985	313	0,3033	15593619	-	-	-	779	0,6743	9229929
T04	3,50	1,48E-04	0,0354	98	0,1206	27520416	239	0,3374	22231349	405	0,5439	16606198	566	0,6761	11861504
T05	2,70	2,34E-04	0,0484	143	0,1538	18024029	338	0,4017	13477260	486	0,4659	7244497	-	-	-
T06	2,72	2,22E-04	0,0488	158	0,1905	24078929	349	0,4346	15718646	531	0,5633	9441486	-	-	-
T07	2,73	1,96E-04	0,0444	140	0,1513	19907838	328	0,3867	14598116	526	0,5577	9754711	526	0,3557	3575171
T08	4,05	1,20E-04	0,0377	49	0,0405	16298740	164	0,2133	21203361	273	0,3301	15206563	386	0,4211	11147058
T09	2,75	1,48E-04	0,0369	98	0,0742	10907375	184	0,1238	5241232	260	0,1386	2718615	-	-	-
T10	3,80	3,50E-04	0,0566	71	0,0741	13470702	145	0,1470	7645312	225	0,1977	4765619	-	-	-
T11	3,51	3,77E-04	0,0589	112	0,1589	23831008	241	0,3453	14801003	393	0,5141	10209567	-	-	-
T12	3,75	3,02E-04	0,0516	72	0,0757	14155413	185	0,2315	12394681	296	0,3332	8268616	-	-	-
T13	2,50	2,23E-04	0,0422	160	0,1655	15256557	403	0,4892	12985178	638	0,6876	8457924	-	-	-
T14	3,05	2,58E-04	0,0462	126	0,1531	19862615	296	0,3913	14595740	499	0,6264	10826953	-	-	-

*Prove realizzate dopo la realizzazione
del terzo taglio*

Allegato E: simboli

a = punto applicazione del carico in una prova statica di flessione a 4 punti
 A_s = area della sezione trasversale
 b = base
 C = minima distanza tra midollo e intradosso della trave
 d = distanza dell'asse neutro dall'intradosso
 E = Modulo Elastico Statico determinato tramite prove statica di flessione a 4 punti
 E_f = Modulo Elastico Dinamico calcolato mediante prove di vibrazione libera flessionale
 E_l = Modulo Elastico Dinamico calcolato mediante prove di vibrazione libera longitudinale
 $E_{m,g}$ = Modulo Elastico Globale determinato tramite prova statica a flessione a 4 punti
 E_{m,g_0} = Modulo Elastico Globale determinato sulla trave integra
 E_{m,g_1} = Modulo Elastico Globale determinato sulla trave dopo la realizzazione del primo taglio
 E_{m,g_2} = Modulo Elastico Globale determinato sulla trave dopo la realizzazione del secondo taglio
 E_{m,g_3} = Modulo Elastico Globale determinato sulla trave dopo la realizzazione del terzo taglio
 $E_{m,l}$ = Modulo Elastico Globale determinato tramite prova statica a flessione a 4 punti
 E_{m,l_0} = Modulo Elastico Locale determinato sulla trave integra
 E_{m,l_1} = Modulo Elastico Locale determinato sulla trave dopo la realizzazione del primo taglio
 E_{m,l_2} = Modulo Elastico Locale determinato sulla trave dopo la realizzazione del secondo taglio
 E_{m,l_3} = Modulo Elastico Locale determinato sulla trave dopo la realizzazione del terzo taglio
 E_{sw} = Modulo Elastico Dinamico calcolato mediante prove di propagazione di onde di pressione
 f_1 = frequenza fondamentale di vibrazione
 f_m = Modulo di Rottura a flessione
 G = Modulo di scorrimento
 g = punto distanza appoggio
 H = altezza media della sezione
 h = profondità di taglio
 I_n = incidenza dei nodi dopo il primo taglio per numero di nodi all'intradosso
 J = Momento d'inerzia
 k = fattore di taglio
 k_i = costante per la frequenza fondamentale in prove di vibrazione trasversale con estremità libere
 l = luce di prova
 m = massa
 M = momento flettente
 P = carico applicato
 p = peso umido
 p_0 = peso secco
 R^2 = coefficiente di determinazione
 R^2_{adj} = coefficiente di determinazione corretto
 u = umidità del legno
 v = velocità di propagazione delle onde di pressione
 V = volume
 η = abbassamento totale della linea elastica di una trave inflessa
 η_f = abbassamento della linea elastica di una trave inflessa dovuto alla sollecitazione di flessione
 η_g = abbassamento della linea elastica di una trave inflessa dovuto alla sollecitazione di scorrimento
 ρ = densità

Bibliografía

- Abdolahian Sohi, A. M., Khademi-Eslam, H., Hemmasi, A. H., Roohnia, M., & Telaiepour, H. (2011). Nondestructive detection of the effect of drilling on acoustic performance of wood. *BioResources*, 6(3), 2632–2646.
- Aicher, S., Hofflin, L., & Behrens, W. (2002). Determination of local and global modulus of elasticity in wooden boards. *Otto-Graf-Journal*, 13, 183–198.
- Alam, P., Ansell, M., & Smedley, D. (2009). Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded-in reinforcements. *Composites Part B: Engineering*, 40(2), 95–106. doi:10.1016/j.compositesb.2008.11.010
- Alam, P., Ansell, M., & Smedley, D. (2012). Effects of Reinforcement Geometry on Strength and Stiffness in Adhesively Bonded Steel-Timber Flexural Beams. *Buildings*, 2(3), 231–244. doi:10.3390/buildings2030231
- Arriaga, F., Herrero, M., Álvarez, R., & Maldonado, I. (2007). Efecto de las gemas en la resistencia a flexión de piezas enterizas de madera The effect of waness on the bending strength of solid timber beams. *Materiales de Construcción*, 57, 61–76.
- ASTM. (2002). Annual book of ASTM Standards Section four. Construction.
- Attar-Hassan, G. (1976). The Effect of Ageing on the Mechanical Properties of Eastern White Pine. *Association for Preservation Technology International (APT)*, 8(3), 64–73.
- Bailleres, H., Hopewell, G., & Boughton, G. (2009). MOE and MOR assessment technologies for improving graded recovery of exotic pines in Australia (Vol. 61, p. 92 pp). Melbourne.
- Bank, L. C. (1987). Shear Coefficients for Thin-Walled composite beams. *Composite Structures*, 8, 47–61.
- Bell, E. R., Peck, E. C., & Krueger, N. T. (1954). Modulus of Elasticity of wood determined by dynamic methods. *Forest Product Laboratory*. Madison - Wisconsin.
- Belluzzi, O. (1982). *Scienza delle Costruzioni (Vol.1)* (Zanichelli). Bologna.
- Belpiero, R., & Grad, I. E. (1999). The Performance of Glulam Beams Reinforced with Carbon Fibre. *Pacific Timber Engineering Conference, New Zealand*.
- Bobadilla, I., Arriaga, F., Esteban, M., & Iñiguez, G. (2012). Density estimation by vibration, screw withdrawal resistance and probing in particle and medium density fibre boards Material tested. *Forest Products Journal*, 61(1).
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. (V. Nostrand, Ed.). New York.

- Bonamini, G. (1995). Restoring timber structures - Inspection and evaluation. *Timber Engineering STEP 2 (STEP/EUROFORTECH - EU Comet Programme), D3*, Centrum Hout.
- Bordonné, P. A. (1989). Module Dynamique et Frottement Intérieur dans le Bois, Mesures sur Poutres Flottantes en Vibrations Naturelles. Institut National Polytechniques de Lorraine. Université de Nancy.
- Borri, A., Corradi, M., & Grazini, A. (2003). FRP reinforcement of wood elements under bending loads. *Structural Faults and Repair*. London.
- Boström, L. (1999). Determination of the modulus of elasticity in bending of structural timber - comparison of two methods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(2), 145–149. doi:10.1007/s001070050030
- Brancheriau, L., & Bailleres, H. (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology*. doi:10.1007/s00226-002-0143-7
- Brancheriau, L. (2006). Original article Influence of cross section dimensions on Timoshenko 's shear factor – Application to wooden beams in free-free flexural vibration. *Strength of Materials*, 63, 319–321. doi:10.1051/forest
- Buchanan, A. H. (1990). Bending Strength of Lumber. *Journal of Structural Engineering*, 116(5), 1213. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:5(1213)
- Capecchi, G. (2002). Travi antiche di abete (*Abies alba* Mill. e *Picea abies* Karst.): classificazione secondo la resistenza con metodi non distruttivi visuali e meccanici e derivazione dei valori caratteristici. *Tesi di Laurea in Scienze Forestali e Ambientali*. Università degli Studi di Firenze.
- Casado, M., Acuña, L., Vecilla, D., & Relea, E. (2010). The influence of size in predicting the elastic modulus of *Populus x euramericana* timber using vibration techniques. In P. J. S. Cruz (Ed.), *Structures and Architecture* (pp. 2025–2032). London: Taylor & Francis Group.
- Cavalli, A., & Togni, M. (2011). Combining NDT and visual strength grading to assess ancient timber beams stiffness to evaluate strengthening interventions suitability. *International Non-Destructive Testing and Evaluation Wood Symposium*. Sopron, Hungary.
- Ceccotti A. & Togni M., (1996). NDT on ancient timber beams: Assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods. *10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Lausanne, Switzerland.
- Chui, Y. H. (1991). Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters. *Wood Science and Technology*, 25(2), 125–134.

- Chui, Y. H., & Smith, I. (1990). Influence of rotatory inertia, shear deformation and support condition on natural frequencies of wooden beams. *Wood Science and Technology*, 24(3), 233–246.
- Cowper, G. R. (1966). The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory. *J. Appl. Mech.*, 33(2), 335–340.
- Dagher, H. J., & Lindyberg, R. F. (2000). FRP-Wood Hybrids for Bridges: A Comparison of E-Glass and Carbon Reinforcements. *ASCE 2000 Conference* (p. 91). Philadelphia.
- DIN 4074: 2003 - Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit.
- Doyle, D. V., & Markwardt, L. J. (1966). *Properties of Southern Pine in Relation to Strength Grading of Dimension Lumber* (p. 8). Forest Product Laboratory. Madison - Wisconsin.
- Duarte, A. C. R., De Oliveira Negrão, J. H. J., Cruz, H. M. P., & Balseiro, A. M. R. (2008). Bending Strength of Timber Beams Rehabilitated with Reinforced Epoxy Mortar Plates. *Journal of Structural Engineering*, 34(5), 792–800.
- Ehlbeck, J., & Görlacher, R. (1990). Die Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz - Problematik der Beurteilung. *Bauen mit Holz*, 2(90), 117–120.
- Erder, C. (1981). The Venice Charter under Review. *Al-turath wal-hadharah*, 3, 24–31.
- Fioravanti, M. (2011). A new vision of Cultural Heritage. *Safeguard of Cultural Heritage - a challenge from the past for the Europe of tomorrow. Cost Action Strategic Workshop* (p. 6).
- Fiorelli, J., & Dias, A. A. (2003). Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. *Materials Research*, 6(2), 193–202.
- García, M. C., Seco, J. I. F., & Prieto, E. H. (2007). Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual Improving the prediction of strength and rigidity of structural timber by combining ultrasound techniques with visual grading parameters. *Materiales de Construcción*, 57, 49–59.
- Gentile, C. J. (2000). *Flexural strengthening of timber bridge beams using FRP*. Department of Civil & Geological Engineering. University of Manitoba, Canada.
- Gentile, C., Svecova, D., Saltzberg, W., & Rizkalla, S. H. (1999). Flexural Strengthening Of Timber Beams using GFRP. Disponible presso http://www.ce.ncsu.edu/srizkal/linked_files/FlexuralStrengtheningOfTimberBeams_Gentile_Svecova.pdf
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2009). *Mechanics Of Materials*. (CL-Engineering, Ed.) (7th Edition).
- Giordano, G. (1981). *Tecnologia del Legno*. (UTET, Ed.). Torino.

- Giubileo, C. (2005). *Experimental and Theoretical Analysis of the Structural Behaviour of Ancient Timber Structures. Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Costruzioni - XVIII ciclo*. Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Gorlacher. (1987). Zerstorungsfreie Prufung von Holz: Ein in situ Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45, 273–278.
- Hanhijärvi, A., Ranta-maunus, A., & Turk, G. (2005). Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. *Vtt Publications* (p. 91).
- Hansen, C. P. (2000). Application of the Pilodyn in forest tree improvement. *Technical Note n. 55 – Danida Forest Seed Centre* (55).
- Hansson, S., & Karlsson, K. (2007). *Moisture-related creep of reinforced timber Theoretical studies and Laboratory tests*. Chalmers University of Technology - Gotheborg.
- ICOMOS. (1999). Principles for the preservation of historic timber structures (1999). *Education And Training*. Disponibile presso <http://www.icomos.org/iawc/charter-eng.htm>
- Ilic, J. (2001). Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59(3), 169–175. doi:10.1007/s001070100198
- Íñiguez, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*. Director. Departamento de Construcción y Vías Rurales. Universidad Politecnica de Madrid.
- Íñiguez, G., Arriaga, F., Bobadilla, I., & Esteban, M. (2008). Grading by non-destructive techniques and assessment of the mechanical properties of large cross section coniferous sawn timber for structural use Material tested Methodology. *Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering*. Miyazaki, Japan.
- ASTM C 1548-2002. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of *Ceramics*.
- Ishiguri, F., Matsui, R., Iizuka, K., Yokota, S., & Yoshizawa, N. (2008). Prediction of the mechanical properties of lumber by stress-wave velocity and Pilodyn penetration of 36-year-old Japanese larch trees. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66(4), 275–280. doi:10.1007/s00107-008-0251-7
- Jankowski, L. J., Jasieńko, J., & Nowak, T. P. (2010). Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique. *Materials and Structures*, 43(1-2), 141–150. doi:10.1617/s11527-009-9476-0
- John, K. C., & Lacroix, S. (2000). Composite reinforcement of timber in bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5), 899–906.

- Jones, R. (1997). Upgrading of timber members in historic buildings. *J. Inst. Wood Sci.*, (14), 192–203.
- Kasal, B., & Anthony, R. W. (2004). Advances in situ evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(2), 94–103. doi:10.1002/pse.170
- Kollman, F., & Krech, H. (1960). Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dampfung. *Holz Roh- Werkstoff*, 18, 41–54.
- Kolsky, H. (1963). *Stress Waves in Solids*. New York: Dover Publication.
- Kuipers, J. (1986). Effect of age and/or load on timber strength. *Proceedings of 19th CIB- W18/19-6-1. Florence, Italy: ICOMOS. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*.
- Lackner, R., & Foslie, M. (1988). *Gran fra Vestlandet Styrke och sortering. Medd 74*.
- Lourenco, P., Feio, A. O., & Machado, J. S. (2007). Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1617–1627. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.07.011
- Macchioni, N., Bertolini, C., & Tannert, T. (2011). *Review of Codes and Standards - in Situ Assessment of Structural Timber. State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST*.
- Machado, J. S., & Palma, P. (2010). Non-destructive evaluation of the bending behavior of in-service pine timber structural elements. *Materials and Structures*. doi:10.1617/s11527-010-9674-9
- Mannucci, M., Brunetti, M., & Macchioni, N. (2011). The Italian standard UNI 11119:2004 for the in-situ diagnosis of timber structures: pros and cons after 5 years of practical application and proposals for emendations. *SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Lisbon, Portugal.
- Markwardt, L. J. (1938). Form factors and methods of calculating the strength of wooden beams (p. 14). Forest Product Laboratory. Madison - Wisconsin.
- Marzo, A. (2006). Methodology for the analysis of complex historical wooden structures. *International Journal for Engineering and Information Sciences*, 1(1), 35–52. doi:10.1556/Pollack.1.2006.1.3.Vol.
- Mäkipää, R., & Linkosalo, T. (2011). A Non-Destructive Field Method for Measuring Wood Density of. *Silva Fennica*, 45-2(June), 1135–1142.
- Newlin, J. A., & Trayer, G. W. (1924). The influence of the form of a wooden beam on its stiffness and strength. II - Form factors of beams subjected to transverse loading only. Forest Product Laboratory. Madison - Wisconsin.

- Olsson, A., Oscarsson, J., & Johansson, M. (2010). Prediction of timber bending strength using dynamic excitation of bending modes. *WCTE - World Conference on Timber Engineering*.
- Palka, L. C., & Barrett, J. D. (1985). An examination of E/G ratios for Canadian spruce lumber. *Report to ASTM task group investigating the validity of Table 2 of ASTM D 2915-74. Forintek Canada Corp. Report on file at ASTM*.
- Pellerin, R. F. (1965). Vibrational Approach to Nondestructive Testing of Structural Lumber. *Forest Product Journal*, 15(3), 93–101.
- Piazza, M., & Riggio, M. (2007). Typological and Structural Authenticity in Reconstruction: The Timber Roofs of Church of the Pieve in Cavalese, Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(1), 60–81. doi:10.1080/15583050601126095
- Piazza, M., & Riggio, M. (2008). Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures. *Journal of Building Appraisal*, 3(4), 267–296. doi:10.1057/jba.2008.4
- Piter, J. C., Zerbino, R. L., & Blab, H. J. (2004). Effectiveness of fundamental resonant frequency for determining the elastic properties of Argentinean Eucalyptus grandis in structural sizes. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(2), 88–92. doi:10.1007/s00107-003-0435-0
- Ridley-Ellis, D., Moore, J., & Khokhar, A. (2009). Random acts of elasticity: MoE , G and EN408. *Wood EDG Conference* (pp. 2–6). Bled, Slovenia.
- Roohnia, M., Kohantorabi, M., Jahan-Latibari, A., Tajdini, A., & Ghaznavi, M. (2012). Nondestructive assessment of glued joints in timber applying vibration-based methods. *European Journal of Wood and Wood Products*. doi:10.1007/s00107-012-0616-9
- Roohnia, M., Yavari, A., & Tajdini, A. (2010). Elastic parameters of poplar wood with end-cracks. *Annals of Forest Science*, 67(4), 409. doi:10.1051/forest/2009129
- Ross, P. (2002). *Appraisal and repair of timber structures*. (P. R. and T. Telford, Ed.) (p. 237).
- Rotafix. (2011). Building Solution - Timber repairs. Disponibile presso <http://www.rotafix.co.uk/solutions-timber.htm>
- Rotafix. (2011). Timber repair. Disponibile presso <http://www.rotafix.co.uk/solutions-timber.htm>
- Rug, W., & Seeman, A. (1991). Strength of old timber. *Building Research & Information*, 19(1), 31–37.
- Schober, K. U., & Rautenstrauch, K. (2005). Experimental investigations on flexural strengthening of timber structures with cfrp. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)* (pp. 457–464). International Institute for FRP in Construction.

- Forest Product Laboratory (2010). *Wood Handbook. Wood as engineering material*. Forest Product Laboratory (p. 508). Madison, Wisconsin.
- Solli, K. H. (2000). Modulus of elasticity – local or global values. Disponibile presso <http://www.timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/P65.pdf>
- Steiger, R. (2003). Fibre reinforced plastics (FRP) in timber structures: investigations and developments. *Proceedings of the EUROWOOD Workshop on “Engineered Wood Products – Innovation and Exploitation”*, VTT, Espoo, Finland, 27. – 28. 6. 2002.
- Stumes, P. (1975). Testing the Efficiency of Wood Epoxy Reinforcement Systems. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, 7(3), 2–35.
- Tampone, G. (1996). *Il restauro delle strutture di legno*. (Hoepli, Ed.) (p. 401). Milano.
- Tampone, G., Pesci, C., & Pompucci, M. (1989). Metodologia di prova di travi lignee. Prove in laboratorio di travi lignee rinforzate con lamine metalliche. *II Congresso Nazionale Restauro del Legno* (pp. 171–206). Firenze: Nardini.
- Timoshenko, S. (1921). On the Correction for Shear of the Differential Equation for Trans-verse Vibrations of Prismatic Bars. *Philosophical Magazine and Journal of Science XLI*, VI, 744–746.
- Togni, M. (1995). Elasticità e resistenza di travi lignee antiche di grandi dimensioni: stima con metodologie non distruttive di prova applicabili in opera. *Dottorato di Ricerca in Tecnologia del Legno*. Università degli Studi di Firenze.
- UNESCO. (2001). *International Round Table “Intangible Cultural Heritage” - Working definitions* (p. 8).
- UNI 11138:2004 - Manufatti lignei Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi Wooden artefacts. *Building*.
- UNI 11119: 2004 - Beni culturali - Manufatti lignei Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera. Milano: UNI.
- UNI 11035-1: 2010 - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica Parte 1 : Terminologia e misurazione delle caratteristiche.
- UNI 11035-2: 2010 - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica Parte 2 : Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale.
- Wolfe, R., & Murphy, J. (2005). Strength of small-diameter round and tapered bending members. *Forest Product Journal*, 55(9801), 50–55.
- Yokoyama, M., Gril, J., Matsuo, M., Yano, H., Sugiyama, J., Clair, B., Kubodera, S., et al. (2009). Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings. *Physics and heritage*, 10(7), 601 – 611.

