



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DEL LEGNO – VII° CICLO

CURRICULUM: "TECNOLOGIA DEL LEGNO"

**ELASTICITÀ E RESISTENZA DI TRAVI LIGNEE ANTICHE
DI GRANDE SEZIONE: STIMA CON METODOLOGIE
NON DISTRUTTIVE APPLICABILI IN OPERA**

TESI PRESENTATA PER IL CONSEGUIMENTO DEL TITOLO DI DOTTORE DI RICERCA

CANDIDATO: MARCO TOGNI

FIRENZE – FEBBRAIO 1995

ELASTICITÀ E RESISTENZA DI TRAVI LIGNEE ANTICHE DI GRANDE SEZIONE: STIMA CON METODOLOGIE NON DISTRUTTIVE APPLICABILI IN OPERA

RIASSUNTO

Il legno è un materiale strutturale che riveste un'estrema importanza negli edifici storici. Spesso per motivi culturali, di conservazione del patrimonio architettonico di cui fanno parte tante strutture antiche di legno o anche per ragioni economiche, si pone il problema della valutazione dello stato di conservazione e dell'effettiva capacità portante degli elementi lignei antichi. Questa esigenza si scontra con le difficoltà oggettive di stimare le caratteristiche del legname di strutture esistenti e la carenza di figure professionali capaci di effettuare queste valutazioni. Le conseguenze vanno a svantaggio del legno e del suo uso per ragioni di praticità, di sicurezza (legata alle incertezze delle valutazioni) e di costo.

Nel presente studio vengono esaminati alcuni dei *metodi non distruttivi* per la valutazione dello stato di conservazione e delle caratteristiche di resistenza e di elasticità di 12 travi antiche di Abete bianco (*Abies alba* Mill.), di grande sezione, provenienti da un antico edificio di Firenze: il complesso di S.Orsola. La sezione media delle travi è di 35 per 30 cm, per una lunghezza di circa 450 cm.

Ogni trave è stata oggetto di una serie di prove non distruttive costituite da un'ispezione visuale e da alcune prove strumentali. La maggior parte delle prove strumentali eseguite sono riproponibili anche su elementi lignei in opera o a pie' d'opera, grazie alle caratteristiche di semplicità e praticità. Infine sono state effettuate una serie di prove di carico di tipo statico, per mezzo delle quali sono stati determinati i valori di elasticità e di resistenza a flessione.

L'ispezione visuale, attraverso la qualificazione e quantificazione dei difetti e del degradamento presenti, ha consentito di giungere alla localizzazione delle sezioni critiche lungo l'asse della trave e alla classificazione visuale del materiale, per mezzo di alcune norme, utilizzate per materiale nuovo e di dimensioni relativamente piccole (DIN 4074, UNI 8198, classificazione proposta da GIORDANO). Si è posto poi il problema di adattare le norme utilizzate alle proprietà specifiche del legname antico e di grandi dimensioni, per ottenere una valutazione più corretta ed appropriata delle sue caratteristiche meccaniche. E' stata quindi ipotizzata la modifica di alcuni dei criteri di classificazione previsti dalle norme, per poter tollerare la presenza di piccole porzioni di legno degradato da attacchi di funghi, e di fessurazioni da ritiro, assai frequenti in questo tipo di materiale.

L'indagine effettuata attraverso le prove strumentali ha permesso di ottenere utili informazioni:

- di localizzare e in parte anche di quantificare il degradamento del legno: la misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale si è rivelata molto utile a questo scopo, anche se rimane la necessità di accostarla all'ispezione visuale, indispensabile per risolvere i casi dubbi;
- di valutare il degrado e la massa volumica superficiali: la misura della resistenza a penetrazione della superficie del legno allo spillo di due differenti Pilodyn (Pilodyn 6J e 4JR) ha fornito alcune indicazioni e soprattutto interessanti correlazioni con i valori della massa volumica ($r < -0,8$);
- di determinare alcuni moduli elastici dinamici, risultati ben correlati ($r > 0,9$) con i moduli elastici a flessione, ricavati attraverso le prove statiche: la misura del tempo di propagazione degli ultrasuoni in direzione longitudinale ha fornito i valori più

interessanti e potenzialmente, per la sua versatilità, può fornire utili informazioni a complemento delle ispezioni visuali; la frequenza di vibrazione in direzione longitudinale, pur risultando più laboriosa e legata al tipo di vincolo a cui la trave è sottoposta, ha dato ugualmente dei valori ben correlati con quelli statici ($r > 0,9$).

La misura dell'attenuazione del segnale ultrasonico in direzione longitudinale e dello smorzamento della vibrazione libera longitudinale sono le uniche prove che non hanno fornito risultati validi ai fini della previsione delle caratteristiche elastiche e delle anomalie presenti nelle travi.

Le prove di carico hanno mostrato il buon comportamento elastico e l'ottima resistenza di queste travi: il valore medio dei moduli elastici a flessione statica è risultato superiore a 11000 N/mm^2 con un minimo per la trave 11 (7100 N/mm^2), fortemente degradata, mentre la media delle resistenze a flessione è superiore a 32 N/mm^2 , e anche in questo caso il valore minimo è stato presentato dalla stessa trave ($15,3 \text{ N/mm}^2$). Valori generalmente buoni di resistenza sono stati ottenuti anche sulle travi con notevoli cipollature e con diffusi degradamenti.

Sette travi sono incorse in cedimenti per le sollecitazioni di taglio, lungo l'asse neutro, prima di superare la resistenza massima a flessione statica, facilitate in alcuni casi dalla presenza di estese fessurazioni da ritiro e cipollature, e soprattutto dalla forma poco snella degli elementi lignei. Malgrado ciò le caratteristiche meccaniche, come indicato, sono risultate buone.

E' stato possibile formulare anche alcune ipotesi riguardo alla classificazione strumentale delle travi in base alla resistenza e alla valutazione del modulo di elasticità, utilizzando alcune relazioni empiriche basate su uno o più dei parametri non distruttivi ricavati.

Alcune regressioni lineari, con il modulo di rottura (MoR) come variabile dipendente, hanno mostrato dei coefficienti di determinazione compresi tra il 70 e l'80%, mentre in altre con il modulo di elasticità risultano valori di R^2 superiori a 85%.

La formulazione di modelli matematici multiparametrici ha confermato che l'idea di associare valori ottenuti da prove "locali" a parametri che valutano la trave nella sua totalità potrebbe dare buoni frutti nella previsione della resistenza.

Per le regressioni multiple si sono ottenuti dei coefficienti di determinazione superiori al 90%. Tali risultati però possono essere validi solamente per le travi appartenenti allo stesso campione di quelle sottoposte a prova. Inoltre il fatto che la combinazione di alcuni metodi non distruttivi porti a risultati così incoraggianti deve essere valutato con ponderato entusiasmo perché è necessario che le regressioni multiple presentate, per essere confermate, vengano verificate su altri campioni e con altre prove, al fine di migliorarne l'affidabilità statistica.

Questi risultati dovrebbero spingere la ricerca verso l'acquisizione di una mole maggiore di dati sperimentali su elementi lignei di grande sezione per verificare e consolidare le metodologie proposte nello studio, nonché per arrivare alla determinazione dei valori caratteristici del materiale di questo tipo, indispensabili nel campo del recupero del legno strutturale.

INDICE

INTRODUZIONE ALLA RICERCA	1
1 OBIETTIVI DELLO STUDIO	2
2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	3
2.1 Valutazione della sezione residua degli elementi strutturali	3
2.2 Gli effetti del tempo sulle caratteristiche meccaniche del legno antico	4
2.3 Le prove strumentali non distruttive	4
2.3.1 Le tecniche delle onde di pressione	5
2.3.2 Le tecniche vibrazionali	7
2.3.3 La dissipazione di energia nella propagazione delle vibrazioni	9
2.3.4 La valutazione della densità e le caratteristiche correlate	9
3 LE TRAVI SOTTOPOSTE A PROVA	11
3.1 L'Abete bianco	11
3.2 Preparazione delle travi	12
4 METODI D'INDAGINE ADOTTATI	14
4.1 L'ispezione visuale	14
4.1.1 Rilievo delle dimensioni	15
4.1.2 Rilievo dei difetti e di alcune proprietà fisiche	15
4.1.3 Impiego di alcune norme di Classificazione visuale per la valutazione della classe di qualità resistente	18
4.1.3.1 UNI 8198 "Segati di conifere - Classificazione in base alla resistenza meccanica"	18

4.1.3.2	DIN 4074 "Classificazione del legno di conifere secondo la capacità portante - Segati di conifere"	19
4.1.3.3	Classificazione per legname strutturale proposta da Giordano (Giordano, 1993)	19
4.1.3.4	Descrizione delle travi	19
4.1.4	Stima delle porzioni degradate	20
4.1.5	Stima delle sezioni residue	20
4.2	Le prove strumentali non distruttive	22
4.2.1	Prove con i Pilodyn	22
4.2.1.1	Pilodyn 6J	22
4.2.1.2	Pilodyn 4JR	23
4.2.1.3	La metodologia di prova	23
4.2.2	Le prove con gli ultrasuoni	24
4.2.2.1	Il SYLVATEST e la misura della velocità degli ultrasuoni trasmessi lungo la fibratura del legno	24
4.2.2.2	Dissipazione dell'energia degli impulsi ultrasonici lungo la fibratura del legno	26
4.2.2.3	Il PUNDIT e la misura della velocità degli ultrasuoni trasmessi in direzione perpendicolare alla fibratura del legno	28
4.2.3	Le prove di vibrazione	29
4.2.3.1	La vibrazione libera longitudinale	29
4.2.3.2	Lo smorzamento della vibrazione libera longitudinale	30
4.3	Le prove di carico	32
4.3.1	Organizzazione delle prove	32
4.3.1.1	Il telaio di contrasto	32
4.3.1.2	La collocazione della trave	33
4.3.1.3	Gli strumenti di misura	33

4.3.2 I moduli di elasticità	34
4.3.2.1 Flessione statica a carico unico centrale	34
4.3.2.2 Flessione statica su quattro punti	35
4.3.2.3 Elaborazione del Modulo di Taglio G	36
4.3.3 Determinazione della resistenza a flessione	36
4.3.3.1 Modulo di Rottura a flessione	37
4.3.3.2 Resistenza a flessione delle travi parzializzate	37
4.3.3.3 Resistenza a Taglio	38
5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI	40
5.1 L'ispezione visuale	40
5.1.1 Considerazioni generali sul materiale	40
5.1.2 La classificazione visuale	41
5.1.2.1 Proposta di modifica di alcuni criteri di classificazione delle norme utilizzate	42
5.1.3 Stima delle sezioni residue	42
5.2 Le prove strumentali non distruttive	43
5.2.1 Le prove densitometriche	43
5.2.2 Le prove ultrasoniche	44
5.2.2.1 Analisi in direzione longitudinale	44
5.2.2.2 Analisi in direzione trasversale	46
5.2.3 Le prove vibrazionali	47
5.3 Le prove di carico	49
5.3.1 Flessione statica a carico unico centrale	50
5.3.2 Flessione statica su quattro punti	51

5.3.3	Calcolo del modulo di taglio G	52
5.3.4	I valori di resistenza	53
5.3.4.1	Il Modulo di Rottura a flessione calcolato in base al valore massimo di resistenza	53
5.3.4.2	Il Modulo di Rottura delle travi parzializzate	55
5.3.4.3	La resistenza a Taglio	55
5.3.4.4	Considerazioni sulla resistenza del materiale	56
5.4	L'analisi statistica	58
5.4.1	Le correlazioni	58
5.4.2	Le regressioni semplici	59
5.4.3	Le regressioni multiple	60
5.4.4	Un modello matematico per la calcolo delle caratteristiche di resistenza?	60
6	CONCLUSIONI	62
	BIBLIOGRAFIA	
	RINGRAZIAMENTI	

INTRODUZIONE ALLA RICERCA

Il legno è un materiale strutturale che riveste un'estrema importanza negli edifici storici. Nel passato la funzione di sostegno dei solai e delle coperture di tanti fabbricati (grandi chiese, palazzi storici e monumentali) è stata prevalentemente a carico delle travi lignee. Se a queste si aggiungono poi i pali di fondazione (anch'essi erano di uso frequente) si può arrivare ad asserire che parte del patrimonio monumentale italiano "si regge sul legno".

Al contrario oggi, nelle nuove strutture, le travi lignee sono utilizzate solo marginalmente, sostituite per lo più da metallo, cemento armato ecc. Ma le costruzioni antiche, fortunatamente, continuano ad esistere e frequentemente lo strutturista si trova di fronte al problema del recupero edilizio, del consolidamento o dell'adeguamento strutturale di edifici i cui elementi orizzontali della struttura portante sono costituiti in buona parte da legno.

Si pone così il problema della valutazione dello STATO DI CONSERVAZIONE e dell'effettiva CAPACITÀ PORTANTE degli elementi lignei antichi. Queste informazioni sono indispensabili nel caso che vi sia la necessità (o l'obbligo, in presenza di particolari vincoli) di conservare e tramandare le strutture originali.

Alcuni motivi che, tra gli altri, possono spingere alla conservazione sono:

- l'economicità: spesso il costo delle demolizioni e ricostruzioni non è trascurabile, e può risultare assai vantaggioso approfondire la conoscenza delle caratteristiche del legname in opera, per poter progettare e programmare più oculatamente le operazioni eventualmente necessarie a garantire la funzionalità statica della struttura. Inoltre il legname presente nei grandi edifici antichi è composto per lo più da elementi di notevoli dimensioni, e quindi, oggi, di difficile reperibilità,
- le esigenze storico-culturali: è la necessità di conservare e il patrimonio architettonico costituito dagli elementi lignei e dalle modalità costruttive provenienti dal passato, mantenendone non solo lo scopo decorativo, ma, se possibile, quello funzionale.

Queste esigenze si scontrano però con la condizione di "marginalità" in cui il legno, nel tempo, si è venuto a trovare. Essa dipende soprattutto da carenze nella conoscenza di questo materiale, dovute a problemi di formazione, causati prevalentemente dalla scarsa importanza che gli viene attribuita nei corsi universitari di ingegneria e di architettura. Essa può condurre ad una cattiva utilizzazione del materiale antico, spesso sottovalutato, o ancora più di frequente buttato via, e ad un sovradimensionamento del legname che va a formare elementi nuovi. Da tutto ciò deriva uno spreco di materia prima naturale e, conseguentemente, una scarsa concorrenzialità degli elementi strutturali in legno rispetto ad altri materiali.

Senza pretendere di esaminare tutte le problematiche relative al legno nelle strutture antiche, con questo studio si è cercato di fornire alcune risposte specifiche ad interrogativi particolari: come si può procedere per stimare le resistenze e l'elasticità di travi antiche di legno di grandi dimensioni? Con quali margini di sicurezza si può utilizzare una metodologia piuttosto che un'altra? Qual è il comportamento meccanico che ci si può aspettare da questo tipo di materiale?

Come applicazione, la ricerca ha esaminato vari aspetti legati alla valutazione dello stato di conservazione e della capacità portante residua di dodici travi di Abete bianco, già in opera per un lungo periodo in un edificio antico.

1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

Lo scopo della ricerca è quello di esaminare alcune metodologie per poter affrontare la valutazione dello stato di conservazione e delle caratteristiche di resistenza di travi lignee antiche in opera o a pie' d'opera.

I diversi sistemi di analisi sono stati scelti anche in base a requisiti di semplicità e di praticità per un impiego in situazioni spesso non favorevoli.

L'approccio *visuale* è stato considerato il primo livello d'indagine, il punto di partenza indispensabile per giungere ad una valutazione del materiale. Poi, per un'analisi più approfondita, sono state scelte una serie di *prove strumentali non distruttive*, eseguibili per lo più sulla trave in opera. Le prove possono rispondere ad esigenze diverse per tempi di esecuzione, disponibilità di strumenti e risultati conseguibili. La combinazione di più metodi forse può portare a risultati più significativi.

Nel presente lavoro si possono dunque distinguere tre filoni di indagine: l'esame visuale, l'analisi attraverso le prove strumentali non distruttive e la verifica attraverso le *prove meccaniche*.

Nella prima parte si cerca di stabilire alcuni criteri per l'impostazione dell'ispezione visuale, con conseguente redazione di una serie di procedure per l'osservazione e la valutazione degli elementi lignei, a vista o con l'ausilio di strumenti semplici. Il risultato di questo esame deve portare:

- alla selezione del materiale in base alla qualità, eventualmente attraverso l'uso di alcune norme di classificazione visuale;
- alla valutazione dello stato di degradamento e quindi alla stima della sezione residua degli elementi lignei.

Attraverso le prove strumentali, si cerca di completare l'insieme di informazioni disponibili valutando i risultati di un metodo o di una combinazione di metodi d'indagine. Da questo secondo approccio si vorrebbe ottenere una integrazione alla (sempre necessaria) ispezione visuale, tale da consentire valutazioni quantitativamente più accurate, eventualmente accompagnate da una classificazione strumentale delle travi e da una previsione del loro comportamento meccanico globale.

Infine le travi vengono sollecitate a flessione e quindi portate a rottura. I valori di elasticità e di resistenza, determinati con prove di laboratorio, consentiranno di determinare l'effettiva capacità portante delle travi e di verificare i dati di previsione allo scopo di individuare i parametri significativi e le procedure più efficaci per la valutazione di elementi lignei in opera del tipo oggetto di indagine.

Le indicazioni così ottenute, sebbene non immediatamente generalizzabili ad altre tipologie strutturali o altre specie legnose, potranno costituire un'utile base di partenza per successive indagini sul tema.

2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Dall'analisi della letteratura tecnico-scientifica risulta che le linee di ricerca principali seguite dai vari Autori per l'analisi degli elementi lignei di grandi dimensioni per uso strutturale sono state le seguenti:

- valutazione della sezione residua degli elementi strutturali;
- ricerca della presenza di un "effetto età" sulle caratteristiche meccaniche del legno;
- uso delle prove non distruttive per prevedere le caratteristiche di elasticità e di resistenza ed evidenziare la presenza di degradamento.

2.1 Valutazione della sezione residua degli elementi strutturali

Gli elementi lignei costituenti le tipologie strutturali più diffuse in Italia presentano normalmente sezioni trasversali notevoli. Si deve ricordare che con le grandi sezioni i difetti originari presenti nel legname, i nodi, le fessurazioni, la presenza del midollo ecc., hanno una influenza considerevolmente diversa sulla capacità portante. Perciò il comportamento meccanico di travi di grandi dimensioni conduce a risultati di prova molto differenti rispetto a quelli ottenibili da provini di modeste dimensioni e ancor più da provini piccoli e netti.

Alcuni Autori hanno preso in esame materiale di grande sezione, in opera e non, ed hanno cercato di dare risposte concrete alle esigenze del progettista.

LANIUS, in un primo tentativo (LANIUS *et al.*, 1981), ha attribuito all'elemento ligneo, attraverso un'ispezione visuale, un valore di tensione ammissibile utilizzando le norme di classificazione Nordamericane WWPA Grading Rules. Nel secondo (LANIUS, 1982) correla la misura di un modulo dinamico con il valore del modulo elastico a flessione statica (MoE) e, attraverso le normative per la classificazione a macchina (WWPA), attribuisce un valore di tensione ammissibile al segato. I risultati di queste procedure sono però molto conservativi e quindi penalizzanti per il legno.

La valutazione della resistenza residua è stata affrontata da SUTER partendo da una procedura di ispezione visuale, alla quale è stata affiancata una prova di carico "in situ" (SUTER, 1982). Ai parametri che normalmente vengono considerati nelle regole di classificazione visuale dei segati commerciali l'Autore ne aggiunge altri per tenere conto dell'età di servizio, della storia dei carichi, del degradamento, dell'umidità effettiva del materiale, dell'eventuale esposizione alle alte temperature, delle condizioni di carico ecc. Il sistema di assegnazione di questi parametri aggiuntivi fa sorgere tuttavia qualche perplessità, come apparirà più chiaro nel seguito.

Un tentativo di classificazione visuale in base alle resistenze di provini di grossa sezione è stato effettuato utilizzando il metodo DIN di misurazione della nodosità (EHLBECK E GÖRLACHER, 1987). Gli elementi lignei sono stati sottoposti a prove di compressione, flessione e taglio.

Un approccio diverso è proposto da ERLER (1989), che pone la sua attenzione su alcuni precisi fattori di riduzione della sezione efficace tra cui le fessurazioni da ritiro profonde e il degradamento. Non vi è però alcun contributo di dati sperimentali pubblicati a sostegno e verifica delle ipotesi.

Per giungere ad un valore di tensione ammissibile, per la verifica di travi di legno antico, BONAMINI, CECCOTTI, MONTINI (1990) hanno seguito due filoni di indagine: nel primo hanno suddiviso il materiale oggetto della ricerca in classi di resistenza in base alle caratteristiche visuali e ad alcune prove meccaniche e hanno attribuito alle classi dei

valori di tensione ammissibile; nel secondo hanno ricercato delle relazioni empiriche tra le prove non distruttive e il modulo di elasticità attraverso cui, grazie alle correlazioni con il modulo di rottura (MoR), hanno individuato le tensioni ammissibili.

2.2 Gli effetti del tempo sulle caratteristiche meccaniche del legno antico

Per gli scopi del presente lavoro per età dell'elemento strutturale ligneo si intende il periodo trascorso dal momento della prima posa in opera (non è raro il caso che il materiale proveniente da altre strutture sia stato reimpiegato una volta adattato alle nuove esigenze).

JESSOME (citato da SUTER, 1982) nell'ambito di uno studio su capriate di Pino del Nord America, in servizio da 97 anni, non ha rilevato differenze statisticamente significative tra resistenza e modulo elastico di legno vecchio confrontato con quello nuovo. Al contrario ATTAR-HASSAN ha trovato una diminuzione dei valori di elasticità e resistenza sull'Eastern White Pine in servizio per 141 anni.

KUIPERS (1986) mettendo a confronto i valori di massa volumica, di resistenza e modulo elastico a compressione parallela alla fibratura, e di resistenza a taglio ottenuti da provini ricavati da travi vecchie, prive di degradamento, con quelli ottenuti da provini di legno nuovo, non è riuscito ad evidenziare alcuna differenza che non rientrasse nell'ambito della normale variabilità legata alla natura biologica del legno.

Lo stesso risultato è stato ottenuto da RUG E SEEMAN (1991) attraverso prove di resistenza a compressione parallela alla fibratura su carotine di 15 mm di diametro estratte da legno vecchio e da legno nuovo. Anche in questo caso non sono risultate variazioni di resistenza in funzione dell'età del legno.

Dalle ricerche finora condotte appare chiaro che il tempo da solo, non modifica le caratteristiche tecnologiche del materiale, a condizione che non vi siano state alterazioni biologiche o carichi eccessivi. Dunque il calcolo delle tensioni di lavoro può essere condotto nello stesso modo e con gli stessi valori sia per il legno vecchio che per quello nuovo e quindi il progettista può lavorare indifferentemente con il primo o con il secondo a parità delle altre condizioni del materiale.

2.3 Le prove strumentali non distruttive

Il tema della qualificazione del legname nuovo, di modeste dimensioni, attraverso una selezione visuale o un'analisi strumentale non distruttiva è stato trattato in un cospicuo numero di pubblicazioni. Parallelamente le prove non distruttive sono state utilizzate anche per la valutazione del degradamento e delle sezioni resistenti degli elementi di legno. I controlli che sono stati eseguiti su materiale vecchio e di grosse dimensioni risultano però quantitativamente di importanza marginale. La maggior parte delle ricerche è stata condotta sui segati di nuova produzione allo scopo di ottenere una classificazione del legname per uso strutturale in base alle caratteristiche di resistenza.

I metodi sui quali più comunemente si basano le prove strumentali non distruttive sono:

- misure riguardanti la propagazione di "onde di pressione" nel materiale¹: velocità di propagazione degli ultrasuoni, emissione acustica, attenuazione del segnale, ecc.;
- misure riguardanti le modalità di vibrazione elastica della trave¹: frequenza di vibrazione trasversale, longitudinale e torsionale, frequenza di vibrazione libera e forzata, smorzamento ecc.;
- misure di massa volumica: resistenza alla penetrazione, al trapanamento, all'estrazione della vite, misura della riflessione e della permeabilità ai raggi x e ai raggi gamma ecc.;
- misure di elasticità: prove meccaniche di flessione su segati in dimensione d'uso; di flessione, di compressione ecc., su provini piccoli e netti prelevati da elementi lignei, (da STECK E GÖRLACHER, 1986, e ROSS E PELLERIN, 1991).

2.3.1 Le tecniche delle onde di pressione

Con i metodi non distruttivi che impiegano le tecniche delle onde di pressione si può ad es. misurare la velocità con cui "pacchetti" di onde elastiche (*stress waves*), di frequenza nota percorrono il legno. Essi possono essere trasmessi al legno tramite una sonda emittente, nel caso degli ultrasuoni, o con altri mezzi: per esempio mediante impulsi meccanici (percussione). Il treno di onde che viene generato è di tipo longitudinale, cioè il materiale vibra nella direzione parallela a quella in cui l'onda si propaga. Le differenze sostanziali tra i vari metodi sono legate alla frequenza con cui il materiale viene provato.

Ottime correlazioni sono state trovate tra la velocità di propagazione degli ultrasuoni (v) in direzione longitudinale e il modulo elastico a flessione statica.

SANDOZ (1989) ha trovato degli $r > 0,8$ per le relazioni $MoE-v^2$, su 330 provini di Abete rosso (*Picea abies* Karst.) di differenti dimensioni.

Risultati incoraggianti sono stati ottenuti utilizzando il tempo di propagazione per il calcolo del modulo elastodinamico (E_{us}), nel quale deve essere considerata anche la densità del materiale. Diversi autori riportano valori di r di circa 0,9 (NAKAI *et al.*, 1990); ROSS E PELLERIN (1991) dimostrano che su un campione di 113 morali di Douglasia (*Pseudotsuga menziesii* Franco) di 10 x 5 x 360 cm, passando dalla correlazione tra modulo elastico a flessione con la velocità a quella con il modulo elastico dinamico si migliorano gli r da 0,78 a 0,95.

Le onde di pressione, utilizzate in direzione longitudinale e soprattutto in direzione trasversale, sono state anche usate per localizzare e quantificare la presenza di legno degradato.

HOYLE E PELLERIN (1978) hanno usato un sistema a onde di pressione in direzione trasversale, per identificare le porzioni degradate di una struttura in legno

¹ Alcuni dei metodi dinamici citati consentono di ricavare dei moduli di elasticità (E_{din}) che vengono utilizzati per risalire ai moduli elastici statici (E_{stat}), determinati attraverso prove meccaniche statiche. Generalmente questi ultimi sono più bassi del 2-10% rispetto ai primi. La ragione di questo ben noto risultato è da attribuirsi al comportamento viscoelastico del legno (GÖRLACHER, 1990). Per poter passare da uno all'altro modulo REGIC E SRPCIC (1988) hanno proposto la regressione lineare $E_{stat} = 0,82 E_{din} + 680$, ottenuta attraverso risultati sperimentali su travi di Abete rosso.

lamellare incollato.

CHUDNOFF e *al.*(1984) hanno rilevato valori di r intorno a 0,8-0,9 tra modulo elastico a compressione, parallelamente alla fibratura, e il modulo elastico ad ultrasuoni nella stessa direzione, per materiale degradato, appartenente a diverse specie di latifoglie.

RUTHEFORD (1987) indica che con la velocità di propagazione degli ultrasuoni si spiega per l'80% la variazione del modulo elastico in materiale che ha subito del degradamento.

Allo scopo di capire meglio l'influenza dei difetti sulla propagazione degli ultrasuoni sono stati effettuati molti tentativi di simulare nodi o guasti all'interno del legno producendo fori artificiali oppure favorendo lo sviluppo controllato di carie sui provini. Ma risultati significativi sono stati ottenuti solo per materiale netto e di piccole dimensioni, dove sono poche le variabili che possono entrare in gioco (PELLERIN *et al.*, 1985, PATTON-MALLORY E DE GROOT, 1989, PALAIA *et al.*, 1994 ecc.).

Per la stima della resistenza del materiale i risultati sono meno confortanti. La misura degli ultrasuoni può dare informazioni sulle caratteristiche globali dell'elemento ligneo: sull'andamento medio dell'inclinazione della fibratura (GERHARDS, 1980), sulla massa volumica ecc.; non è però sensibile alla presenza di difetti localizzati quali nodi, deviazioni localizzate delle fibre o qualsiasi anomalia che possa avere un effetto locale rilevante sulla resistenza. La causa è da ascrivere alla lunghezza d'onda degli ultrasuoni che è abbondantemente superiore alla dimensione dei difetti citati e di conseguenza li supera senza esserne alterata.

SANDOZ (1989) ha ottenuto valori di $r \approx 0,66$ per le correlazioni tra modulo di resistenza a flessione e velocità.

NAKAI *et al.* (op.cit.) dalle prove di resistenza a flessione eseguite su un campione di 200 travi 10 x 10 x 400 cm di *Cryptomeria japonica* Don e di *Chamaecyparis obtusa* Sieb. e Zucc., hanno ricavato un $r=0,63$ per la prima e $r=0,78$ per la seconda.

Un elemento a cui gli ultrasuoni sono sensibili è l'umidità del legno.

GERHARDS (1975) dimostra che l' E_{us} calcolato per contenuti di umidità differenti del legno di *Liquidambar styraciflua* L. diminuisce per umidità che vanno dal 15 al 50% ed aumenta salendo oltre il 50% di umidità. La variazione è funzione dell'andamento della velocità di trasmissione degli ultrasuoni, che diminuisce rapidamente andando dall'umidità del 15 a circa il 50%, e della densità che aumenta lentamente sino al 30% di umidità, velocemente oltre il 30%.

SANDOZ (op.cit.), avendo trovato una perfetta linearità di comportamento alla trasmissione degli ultrasuoni in travi di Abete rosso a due differenti umidità, suggerisce di effettuare una correzione sulla velocità di propagazione: una riduzione pari allo 0,8% per ogni aumento dell'1% dell'umidità del legno, questo per umidità che vanno dal 5 al 30%.

L'influenza che può avere lo stato di sollecitazione del provino sulla velocità di propagazione degli ultrasuoni è un dato di rilevante interesse per la valutazione di strutture in opera.

BUCUR (1979) nelle tre direzioni di propagazione all'interno di piccoli provini netti di Abete rosso, ha trovato un lieve aumento della velocità per sollecitazioni molto basse, pari a circa 1/5 di quelle di rottura, mentre ha osservato un rapido decremento all'aumento delle tensioni verso valori critici.

2.3.2 Le tecniche vibrazionali

Alcune delle caratteristiche elastiche del legno possono essere individuate attraverso lo studio delle vibrazioni. Il comportamento di un oggetto elastico posto in vibrazione senza vincoli, dipende dalle sue dimensioni e dalle proprietà del materiale di cui è costituito. Per interpretare questo comportamento ci si avvale di modelli matematici dalla cui accuratezza dipende buona parte della precisione dei risultati ottenibili. Nel caso delle prove sul legno sono molte le approssimazioni che si devono attuare nella redazione delle formule di calcolo: si suppone che la trave sia omogenea, quindi che la massa volumica ed il modulo elastico del materiale siano uniformi, che sia di forma regolare, che i vincoli siano noti e ben definiti.

Nel caso delle travi di legno si misurano prevalentemente le frequenze naturali di risonanza di elementi (travi snelle) posti in vibrazione libera, trasversalmente o longitudinalmente.

Già negli anni '60 MILLER (1968) applicava le tecniche vibrazionali a segati di 5 x 15 x 360 cm di *Picea mariana* B.S.P e *Pinus banksiana* Lamb., ottenendo dei buoni coefficienti di correlazione tra i valori di modulo elastico, calcolato per mezzo della vibrazione libera flessionale (E_{ff}), e, rispettivamente, il modulo elastico statico e la resistenza a flessione. Per il primo il valore è intorno a 0,98 mentre con la resistenza riporta $r=0,7$ per il Pino e $r=0,8$ per l'Abete. Il sistema prevedeva la collocazione del provino di fianco, su due appoggi rigidi (detti coltelli) in corrispondenza delle estremità, oppure sui punti nodali².

Lo stesso tipo di ricerca, effettuato su ca. 200 segati di *Pinus resinosa* Ait. ed altri pini del Nord America, ha portato MILLER E TARDIF (1967) a valori di r paragonabili. Le conclusioni di queste due ricerche concordano e mostrano che l'uso di questo sistema può portare a selezioni del materiale migliori rispetto ad altri metodi (macchine per la classificazione dei segati in base alla resistenza). Quindi garantisce la possibilità di scegliere utilmente il materiale per strutture in base alla resistenza in maniera rapida, semplice ed accurata.

Più recentemente GÖRLACHER (1986) ha determinato il modulo elastico dinamico su 14 travi di 14 x 12 x 300 cm, per mezzo di oscillazioni libere sia longitudinali che trasversali. Nell'equazione per il calcolo dell' E_{ff} flessionale viene trascurato il termine che tiene conto della deformazione di taglio. Anche in questo caso sono risultate ottime le correlazioni tra i valori di elasticità statici e dinamici. L'autore, nelle conclusioni del suo lavoro, ha indicato anche che la vibrazione longitudinale può essere usata per determinare il modulo elastico privo dell'influenza delle deformazioni di taglio.

Il problema della valutazione del modulo di taglio G è stato affrontato da diversi Autori.

Mentre GÖRLACHER (op.cit.) e PERSTORPER (1993) hanno usato le vibrazioni torsionali per calcolare G (le quali però risultano piuttosto difficili da rilevare sulle travi), CHUI (1990) ha proposto di passare attraverso la misura di due vibrazioni trasversali. Il modulo di taglio assieme a quello di flessione, sono stati usati per valutare l'influenza dei nodi nei suoi provini. Per fare questo ha impiegato per intero l'equazione di Timoshenko

² Alla distanza da ogni estremità di 0,224 volte la lunghezza del segato, per la misura dell'oscillazione libera fondamentale

perché più completa rispetto a quella di Eulero³, in quanto tiene in considerazione appunto le deformazioni dovute al taglio e l'inerzia di rotazione.

PERSTORPER (op.cit.), attraverso la misura di G e delle vibrazioni trasversali nelle due direzioni (sul bordo e sulla faccia di un segato 7 x 29 x 290 cm), ha confrontato i risultati conseguibili usando l'equazione di Eulero e quella di Timoshenko rispetto al modulo di elasticità determinato staticamente. I risultati hanno indicato che le due formule conducono circa agli stessi valori quando il rapporto lunghezza/altezza della trave è maggiore di 18. Con la teoria di Eulero si sottostima il valore vero di elasticità quando questo rapporto scende, cioè quando le deformazioni dovute al taglio non sono più trascurabili. Rimangono ottimi i valori del coefficiente di correlazione tra il MoE ed E_{fr} ottenuto da diversi tipi di prove ($r > 0,90$).

Dai lavori esaminati risulta evidente che con le tecniche vibrazionali longitudinali i provini risultano liberi dai problemi delle deformazioni di taglio, dalla presenza o meno di tensioni, dal tipo di appoggi e dalla loro posizione relativa, (BELLUZZI, 1941) (fatto salvo il mantenimento di una condizione di simmetria)⁴.

Alcuni ricercatori giapponesi hanno analizzato vari metodi non distruttivi per giungere ad una classificazione più razionale del loro legname per strutture. Tra le tecniche non distruttive proposte un ruolo molto importante viene attribuito proprio alla misura della frequenza di vibrazione longitudinale.

NAKAI *et al.* (op.cit.) hanno classificato circa cento segati di *Chamaecyparis* e di *Cryptomeria* 10 x 10 x 400 cm e misurato la frequenza fondamentale di vibrazione longitudinale attraverso l'uso di un microfono che cattura il segnale e che, a sua volta, viene elaborato tramite FFT.

Gli stessi passaggi sono stati seguiti ancora da NAKAI E TANAKA (1988) per la previsione delle caratteristiche elastiche e di resistenza del *Pinus densiflora* Sieb e Zucc. e della *Cryptomeria*, di tre dimensioni differenti (5 x 10 x 400 cm, 10 x 10 x 400 cm, 12 x 25 x 400 cm) per un totale di 400 segati.

In entrambe i casi i valori dei coefficienti di correlazione ottenuti hanno superato 0,95 per MoE- E_{fr} , e hanno oscillato tra da 0,65 a 0,87 per $Mor-E_{fr}$.

ARIMA E MARUYAMA (1990) e in parte anche gli autori precedenti, attraverso la vibrazione libera longitudinale, si spingono sino alla determinazione dei moduli elastici direttamente sui tronchi. Oltre alla *Chamaecyparis* e alla *Cryptomeria* vengono sottoposti a prova tronchi di *Douglasia*. I dati ottenuti dai topi sono ben correlabili con quelli delle

³ Equazioni secondo le teorie di Timoshenko e di Eulero.

Timoshenko:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \rho I \left(1 + \frac{E}{\beta G} \right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I \cdot \partial^4 v}{\beta G \cdot \partial t^4} = 0$$

Eulero

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

dove: E=modulo di elasticità, I=momento d'inerzia, v=spostamento lungo l'asse y o z, x=distanza lungo la trave, ρ =massa volumica, A=area della sezione trasversale, t=tempo, G=modulo di taglio.

⁴ Nel caso della vibrazione di una barra, le condizioni in cui sono vincolate le estremità hanno una certa importanza: se sono tutte e due libere o tutte e due fissate la formula è la stessa: $E=(4 f^2 I^2 d) / (2 n)$; nel caso che una sia libera e l'altra fissata la formula viene modificata in: $E=(16 f^2 I^2 d) / 2(2n-1)$ per il fatto che le vibrazioni avvengono solo sulle frequenze dispari (1,3,5...). Con E=modulo di elasticità; f=frequenza di vibrazione; l=lunghezza del provino; d=massa volumica; n=numero della frequenza utilizzata.

travi da essi ricavate, anche di grandi dimensioni. Questo a riprova della versatilità del metodo che, una volta rilevati peso e dimensioni, garantisce comunque un buon grado di affidabilità.

2.3.3 La dissipazione di energia nella propagazione delle vibrazioni

Una delle misure della dissipazione di energia del materiale durante la trasmissione di vibrazioni è lo smorzamento. Esso dipende dalla frizione interna, la quale deriva dall'attrito tra le molecole che costituiscono il materiale stesso, e dall'energia che viene trasmessa al fluido che circonda il mezzo vibrante. La frizione interna è influenzata dalla temperatura, dall'umidità, dalla frequenza di vibrazione (GIORDANO, 1981). Inoltre, nel caso della vibrazione libera, lo smorzamento dipende dagli attriti legati alle posizioni e alle dimensioni dei vincoli.

Poiché lo smorzamento è un indicatore indiretto delle condizioni del materiale, la misura di questo parametro può essere utile per la determinazione dello stato dell'elemento ligneo e in definitiva della resistenza (CHUI E SMITH, 1989).

Nel caso della vibrazione libera trasversale CHUI E SMITH (1990) hanno dimostrato che oltre agli eventuali errori dovuti al sistema di analisi della vibrazione, ancora più importanti sono le condizioni di vincolo dell'elemento ligneo. Lo smorzamento causato dal tipo di supporto può essere sino a 7-8 volte superiore a quello del materiale.

In una osservazione a conclusione della sua ricerca PERSTORPER (1992) ha spiegato che, in base a prove di laboratorio, lo smorzamento misurato su travi di Abete rosso è maggiore nei modi di vibrazione più influenzati dal taglio (in cui le deformazioni di taglio sono maggiori). Minore nei modi che sono governati principalmente dal modulo di Young (in particolare sulla vibrazione assiale e sulla trasversale "di piatto").

Nel caso dell'attenuazione delle onde ultrasoniche SERABIAN (1968) ha indicato che in materiali con un alto assorbimento di energia (tra i quali il legno) il valore medio delle frequenze delle onde trasmesse diminuisce man mano che esse si propagano. Quindi utilizzando le misure dell'attenuazione per la determinazione delle caratteristiche del materiale è necessario tenere conto di questo assorbimento preferenziale delle frequenze più alte.

KAISERLIK E PELLERIN (1977) hanno studiato il tempo di propagazione e l'attenuazione di onde di pressione su 21 provini di Douglasia ottenendo una buona previsione dei valori di resistenza a trazione in funzione della densità, del tempo di propagazione e dell'attenuazione. La funzione risultante ha spiegato per circa l'82% la variabilità della resistenza a trazione.

2.3.4 La valutazione della densità e le caratteristiche correlate

In letteratura è stata segnalata da molti ricercatori l'importanza della massa volumica come criterio di classificazione del legname in funzione della resistenza meccanica (VINOPAL, 1980, LARSEN, 1980, HOFFMEYER, 1981 in MANTOVA, 1991).

THUNELL (in MADSEN, 1980) ha trovato che a parità delle altre condizioni, la resistenza a flessione aumenta dell'1+1,5% per ogni 1% di aumento della densità.

La stretta dipendenza delle caratteristiche meccaniche dalla densità è stata indicata da diversi autori tra cui KOLLMANN E CÔTÉ (1968) per diverse specie e in differenti studi. Per questi ultimi il MoE è risultato linearmente correlato con la massa volumica; la variabilità della correlazione si è mostrata più accentuata per le latifoglie

rispetto alle conifere.

La misura della densità può essere effettuata su provini netti di piccole dimensioni, con metodi di laboratorio che consentono un buon grado di precisione; può essere calcolata con una buona approssimazione su elementi lignei in dimensione d'uso; può invece essere solo stimata utilizzando metodi non distruttivi (o poco distruttivi) sulle travi "in situ".

Uno di questi sistemi per la stima della densità si basa sulla misura della profondità di penetrazione dinamica di uno spillo a punta piatta. In questo caso lo strumento, denominato Pilodyn, usa una massa battente richiamata da una molla tarata per proiettare uno spillo all'interno del legno. La misura dell'approfondimento dello spillo viene utilizzata come stima della densità.

GÖRLACHER (1987) ha ottenuto degli ottimi coefficienti di correlazione tra la massa volumica e la profondità di penetrazione del Pilodyn 6J (strumento a colpo singolo) su un campione di circa 180 provini di Abete rosso: portando il numero delle misure per ogni provino da 1 a 16, i valori di r migliorano andando da 0,6 a 0,9. L'autore ha anche individuato alcune relazioni empiriche per poter risalire alla massa volumica partendo dalla profondità di penetrazione.

MANTOVA (op.cit.), con una sola misura per segato, su 115 provini di Douglasia, nella correlazione tra massa volumica e penetrazione, ha ottenuto valori di $r=-0,69$ e di $r=-0,57$ rispettivamente per il Pilodyn-6J e per il Pilodyn-4JR (strumento a ripetizione).

Accanto a questi, la letteratura presenta altri metodi per la stima "in situ" della massa volumica del legno e procedimenti per risalire da essa alla resistenza a flessione, ad un modulo d'elasticità o più semplicemente ad un valore di tensione ammissibile, attraverso l'impiego di relazioni empiriche. Esempi di tali metodi sono: la resistenza all'estrazione della vite (GÖRLACHER, 1990), le prove di compressione trasversale su carotine di legno estratte da travi in opera (RUG E SEEMAN, 1991), la misura dell'impronta di una sfera di acciaio (PIAZZA E TURRINI, 1983), l'intensità della riflessione dei raggi gamma (MADSEN, 1993, DIVÓS *et al.*, 1993) ecc. Alcune delle prove citate richiedono l'impiego di strumenti complessi e di uso scomodo; altre non presentano particolari difficoltà operative ma richiedono dei tempi lunghi e la necessità di prove ripetute in laboratorio. Infine le prove più impegnative spesso presentano lo stesso grado di affidabilità delle più semplici.

3 LE TRAVI SOTTOPOSTE A PROVA

Il materiale oggetto di questa ricerca è costituito da 12 travi provenienti da un antico edificio di Firenze: il complesso di S.Orsola (sec. XIV) che nel tempo ha subito alcuni adeguamenti strutturali. Nel secondo decennio del 1800 è stato ristrutturato per essere trasformato in una manifattura di tabacchi. In quell'occasione una parte del materiale strutturale della copertura è stata sostituita. Altre aggiunte o sostituzioni sono state effettuate agli inizi del '900. A causa di tutti questi eventi non è stato possibile datare ogni singolo elemento; l'unico elemento certo è che le travi hanno un'età sicuramente superiore a 80 anni e che è possibile che alcuni elementi lignei superino i 500. La datazione si sarebbe potuta effettuare attraverso un esame dendrocronologico, ma ciò non avrebbe aiutato nella stima delle caratteristiche meccaniche perché, come riportato dalla letteratura (par. 2.2), entro ampi limiti, l'età non ha influenza quantificabile sulle proprietà di resistenza del legno.

Negli ultimi vent'anni l'edificio è stato lasciato in uno stato di parziale abbandono per cui in molti punti della copertura ci sono state infiltrazioni di acqua che hanno portato al degradamento di molti elementi lignei. In particolare di una buona percentuale delle testate delle travi inserite all'interno dei muri.

Nel 1992 l'impresa edile incaricata del lavoro ha avviato il cantiere che doveva curare l'adeguamento strutturale dell'edificio. Circa 200 travi di diverse dimensioni, che sostenevano solai e tetti, sono state smontate e, a prescindere dallo stato di conservazione in cui si trovavano, sostituite con elementi di altra natura, per assolvere alle nuove esigenze di carico dello stabile. Da questo materiale di risulta sono stati prelevate 12 travi con dimensioni medie della sezione di 30x34 cm e di lunghezza di circa 4,5 m.

La forma di queste travi originariamente era molto più snella e presentava un rapporto lunghezza/altezza che andava da 1/25 a 1/30, per lunghezze dell'ordine dei 10 m; purtroppo le dimensioni iniziali erano tali da non consentire lo spostamento degli elementi lignei all'interno del cantiere edile. Perciò al Laboratorio Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile sono pervenute delle parti ottenute dalla segazione delle travi originarie. I segati sono risultati così piuttosto tozzi e il rapporto lunghezza/altezza praticamente è stato quasi dimezzato.

Le travi sono di Abete bianco, presumibilmente provenienti dai boschi dell'Appennino Tosco-Romagnolo; si presentavano prevalentemente in buono stato e solo tre di esse sono risultate in pessime condizioni a causa di un esteso degradamento causato dalla carie del legno.

3.1 L'Abete bianco

La specie

L'Abete bianco (*Abies alba* Mill.) è un Gymnosperma che appartiene alla Classe Coniferopsida, all'Ordine Coniferales e alla Famiglia Pinaceae. È un grande albero che può raggiungere considerevoli dimensioni di altezza (40, 50 m) e di diametro (fino ad oltre 1 m).

È una specie europea che ha un areale ben delimitato: è diffusa in un nucleo

alpino, centro-europeo (Alpi, Giura franco-svizzero e Selva boema) da cui si dipartono tre prolungamenti. Il primo verso i Sudeti, i Carpazi sino alle Alpi Transilvane, il secondo verso la ex-Jugoslavia per gran parte dei Balcani, il terzo che scende lungo l'Italia per tutto l'Appennino sino alla Calabria.

In Italia ha un'ampia diffusione in boschi misti sulle Alpi Orientali, mentre lungo tutto l'Appennino lo si trova in gruppi discontinui. A Nord con continuità nella zona tosco-emiliana sino a La Verna, al centro e al Sud in singoli gruppi isolati sino all'Aspromonte.

Si deve però ricordare che la gran parte delle foreste di Abete bianco, soprattutto quelle che costituiscono soprassuoli puri, non sono formazioni forestali "naturali": infatti questo albero, avendo una notevole importanza economica, è stato in più luoghi e da lungo tempo coltivato e diffuso. Anche attualmente la coltivazione, l'utilizzazione e il reimpianto dell'Abete bianco costituiscono un'attività produttiva importante per alcune zone montane.

L'impianto delle abetine ha origini e tradizioni antiche, tramandatesi attraverso i secoli. A questa attività erano dediti alcuni ordini monastici che la praticavano nei boschi situati attorno agli eremi e ai monasteri di montagna. Ricordiamo le abetine di Vallombrosa e Camaldoli. Ed è proprio da queste zone che da sempre è giunto a Firenze il materiale per le costruzioni della città, per lo più fluitato dall'Arno, come pure il materiale oggetto dello studio, del quale, purtroppo, non è stato possibile conoscere la provenienza precisa.

Caratteristiche del legno di Abete bianco (GIORDANO, op.cit.)

Il legno si presenta di colore biancastro, è a duramen indifferenziato, con anelli annuali ben evidenti. I nodi risultano spesso grossi e duri. Tra i difetti più frequenti viene indicata l'eterogeneità dello spessore degli anelli, la presenza del legno di compressione e di cipollature.

La massa volumica media viene data intorno ai 440 kg/m³ ad umidità normale. Il legno ha un ritiro mediamente basso ed è piuttosto stabile dimensionalmente. Per i provini piccoli e netti viene indicata una resistenza a compressione assiale intorno ai 37 N/mm², variabile da un minimo di 25 a un massimo di 65 N/mm²; per la resistenza a flessione si va da 41 a 130 con un valore medio di 67 N/mm²; la resistenza a taglio ha un valore medio intorno ai 5 N/mm².

Il legno di Abete bianco è scarsamente durabile agli attacchi di funghi; non è resistente agli attacchi di insetti ed è difficile da impregnare.

Oltre che per le strutture viene utilizzato per falegnameria, carpenteria e per imballaggi. Viene anche impiegato per produrre lana di legno, pannelli di fibre e di particelle, pasta meccanica e cellulosa.

3.2 Preparazione delle travi

Prima di eseguire l'ispezione visuale, le prove strumentali non distruttive e le prove meccaniche, le travi sono state predisposte per tali operazioni.

Sulle superfici è stato eseguito il seguente intervento di pulizia: per mezzo di una spazzola di ferro ed una pistola ad aria compressa sono state asportate le tinteggiature e i calcinacci; inoltre sono stati estratti la maggior parte dei numerosi chiodi infissi nel

legno.

Le travi sono state numerate da 1 a 12. Per avere dei riferimenti relativi lungo il segato, ad una testata è stato attribuito lo "zero" come punto di origine delle misure di lunghezza. Le facce sono state siglate con le prime quattro lettere dell'alfabeto in modo da assegnare la lettera "A" alla faccia che in opera costituiva l'intradosso della trave e la "C" all'estradosso, la "B" è stata attribuita al bordo destro e la "D" al sinistro osservando la testata dall'origine.

L'identificazione della posizione originaria dell'elemento ligneo all'interno della struttura si è resa possibile attraverso una ispezione preliminare per mezzo della quale sono stati osservati alcuni indizi rivelatori: la presenza e la posizione dei chiodi, delle superfici tinteggiate, delle tracce dell'appoggio dei travicelli (che hanno prodotto nel legno colorazioni differenti per la diversa esposizione all'aria) e della lieve arcuatura prodotta dalla durata dei carichi e dal comportamento viscoelastico del legno.

Per avere dei riferimenti fissi su cui lavorare, lungo tutta la trave sono state tracciate delle sezioni ogni 25 cm, a partire dalla testata "origine". A causa della lunghezza differente delle travi si sono ottenute per alcune 19 sezioni e per altre solo 17 (vedi fig. 2-a). Non è sembrato opportuno ricorrere all'intestatura delle travi al fine di renderle più regolari, per non ridurne ulteriormente la già scarsa dimensione longitudinale.

Per l'esecuzione di alcune prove con gli ultrasuoni è stato disegnato un reticolo in corrispondenza di ogni testata. Su ogni estremità, di forma normalmente rettangolare, lungo le diagonali e gli assi di simmetria della sezione sono stati tracciati 17 punti: 1 sul centro geometrico, 8 a 3 cm dal bordo e 8 alla metà della distanza tra il centro e quelli presso il bordo (vedi fig. 2-b). Ad ogni punto è stato attribuito un numero progressivo da 1 a 17 a partire dallo spigolo A-D (la linea in cui vengono a contatto le facce A e D).

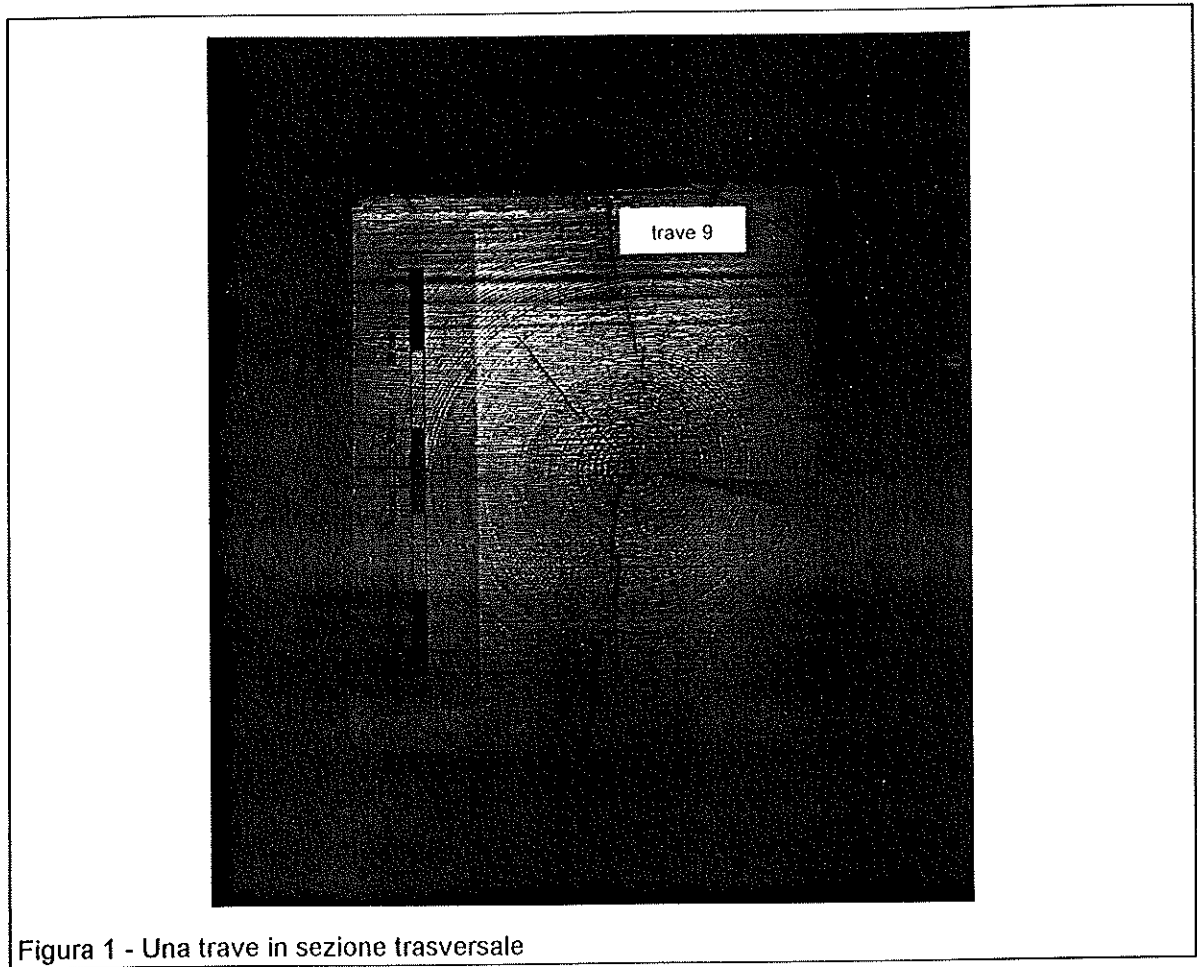
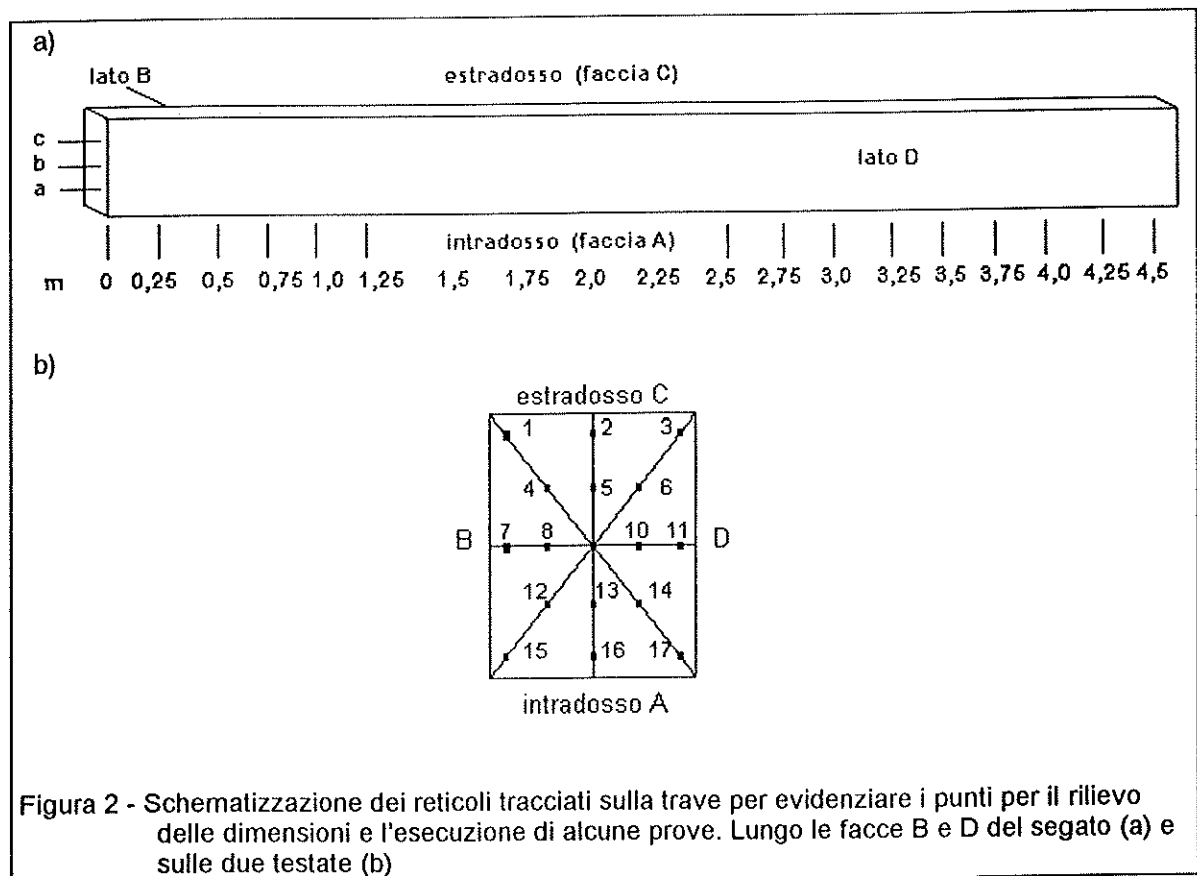


Figura 1 - Una trave in sezione trasversale



4 METODI DI INDAGINE ADOTTATI

In questo capitolo si esaminano alcuni metodi per la valutazione delle caratteristiche delle travi: ispezione visuale, prove meccaniche e altre prove non distruttive.

4.1 L'ispezione visuale

Ricordiamo brevemente che gli scopi principali dell'ispezione visuale sono:

- la valutazione delle caratteristiche originarie dell'elemento ligneo: la conoscenza della qualità della trave al momento della sua messa in opera è un elemento essenziale per affrontare il problema delle strutture lignee antiche. L'analisi delle anomalie visibili, presenti sulla superficie dei segati, consente di risalire a quelli che sono i difetti interni del legno, non visibili. Per fare questo è necessario venire a conoscenza di tutte le caratteristiche della superficie delle travi e applicare le nozioni specifiche sulle modalità di accrescimento degli alberi e sulla distribuzione dei difetti, in maniera tale da poter ricostruire idealmente, ma realisticamente, l'interno del segato e le sezioni trasversali;
- la selezione in classi di qualità resistente in funzione della difettosità: non è detto che le norme che vengono comunemente usate per la classificazione del legname nuovo possano essere applicate al legname di grandi dimensioni senza modifiche. Un punto d'interesse è la verifica dei risultati ottenibili applicando alcune delle più comuni normative e la possibilità del loro adattamento per l'utilizzazione su travi come quelle oggetto di studio;
- la valutazione della eventuale presenza di degradamento: è una necessità primaria per giudicare una trave in opera ed è una fase indispensabile per il passo successivo;
- la stima della sezione resistente residua della trave: si deve giungere ad una sintesi di tutti gli elementi acquisiti per arrivare a una valutazione dello "stato di salute" globale e delle situazioni particolari verificatesi in ogni provino. Il dato della sezione resistente è uno degli elementi indispensabili per i calcoli di verifica strutturale.

L'esecuzione dell'analisi visuale ha seguito in maniera sistematica i seguenti passaggi:

- misura delle dimensioni;
- annotazione dei difetti e delle caratteristiche fisiche dell'elemento attraverso un rilievo grafico di ogni faccia della trave;
- individuazione del degradamento, della sua estensione e del grado di intensità;
- stima delle sezioni collaboranti residue nei tratti fissati e nei punti più critici attraverso la ricostruzione delle sezioni trasversali.

4.1.1 Rilievo delle dimensioni

Allo scopo di ottenere il profilo più fedele possibile della geometria delle travi, per calcolarne il momento d'inerzia, il modulo di resistenza e il volume nei singoli tratti, sono state rilevate numerose sezioni trasversali lungo il corpo di ciascuna trave. Bisogna tenere presente che le travi a disposizione presentano superfici tutt'altro che regolari, spesso senza spigoli vivi, lavorate a mano, ed ulteriormente sagomate nella fase di posa in opera.

Le dimensioni dei quattro lati sono state rilevate in 11+13 sezioni per trave, per mezzo di un semplice metro: sulle due estremità, in corrispondenza della mezzeria e lungo tutta la trave, ad intervalli di 50 cm (una ogni due delle sezioni segnate nella preparazione della trave (par. 3.2). Le dimensioni medie sono in tabella 1, negli Allegati - parte I.

4.1.2 Rilievo dei difetti e di alcune proprietà fisiche

Ogni lato della trave è stato rilevato e rappresentato schematicamente su carta per consentire la localizzazione spaziale dei punti importanti.

In questo lavoro si sono valutate le dimensioni dei difetti mentre si è trascurato, volutamente, di pesarli in funzione della loro posizione. Essa è invece determinante nel caso che si debba stimare la qualità resistente di un elemento ligneo in opera. Questa scelta è stata fatta per poter dare una valutazione delle norme utilizzate per la loro classificazione, con le quali si giudica il pezzo nel suo complesso.

Il rilievo dei difetti e di alcune delle altre caratteristiche meccaniche è stato eseguito punto per punto come illustrato di seguito:

Nodosità

Tutti i nodi sono stati riportati sullo schema grafico delle facce delle travi. Su ogni faccia è stato misurato il nodo di dimensioni più rilevanti con il sistema previsto dalla norma tedesca DIN 4074 (par. 4.1.3.2) e alcuni gruppi di nodi con il metodo KAR(par. 4.1.3.1).

Deviazione della fibratura

E' stata rilevata la deviazione media della fibratura utilizzando le fessurazioni da ritiro, che si aprono seguendo esattamente l'andamento della fibratura. Sono state annotate anche le anomalie nel suo andamento, come le brusche variazioni locali dell'inclinazione.

Fessurazioni

Le fessurazioni sono state mappate per avere uno schema della quantità e dell'andamento generale su ogni faccia. In questa fase non è stata rilevata né la profondità né la larghezza ma solo la lunghezza delle fessurazioni più importanti.

Smussi

Gli smussi sono stati rilevati ed annotati in corrispondenza delle estremità e nelle zone in cui risultavano importanti per le loro dimensioni. Bisogna tenere in conto che le travi

oggetto di questo studio presentano superfici molto irregolari perciò una mappatura precisa di ogni spigolo smussato non è stata possibile.

Cipollature

Le cipollature visibili all'esterno sono state rilevate e riportate su carta.

Questo tipo di fessurazioni è identificabile banalmente se si ha la possibilità di osservare la testata di una trave. Risulta più difficile osservandone solamente le facce visibili all'esterno, come nel caso di travi in opera. In quest'ultima situazione se la cipollatura affiora è evidenziabile con facilità, perché si presenta come una normale fessurazione da ritiro che però segue con precisione la traccia di un anello di accrescimento (una traccia della venatura). Se non affiora può essere visibile attraverso una fessurazione da ritiro: nel caso che un cretto da ritiro incroci una cipollatura, anziché approfondirsi nel legno in direzione perpendicolare rispetto agli anelli di accrescimento, può proseguire di lato, perpendicolarmente alla prima (tangenzialmente all'anello). Questo caso, verificatosi in qualcuno delle 12 travi, è stato individuato con facilità sondando le fessure in profondità con una lama di acciaio spessa pochi decimi di millimetro.

Ampiezza media degli anelli di accrescimento

Gli anelli di accrescimento sono stati contati lungo una linea tracciata in direzione radiale, da uno spigolo sino a 2,5 cm dal midollo (normalmente si esclude il tratto in corrispondenza del midollo per evitare di misurare anche il legno giovanile). Sono state annotate anche le variazioni brusche dell'ampiezza degli anelli e la presenza di lunghi periodi nella vita dell'albero con ritmi molto diversi d'accrescimento. L'ampiezza media degli anelli è stata espressa in mm per anello.

Massa volumica

Il peso (M) delle travi è stato misurato due volte, al momento dell'ispezione visuale e poco prima dell'esecuzione delle prove meccaniche, sospingendole ad una cella di carico a ponte estensimetrico con una portata di 500 kg e una risoluzione di 0,1 kg. Il volume (V) è stato calcolato per sezioni (par. 4.1.1) al momento dell'ispezione visuale. Dal rapporto M/V è stata ottenuta la massa volumica, che si potrebbe definire media della trave al lordo dei difetti, diversa da quella al netto dei difetti.

Alcuni brevi richiami sui difetti del legno

Si ricordano qui di seguito alcuni dei difetti riscontrabili normalmente sulle travi di grosse dimensioni e alcune proprietà fisiche del legno.

Nodi

I nodi sono parti di ramo rimaste inglobate nella trave e lavorate insieme ad essa. In qualsiasi stato si trovi il nodo, sia esso sano, marcio o cadente, ai fini della resistenza sortisce lo stesso effetto. E' infatti una soluzione della continuità longitudinale delle fibre e provoca una forte deviazione locale delle stesse. Nelle conifere si trovano prevalentemente raggruppati in verticilli che possono ridurre notevolmente la resistenza di una certa sezione.

Fibratura

L'andamento della fibratura rappresenta la direzione dell'insieme degli elementi cellulari longitudinali che costituiscono il legno. Dipende da caratteristiche genetiche della pianta nonché da elementi legati alle condizioni di crescita. La fibratura molto deviata influisce fortemente sulla resistenza del materiale, sullo svergolamento e, al variare delle condizioni di umidità, sulla stabilità dimensionale.

Fessurazioni

Le fessurazioni presenti in direzione longitudinale sono causate dall'anisotropia dei ritiri del legno. Il ritiro in direzione tangenziale è sempre superiore al ritiro in direzione radiale. Con la diminuzione dell'umidità all'interno del segato sotto il punto di saturazione delle fibre del legno, questa differenza conduce all'accumulo di tensioni che superano la resistenza del legno a trazione, in direzione trasversale. Il risultato è l'inevitabile separazione delle fibre, lungo l'asse longitudinale, che può avvenire in posizioni imprevedibili. Nelle travi di grosse dimensioni, con umidità inferiore al 30%, le fessurazioni da ritiro sono comuni.

Smussi

Sono parti di legno che non sono state lavorate da utensili e che quindi presentano la superficie originale del fusto scortecciato, arrotondata.

Cipollature

Sono fessurazioni parallele agli anelli d'accrescimento, decorrenti in direzione longitudinale. Sono molto frequenti nel Castagno e nell'Abete bianco. In quest'ultimo il difetto viene chiamato "girello" o "difetto del palo" perché di frequente avviene che la cipollatura sia tanto estesa da coinvolgere per intero un anello e da consentire la distinzione di un palo all'interno della trave. L'influenza sulla resistenza è notevole anche perché le cipollature possono dividere la trave in più parti e modificarne sostanzialmente la geometria e quindi il momento d'inerzia e il modulo di resistenza.

Rapidità di accrescimento

Le caratteristiche meccaniche del materiale frequentemente sono ben correlate con la massa volumica che a sua volta dipende, a parità di specie legnosa, anche dalla rapidità di accrescimento. La velocità di sviluppo delle piante viene espressa attraverso la misura dello spessore delle cerchie annuali.

Degradamento del legno

Quando il legno ha un contenuto di umidità compreso tra il 20% e il 30% circa si possono raggiungere le condizioni ideali per un attacco di funghi xilofagi. L'intensità dell'attacco dipende anche dalla durabilità del legno e dalla temperatura. Le prestazioni meccaniche del materiale sottoposto ad un attacco fungino declinano in fretta e diventano presto nulle se l'attacco è intenso o ripetuto.

Un'altra delle cause di degradamento del legno è l'attacco da parte di insetti. Ve ne sono diverse specie ed attaccano il legno in base alle specie legnosa e alle condizioni di umidità e temperatura. L'attacco dipende anche da una serie di fattori quali la durabilità del legno, l'appetibilità del legno non durabile (la disponibilità di elementi nutritivi presenti), la presenza di legno già degradato da carie che lo rende più sensibile ad ulteriori attacchi.

4.1.3 Impiego di alcune norme di Classificazione visuale per la valutazione della classe di qualità resistente

E' oramai in fase di approvazione definitiva il progetto di norma europeo prEN 518 "Legno Strutturale - Classificazione - Requisiti per le norme di classificazione visuale in funzione delle resistenze meccaniche" che può essere definita la norma di riferimento per tutte le normative relative alla classificazione del legname per uso strutturale, dei paesi che aderiscono al CEN. Per essere accettate dagli altri paesi le regole di classificazione nazionali dovranno soddisfare i requisiti stabiliti dalla suddetta norma.

Tra le norme che sono già in linea con questa proposta, ne sono state scelte due che, in base ad alle esperienze acquisite in altre ricerche presso l'Istituto di Assestamento e Tecnologia Forestale di Firenze, risultano essere validi sistemi di discriminazione dei segati per uso strutturale nuovi e di limitata sezione trasversale:

- la norma italiana UNI 8198 "Segati di conifere - Classificazione in base alla resistenza meccanica" (1981, aggiornamento 1984);
- la norma tedesca DIN 4074-1989 Parte 1, "Classificazione del legno di conifere secondo la capacità portante - Segati di conifere".

A queste è stata aggiunta una classificazione raccomandata da Giordano (GIORDANO, 1993) per la classificazione di segati anche di non piccole dimensioni.

4.1.3.1 UNI 8198 "Segati di conifere - Classificazione in base alla resistenza meccanica"

La norma italiana per la classificazione dei segati di conifera in base alla resistenza meccanica è conforme alla norma FAO-ECE (1982). Entrambe sono derivate dalla norma inglese BS 4978.

La norma prevede la selezione del materiale in tre categorie S10, S8, S6 ognuna delle quali contiene una serie di limiti ammissibili per difetti e caratteristiche fisiche che costituiscono i criteri di selezione.

Al legname di conifere selezionato per mezzo di questa norma, prima dell'avvento delle normative CEN, si attribuiva un valore di tensione ammissibile per la resistenza a flessione (σ_{adm}) uguale al numero indicato dalla categoria (S8 = σ_{adm} di 8 N/mm²). Per gli altri tipi di sollecitazione i dati necessari al progettista erano indicati in altre tabelle in cui erano indicati tutti i σ_{adm} .

I criteri di selezione del materiale si basano su: nodi, inclinazione della fibratura, rapidità di accrescimento, fessurazioni, smussi, deformazioni, tasche di resina, attacchi di insetti e alcuni difetti particolari (la scheda riassuntiva è negli Allegati - parte I).

L'elemento principale che distingue questa norma da tutte le altre è il rilevamento della nodosità, che si avvale del KAR (Knot Area Ratio). Con questo sistema si misura il rapporto tra la superficie occupata dalla proiezione dei nodi su un piano perpendicolare all'asse longitudinale del segato e l'area della sezione. La percentuale di superficie occupata dai nodi viene calcolata sia sull'intera sezione che sulle due zone marginali, individuate da due linee parallele al lato più corto (base), passanti ad un quarto della misura dell'altezza della trave. Entrano a far parte della stessa sezione critica tutti i nodi compresi in un tratto di segato non maggiore di 15 cm.

In pratica si individuano alcuni tratti di segato in cui sono concentrati nodi importanti per qualità e per dimensione; su quei tratti si misurano i nodi e si effettua il

calcolo del KAR.

4.1.3.2 DIN 4074 "Classificazione del legno di conifere secondo la capacità portante - Segati di conifere"

E' la norma tedesca per la classificazione dei segati di conifera.

La norma prevede la selezione del materiale in tre categorie S13, S10, S7 e, come per la UNI 8198, ognuna contiene una serie di limiti ammissibili per i criteri di selezione (la sigla delle categorie ha lo stesso significato indicato nel paragrafo precedente).

Essi si basano su: nodi, inclinazione della fibratura, rapidità di accrescimento, smussi, deformazioni, tasche di resina, attacchi di insetti, di funghi e alcuni difetti particolari (la scheda riassuntiva è negli Allegati - parte I).

A differenza della UNI il criterio di valutazione della nodosità "A" (Ästigkeit) si basa sul semplice rapporto tra il diametro più piccolo del nodo più grande e la dimensione del lato in cui si trova. In questo caso viene trascurato completamente il fatto che i nodi siano raggruppati o singoli.

Operativamente tra tutti i nodi visibili sulla superficie del segato si misura quello più grande.

4.1.3.3 Classificazione per legname strutturale proposta da Giordano (GIORDANO, 1993)

Anche questo sistema di ripartizione del legname, derivato dalle vecchie norme DIN e basato sugli aspetti macroscopici quali difetti e caratteristiche fisiche, prevede tre categorie, 1^a, 2^a e 3^a. Per ognuna sono indicate una serie di valori di tensione ammissibile (carichi di sicurezza) tarati anche in funzione delle specie.

I criteri di selezione si basano su nodi e nodi in gruppi, inclinazione della fibratura, rapidità di accrescimento, fessurazioni, smussi, tasche di resina, legno di reazione, attacchi di carie del legno, di insetti e di alcuni difetti particolari (la scheda riassuntiva è negli Allegati -parte I).

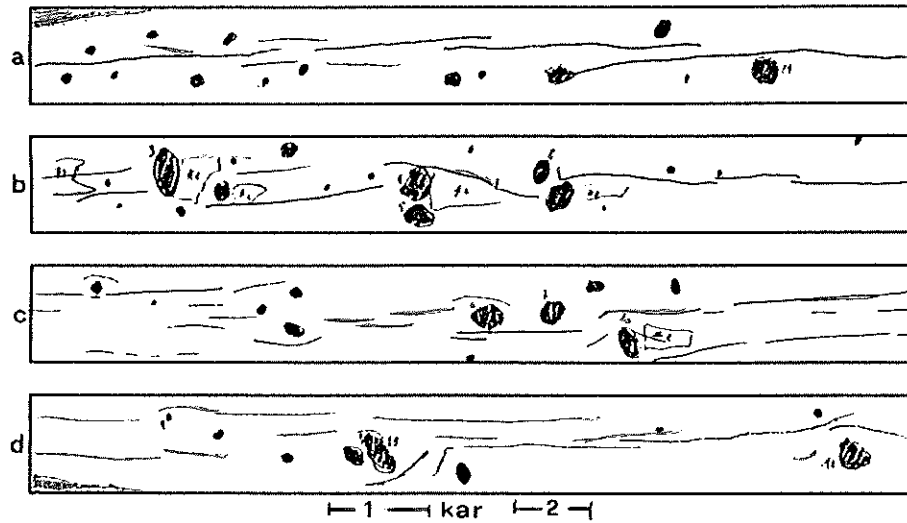
Il metodo suggerito per la valutazione dei nodi è lo stesso della norma tedesca, ma i valori-limite sono differenti; inoltre vengono considerati anche i gruppi di nodi per un tratto di lunghezza di 15 cm.

4.1.3.4 Descrizione delle travi

La descrizione dettagliata di tutti le travi e i risultati delle classificazioni (tabelle 2, 3, e 4) sono riportati negli Allegati - parte I.

Trave 2

mappatura difetti



Dimensioni medie

Lunghezza 4256 mm
Base 352 mm
Altezza 358 mm

Ampiezza media degli anelli

272 mm per 289 anelli = 0,9 mm/anello

Massima deviazione della fibratura

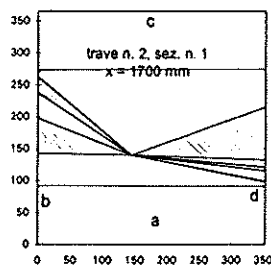
39 mm su 1 m di lunghezza

Nodosità massima per la DIN 4074

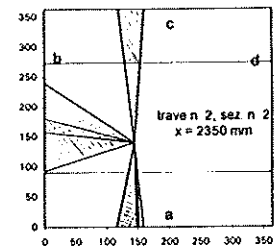
0,18 a 1750 mm dall'origine del lato B

Nodosità massima per il KAR (UNI 8198)

KAR marginale < 20%, KAR totale < 20%



representazione
schematica di alcune
delle sezioni peggiori
per la presenza dei nodi



Fessurazioni

da ritiro
cipollature

Abbondantemente presenti sulle 4 facce
Presente una cipollatura intera, da testata a
testata, non affiorante sulle facce laterali

Degradamento del legno

Assente

Attacco di Insetti

Assente

note:

in prossimità dei nodi più grandi sono presenti notevoli scheggiature, probabilmente dovute alle operazioni di utilizzazione della pianta e in particolare alla sramatura.

4.1.4 Stima delle porzioni degradate

Parte essenziale dell'ispezione ha riguardato la stima dell'intensità e della diffusione del degradamento causato dai funghi xilofagi. E' piuttosto comune trovare buona parte delle superfici di travi in opera da decenni, parzialmente degradate. Normalmente non sono i pochi millimetri superficiali a compromettere le caratteristiche meccaniche della trave. Perciò si è reso necessario conoscere l'andamento del degradamento all'interno del segato.

Nel nostro caso sono stati utilizzati alcuni utensili acuminati, tra cui un succhiello e un punteruolo, con i quali è stata saggiata la consistenza del legno nei primi centimetri di profondità. In caso di dubbi sul reale spessore del degradamento si è passati al saggio con un trapano su cui è stata montata una punta a ferro di 3 mm di diametro per 15 cm di lunghezza. La resistenza presentata dal legno alla penetrazione è servita a stimare la consistenza del legno in profondità, o meglio la profondità del legno degradato.

La diffusione del degradamento è stata espressa globalmente come rapporto tra la superficie cariata e l'area totale delle facce visibili, e stimata in percentuale sul volume dell'intera trave. La localizzazione e l'intensità sono state evidenziate sulla carta che rappresenta il segato, con due toni di grigio (principio d'attacco e attacco avanzato).

La presenza di attacchi d'insetti è stata rilevata solamente in due travi. Gli attacchi sono risultati di scarsa importanza. Per valutarne l'intensità, dopo il riconoscimento del genere di larva, è stato contato il numero dei fori di sfarfallamento.

4.1.5 Stima delle sezioni residue

L'ultima parte dell'ispezione visuale è stata dedicata alla stima delle porzioni di trave in grado di collaborare alla resistenza dell'intero elemento.

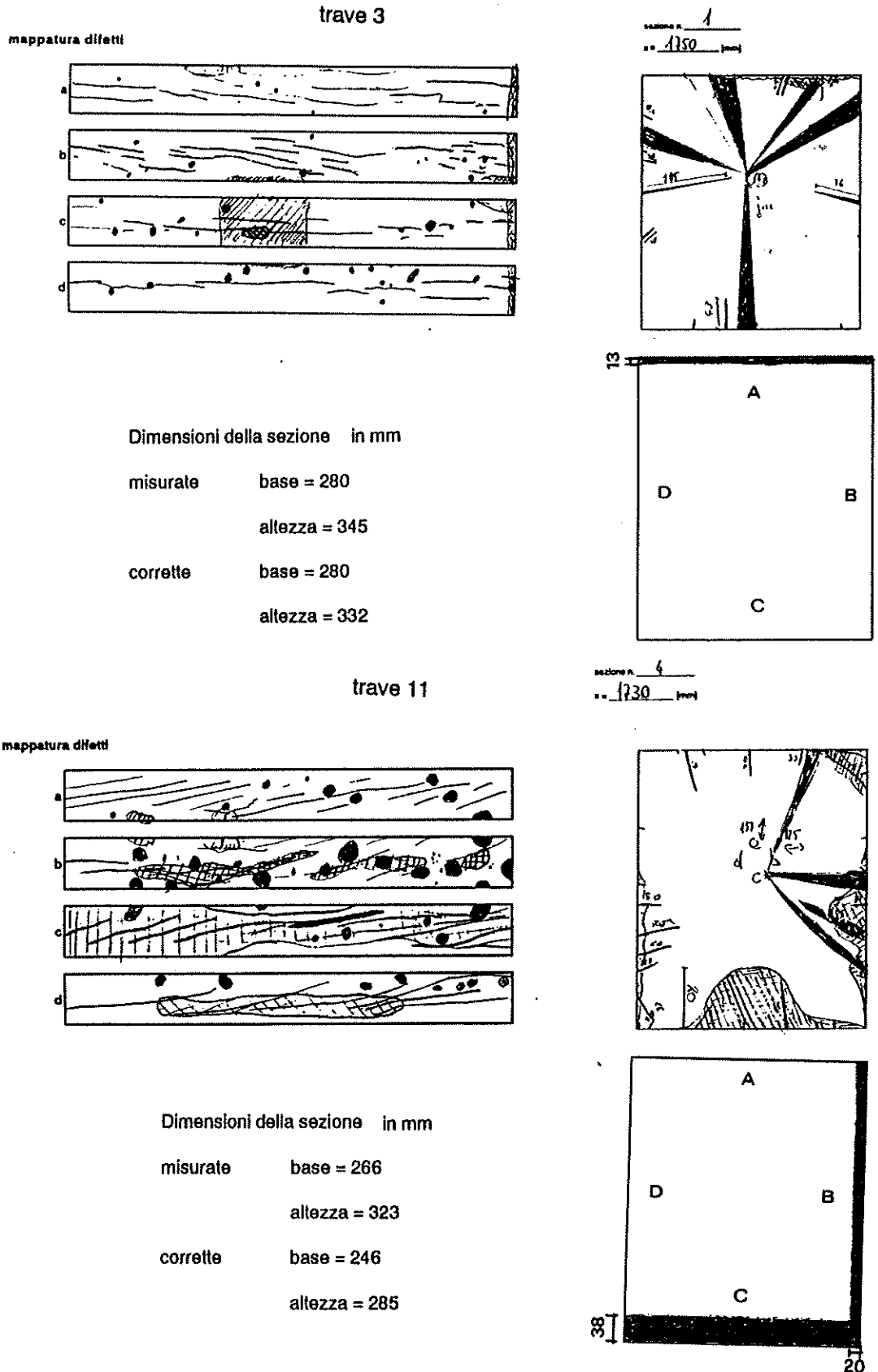
Per eseguire questa stima si è passati dalla visione tridimensionale della trave a quella bidimensionale trasversale, sezione per sezione: sulla base degli elementi visibili, i difetti, il degradamento e le altre caratteristiche esterne, si sono valutate le condizioni dell'interno e disegnate le sezioni trasversali.

Per ogni trave sono state rappresentate schematicamente alcune di queste sezioni: in mezzeria, alle due estremità e in prossimità dei punti di applicazione del carico al momento dell'esecuzione della prova di flessione statica (nel tratto centrale a 1,4 o 1,5 o 1,6 m dalle testate). Inoltre il rilevamento è stato effettuato anche nei punti che sono stati ritenuti significativi per la presenza di difetti influenti sulla resistenza. Si sono così ottenute 5÷7 sezioni trasversali rappresentate graficamente.

Per le sezioni schematizzate e per tutte quelle in cui sono state rilevate le dimensioni delle travi (ogni 50 cm, par. 4.1.1) è stata valutata l'area ancora in grado di collaborare, stimando le dimensioni "corrette" di base e altezza e di conseguenza è stato ricalcolato il momento d'inerzia ($J^* = J$ della sezione residua) e il modulo di resistenza ($W^* = W$ della sezione residua).

Evidentemente le misure ridotte dei lati sono state stimate in modo approssimativo, in quanto non è stato possibile conoscere al millimetro la quantità di legno sano. In questo calcolo ci si è tenuti dalla parte della sicurezza e si è attribuito un po' più rilievo alla porzione di legno che aveva subito degradamento.

Figura 3- Stima del degradamento sulla trave intera e stima della sezione residua in base all'estensione del degradamento



n.b. quando la forma della sezione resistente è stata alterata notevolmente dal degradamento, per il calcolo di W e J si sono utilizzate figure geometriche modificate riconducendosi sempre ad aree semplici. Ad esempio:



per il degradamento laterale,



per quello centrale.

In ogni trave, tra tutte le sezioni rilevate, è stata individuata la sezione critica con le dimensioni minime, quella con le massime ed una con le dimensioni medie. Un'attenzione particolare è stata dedicata alla porzione di legno nel terzo medio della trave perché è quella che è stata strumentata durante le prove meccaniche. Di quel tratto è stata riportata la sezione della mezzeria e quella con i valori medi per il tratto centrale, cioè la media delle sezioni residue comprese tra 1,5 e 3 m dalla testata di riferimento del segato (origine).

4.2 Le prove strumentali non distruttive

Benché alcune prove non distruttive siano impiegate da tempo su materiale per uso strutturale di piccole dimensioni, l'applicazione sulle travi in opera è tuttora in fase sperimentale.

Come mostrato nel paragrafo 2.3 la quantità di prove eseguibili su segati di legno può essere rilevante. Ma il loro numero si riduce fortemente passando dalle prove di laboratorio a quelle in cantiere dove è necessario ricorrere a strumenti portatili o, almeno, trasportabili; si riduce ancora di più se si passa a prove su elementi lignei di grandi dimensioni "in situ".

Nel nostro caso si è preferito concentrare l'attenzione sulle prove realizzabili con la trave in opera o tutt'al più a pie' d'opera. Sono di semplice esecuzione con l'eccezione della misura dell'attenuazione del segnale, dello smorzamento della vibrazione libera e chiaramente delle prove statiche, che necessitano di strumentazione o di un'organizzazione delle prove più complessa.

4.2.1 Prove con i Pilodyn

Come si evince dalla letteratura, questo strumento può fornire preziose informazioni sulla massa volumica e quindi su resistenza e degradamento delle travi. Inoltre è di semplice e pratica utilizzazione e quindi può essere portato e usato piuttosto comodamente in cantiere e su travi in opera.

Ricordiamo che le prove di penetrazione con il Pilodyn consistono nella misura della profondità di infissione di uno spillo "sparato" nel legno. La resistenza che oppone il materiale a questa azione è correlata con la sua massa volumica; a densità del legno maggiori corrispondono penetrazioni minori dello spillo.

Il tipo di campionamento che si è ritenuto opportuno eseguire prevede il saggio di quelle superfici visibili normalmente nella trave di un solaio. Per ogni trave si è scelto di effettuare un buon numero di misurazioni per ottenere la visualizzazione dell'andamento della penetrazione lungo tutte le tre facce; inoltre la letteratura indica che le correlazioni migliori con la massa volumica si ottengono dalla media di più misure, anche se i casi citati trattano di provini di dimensioni minori.

4.2.1.1 Pilodyn 6J

Lo strumento è costituito da un cilindro di alluminio e acciaio, all'interno del quale è posta una molla. Essa viene caricata manualmente dall'operatore e si blocca automaticamente, dopo una corsa corrispondente ad un accumulo di energia elastica pari a 6 Joule. Quando lo strumento viene messo a contatto con il legno da provare, comprimendo un estremo del cilindro la molla viene liberata e proietta lo spillo sulla superficie del legno. Lo spillo cilindrico con diametro di 2,5 mm ha un apice di forma piatta. Può penetrare all'interno del legno per un massimo di 40 mm. La profondità di penetrazione è indicata su una scala graduata fissata sulla superficie del cilindro con risoluzione di 2 mm.

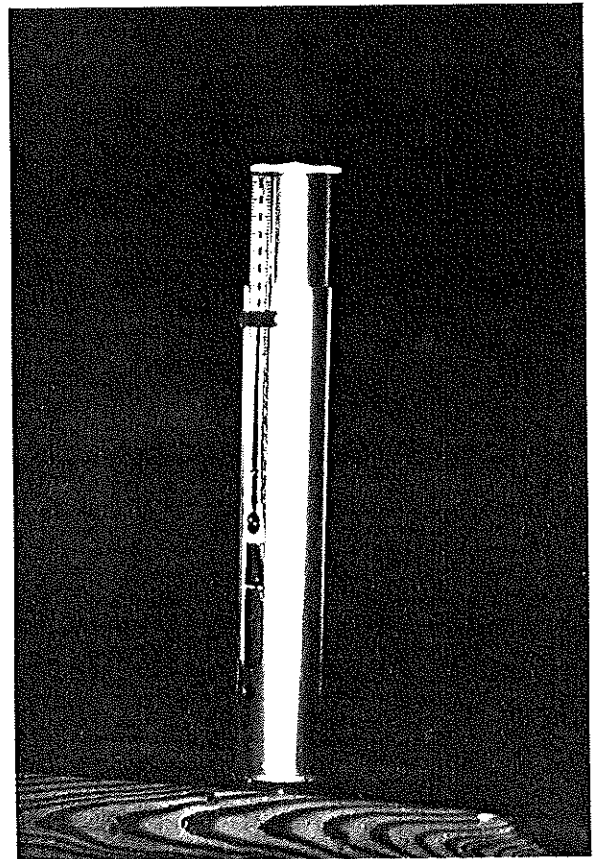
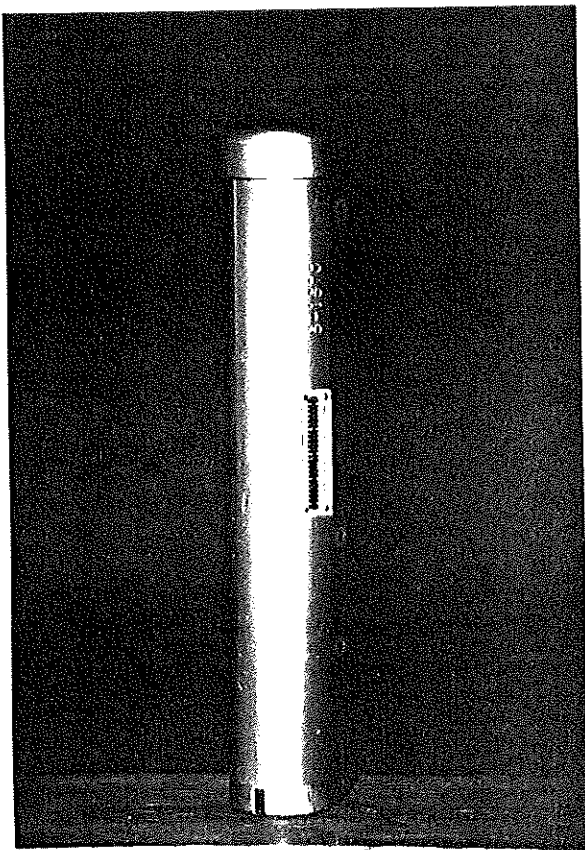


Figura 5 - Pilodyn 4JR (a) e Pilodyn 6J (b)

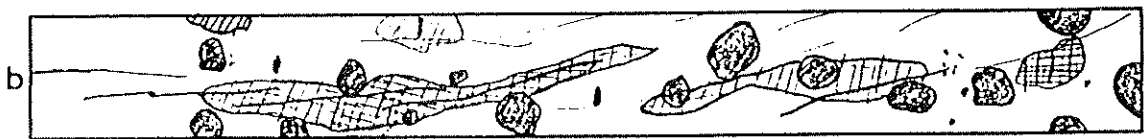
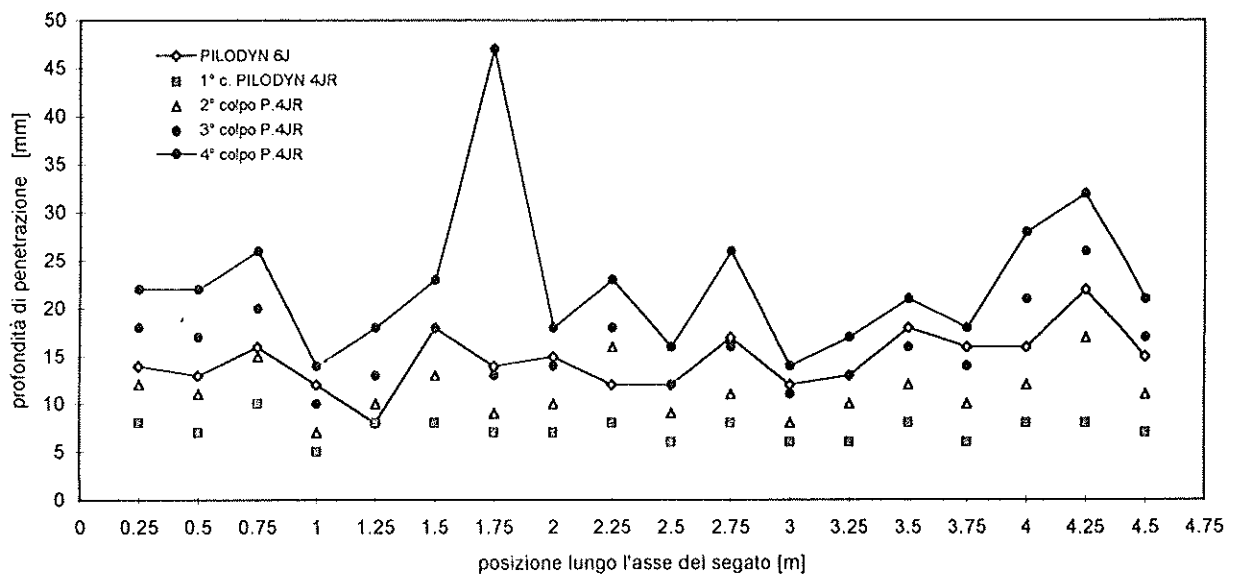


Figura 6 - Andamento della penetrazione dei due Pilodyn in corrispondenza della faccia B della trave 11. Il degradamento ha influito sulla profondità di penetrazione degli spilli degli strumenti

4.2.1.2 Pilodyn 4JR

Questo strumento è costituito da due cilindri di alluminio, montati coassialmente uno dentro l'altro. Il cilindro interno è cavo e contiene un perno libero sul quale scorre una massa battente vincolata ad una molla e che in punta ha avvitato lo spillo, sempre a testa piatta. Esso ha un gambo di 2,8 mm di diametro e l'estremità leggermente più larga (3 mm) per diminuire gli attriti nelle penetrazioni in profondità. Esercitando una pressione manuale sul cilindro interno, esso scorre per una decina di centimetri su quello esterno, che è a contatto con il legno, caricando così la molla di una energia elastica pari a 4 Joule. A fine corsa un grilletto libera la molla che richiama la massa battente la quale colpisce la base del perno su cui è sistemato lo spillo. Lo spillo, con una corsa utile di 120 mm, viene spinto all'esterno ed esegue il primo colpo. La lettura della misura di penetrazione si rileva sul cilindro esterno su cui è alloggiata una scala graduata di 10 cm con una risoluzione di 2 mm. Lo strumento, cessata la pressione della molla, è pronto per il colpo successivo. A seguito di ogni prova sulla scala graduata si legge l'approfondimento totale dello spillo. Da notare che la prova con il Pilodyn 4JR comincia con lo spillo già a contatto con il legno in superficie perciò lo spillo penetra senza abbrivo.

La differenza sostanziale tra i due strumenti è data dalla profondità a cui può essere spinto lo spillo. Mentre il primo può proiettare la punta alla profondità di 4 cm, teoricamente il Pilodyn 4JR potrebbe fare penetrare lo spillo dentro al legno per 10 cm e quindi misurare la consistenza del legno anche molto all'interno. In pratica questo non è consigliabile perché aumentando la profondità di penetrazione lo spillo viene serrato dal ritorno elastico del legno, malgrado il diametro della punta sia maggiore di quello del gambo. Per questo motivo l'attrito aumenta a dismisura e quindi, a parità di energia liberata, gli approfondimenti diminuiscono di colpo in colpo e le letture vengono falsate. Inoltre le operazioni per l'estrazione della punta penetrata in profondità risultano molto lunghe e difficoltose tanto da dover ricorrere all'estrattore, che viene fornito assieme all'apparecchio.

E' stato scelto un numero di 4 colpi del Pilodyn 4JR per ogni punto di saggio, in modo da ottenere una maggior profondità di penetrazione totale rispetto al 6J, ma da garantire allo stesso tempo la velocità e la praticità della prova. Non si è ritenuto utile con questa prova cercare di evidenziare la presenza di degradamento in profondità per i motivi spiegati sopra.

4.2.1.3 La metodologia di prova

Entrambi i Pilodyn, il 6J e il Repetier, sono stati utilizzati in prossimità dei punti del reticolo individuati nel paragrafo 3.2, e cioè sulle facce laterali delle travi e sull'intradosso ogni 25 cm. Su ogni sezione del reticolo è stata eseguita una penetrazione circa a metà altezza della faccia.

Per ogni prova si è avuta cura di infilare lo spillo nel legno in maniera che l'angolo formato tra la direzione di penetrazione e la tangente agli anelli fosse di 90°. In questo modo si è eliminata una indesiderata fonte di variabilità, dipendente solo dall'orientamento relativo degli anelli. L'entità di quest'angolo influisce infatti sui valori rilevati perché si hanno profondità di infissione differenti in funzione della percentuale di legno tardivo e di legno primaverile attraversati. Evidentemente il primo oppone più

resistenza del secondo (MANTOVA, op.cit.).

Su ogni punto si è reso necessario effettuare piccole correzioni di posizione per evitare che la presenza di un difetto particolare, come un nodo, una fessura o altro, alterasse la misura; invece, nel caso che il punto fosse incluso in una superficie che presentava degradamento generalizzato, non è stato fatto alcuno spostamento. Si è ritenuto che il dato di penetrazione dello spillo potesse essere usato per avere ulteriori informazioni sullo stato generale della superficie della trave, mentre non sarebbe stato di alcuna utilità per l'individuazione di difetti particolari e localizzati.

Con questo campionamento si sono ottenute da 48 a 57 misure di penetrazione per ogni trave nel caso del Pilodyn 6J e da 192 a 228 per il Pilodyn 4JR. I grafici ed i risultati sono negli Allegati - parte II.

4.2.2 Le prove con gli ultrasuoni

La letteratura mostra che i due sistemi con cui gli ultrasuoni vengono utilizzati nelle prove sul legno si differenziano essenzialmente per le direzioni lungo le quali si propagano all'interno dei provini: la direzione longitudinale e quella trasversale, la prima parallela alla fibratura del legno, la seconda perpendicolare.

Per evidenziare al meglio il comportamento del legno nelle due direzioni e per rispondere ai problemi allo stesso tempo di sensibilità e di potenza, si è ricorsi a due strumenti diversi per il rilevamento del tempo di propagazione degli ultrasuoni: il SYLVATEST nella direzione longitudinale e il PUNDIT in quella trasversale.

4.2.2.1 Il SYLVATEST e la misura della velocità degli ultrasuoni trasmessi lungo la fibratura del legno

Lo strumento

Questo strumento funziona sostanzialmente come tutti gli apparecchi ultrasonici. E' dotato di una sonda emittente ed una ricevente, i cui rispettivi messaggi vengono utilizzati come "start" e come "stop" da un cronometro di precisione contenuto all'interno dell'apparecchio; in più è dotato di un sistema di classificazione automatica per i segati di Abete, con il quale opera delle selezioni del materiale in funzione della velocità di propagazione degli ultrasuoni e dell'umidità che rileva per mezzo di un igrometro elettrico. Questa seconda possibilità d'uso del SYLVATEST non è stata considerata in questa ricerca perché la taratura della macchina è stata effettuata su segati di Abete rosso del centro Europa, di nuova produzione e di modesta sezione.

La caratteristica che distingue maggiormente questa macchina dalle altre è la particolare forma dei trasduttori i quali sono nati appositamente per le prove sul legno. Le due sonde hanno la forma di un cono che termina con una punta emisferica, con un diametro della sfera di 5 mm. Inoltre la frequenza del segnale trasmesso è di 33 kHz, quindi più bassa rispetto agli strumenti in commercio, e l'intensità delle onde emesse è maggiore.

Questo insieme di caratteristiche ha consentito di fare due tipi di misurazioni del tempo di propagazione in direzione longitudinale:

- da testata a testata, per la quale occorrono evidentemente le estremità scoperte,

- lungo le facce della trave, ponendo le sonde a 45° rispetto alla superficie del legno, in un punto anche lontano dalle testate, sistema che risulta molto pratico sugli elementi in opera.

Volendo utilizzare le stesse sonde in direzione trasversale si andrebbe incontro a qualche inconveniente. Sulle brevi distanze, quale la larghezza di una trave, un piccolo difetto o una irregolarità di superficie localizzata (puntiforme), influisce sulla misura del tempo di propagazione. Esso varia notevolmente in funzione della posizione in cui vengono applicate le sonde.

Concretamente lo spostamento laterale di pochi millimetri del piccolo puntale della sonda ha portato a letture molto differenti. Sulle misure effettuate su un unico punto si è ottenuto un coefficiente di variazione uguale al 20%. Inoltre nelle prove preliminari, il confronto tra le misure effettuate con il SYLVATEST e il PUNDIT, ha fornito dati discordanti: le differenze tra i tempi di propagazione delle due macchine andavano fino al 100%, ma il secondo strumento forniva valori molto più costanti. Quindi si è dedotto che la prova in direzione trasversale effettuata con il SYLVATEST sarebbe stata poco attendibile.

La prova

Per sfruttare al meglio la forma delle sonde si è deciso di praticare un foro di 5 mm di diametro, profondo 10 mm, nei punti di misura scelti, nel quale inserire il puntale della sonda. Il preciso contatto che si è venuto a creare tra legno e metallo ha consentito di trasmettere agevolmente gli impulsi da un'estremità all'altra di travi lunghe oltre 4,5 m, senza la necessità di alcuna delle sostanze che vengono usate normalmente come accoppianti acustici.

I fori e quindi le misure sono state effettuate sulle testate, nei 17 punti individuati dal reticolo allestito nella preparazione delle travi (par. 3.2) e in corrispondenza delle tre facce "visibili", immaginando la trave in opera (lati A, B, D). Queste ultime 9 letture, tre per ogni faccia, una al centro e due in prossimità dei due spigoli, sono state eseguite ponendo i trasduttori a 45° rispetto alla superficie del segato.

Il valore del tempo di propagazione è stato accettato nel momento in cui il valore del display digitale è stato confermato per almeno tre letture consecutive.

Le velocità, ottenute dal rapporto tra distanza tra le sonde e tempo di propagazione, oltre che per il calcolo del modulo di elasticità dinamico, sono state utilizzate per la ricerca di valori significativi di correlazione con la resistenza e con gli altri parametri.

Il modulo elastico dinamico

Il modulo di elasticità dinamico è stato calcolato attraverso la formula semplificata

$$E = v^2 \cdot \rho$$

con ρ =massa volumica, v =velocità di propagazione degli ultrasuoni.

Esso è stato determinato trascurando due fattori di correzione: uno in funzione dell'umidità (GEHRARDS, SANDOZ, op.cit.) e l'altro del modulo di Poisson (GIORDANO,

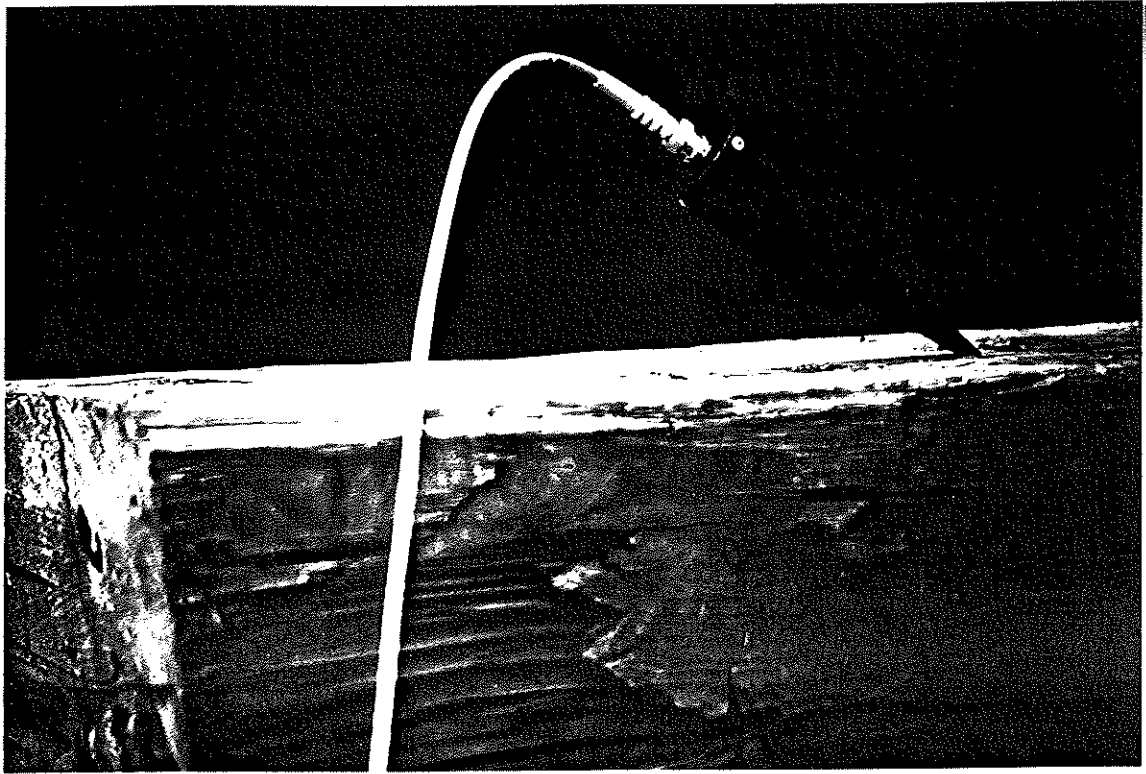


Figura 7 - Posizione della sonda del SYLVATEST rispetto alla superficie delle travi nelle prove con una inclinazione di 45° rispetto alla direzione della fibratura ($v_{i,45}$, $E_{us,45}$)

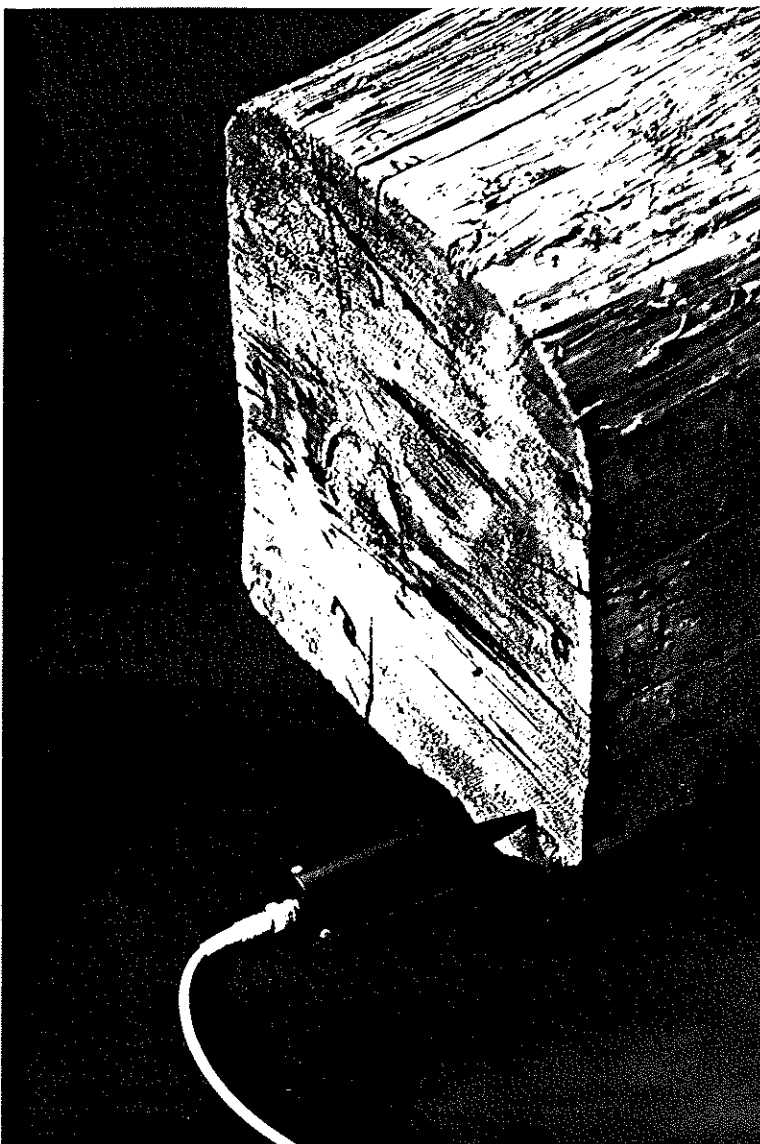


Figura 8 - Posizione delle sonde del SYLVATEST rispetto alle testate delle travi nelle prove con una inclinazione di 0° rispetto alla direzione della fibratura ($v_{i,0}$, $E_{us,0}$)

op.cit.).

La prima correzione è necessaria quando i provini non sono all'umidità normale (umidità del 12% a cui si equilibra il legno posto in un ambiente a temperatura di 20°C e umidità relativa dell'aria del 65%) e si effettua in base alla differenza tra condizioni reali e condizioni normali. Nel materiale di queste dimensioni è improbabile trovare una umidità di equilibrio unica, mentre ci sono quasi sempre dei gradienti all'interno del legno; inoltre non è dato sapere qual è il tragitto seguito dal treno di onde, e quindi neppure le condizioni di umidità del legno attraversato.

La seconda correzione si rende necessaria quando la dimensione della sezione dell'elemento ligneo si avvicina alla lunghezza d'onda del segnale trasmesso (λ). In questo caso, poiché la frequenza (f) è di 33 kHz, la velocità di propagazione nel legno (v) è di circa 5500 m/s, applicando la nota relazione $\lambda=v \cdot (1/f)$ si ottiene una lunghezza d'onda (circa 160 mm) minore della dimensione più piccola delle travi. Questo significa che il fronte d'onda viaggiante all'interno della trave non si può più approssimare ad un piano, rispetto alle dimensioni del provino, ma ad una superficie di forma sferica.

In questi casi si usa la seguente relazione

$$E = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu}$$

dove ν è il modulo di Poisson⁵. In letteratura sono stati proposti alcuni valori da utilizzare per l'Abete rosso (CARRINGTON, 1923 e STAMER UND SIEGLERSCHMIDT, 1933 cit. in KOLLMANN-CÔTÉ, op.cit) ma servirebbero essenzialmente ad abbassare tutti i moduli in modo uniforme. In questo caso, non essendo stato possibile ricavare il vero modulo di Poisson per ogni trave, si è scelta la formula semplificata. Questa scelta costringe ad usare con la massima cautela i valori ottenuti dalla prova in senso assoluto, ma comunque ci consente di effettuare elaborazioni per confronto e in modo relativo.

I grafici e le tabelle riassuntive sono negli Allegati - parte II.

4.2.2.2 Dissipazione dell'energia degli impulsi ultrasonici trasmessi lungo la fibratura del legno

L'ampiezza delle onde che attraversando un provino giungono da un estremo ad un altro dipende dalla quota di energia che viene assorbita durante la propagazione. Una parte viene dissipata a causa dell'attrito interno, un'altra per la presenza di difetti. La misura della porzione del segnale trasmesso dal materiale nelle diverse posizioni lungo la trave potrebbe dare un'indicazione sulla qualità del legno e sugli "ostacoli" presenti sul percorso.

In realtà con questa prova non è stata misurata l'ampiezza dello spostamento delle particelle in oscillazione elastica, bensì l'ampiezza della loro accelerazione. Tra ampiezza dello spostamento e ampiezza dell'accelerazione esiste peraltro, in questo caso, una stretta interdipendenza, per cui l'attenuazione del segnale può essere misurata con l'una o l'altra grandezza.

⁵ una sollecitazione in direzione longitudinale è sempre accompagnata da una in direzione trasversale, perpendicolare alla prima. Perciò, nel caso di onde di pressione, alla compressione provocata dall'avanzamento dell'onda in direzione longitudinale segue una sollecitazione trasversale. Il modulo di Poisson è dato dal rapporto tra la deformazione unitaria (ϵ) trasversale e quella longitudinale.



Figura 9 - L'immagine mostra alcuni strumenti utilizzati per la misura dell'attenuazione del segnale: la sonda emittente del SYLVATEST e l'accelerometro

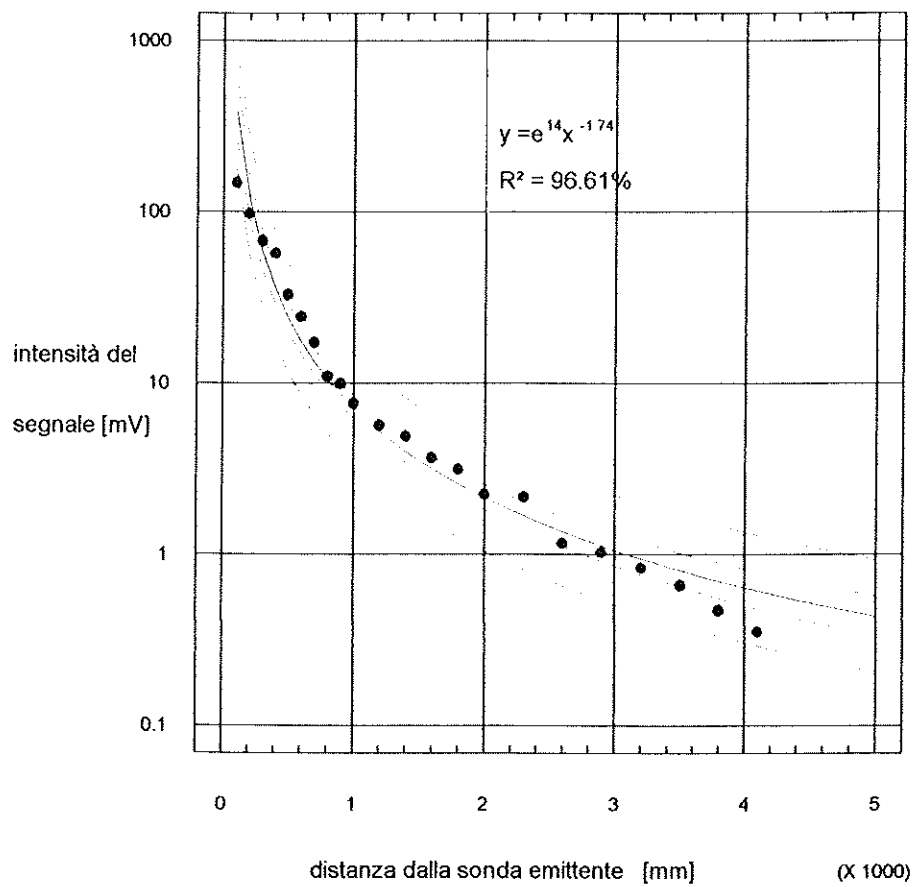


Figura 10 - Attenuazione del segnale in funzione della distanza nella trave 12. I punti sperimentali sono stati interpolati con una curva alla potenza di x

Gli strumenti

Per effettuare questa prova è stata utilizzata la sonda emittente del SYLVATEST che genera onde di frequenza e intensità costante, un accelerometro piezoelettrico, per rilevare l'accelerazione nei punti lungo la trave, un oscilloscopio digitale con memoria, per registrare il messaggio ricevuto dall'accelerometro e misurare l'ampiezza dell'onda registrata.

Le piccole dimensioni e il modesto peso (2,3 g) dell'accelerometro hanno consentito il suo fissaggio per mezzo di un leggero strato di cera che ha fatto da "adesivo" tra la superficie del legno e quella del cubetto di acciaio (4x4x4 mm), supporto del sensore vero e proprio. Questa caratteristica ha permesso di fissare lo strumento in modo semplice e rapido, con una pressione esercitata manualmente.

La prova

Sull'intradosso, il lato A, è stata inserita in un foro, la sonda emittente del SYLVATEST, a 10 cm da una estremità, su un punto a metà della larghezza del lato e a 45° rispetto alla superficie della faccia.

Sullo stesso lato è stato fissato l'accelerometro con il suo asse (l'unico lungo il quale è sensibile all'accelerazione) parallelo all'asse longitudinale del segato. Lungo il primo metro di distanza dal trasduttore è stata effettuata una misurazione ogni 10 cm; dal primo al secondo metro ogni 20, e dal secondo sino all'estremità opposta a distanze crescenti di 30 in 30 cm.

Questa sequenza nelle posizioni è stata scelta perché la diminuzione dell'intensità dell'energia trasmessa è di tipo esponenziale cioè decresce velocemente quando l'intensità del segnale è forte, decresce più lentamente per segnale debole.

All'accelerometro è stato collegato l'oscilloscopio a memoria digitale.

Nel punto "sorgente" vengono emessi i treni di onde ad intervalli di circa 250 ms; le onde si propagano all'interno del legno ponendo in oscillazione le particelle rispetto al punto di quiete; l'accelerometro al passaggio della prima onda trasmette all'oscilloscopio un segnale che, se superiore alla soglia di trigger impostata, dà il via alla registrazione. L'intero evento dura qualche millesimo di secondo. Se il segnale registrato, visualizzato sul video, è completo e senza disturbi allora con il cursore si può misurare l'ampiezza della prima onda captata. Nei punti in cui le misure risultano più instabili, dove cioè il valore d'intensità della prima onda è molto basso e quindi più sensibile ai disturbi esterni, sono state effettuate 10 letture per poi poter utilizzare la media dei valori.

Questa prova, rispetto alle altre richiede molto tempo e qualche strumento in più e quindi potrebbe apparire di difficile esecuzione; in realtà, dal punto di vista pratico il sistema adottato per portarla a termine sarebbe riproponibile anche sulla trave in opera o a pie' d'opera.

Da questo esperimento sono risultate una serie di curve in potenza di x ($y=ax^b$) ottenute attraverso l'interpolazione dei punti sul grafico che riporta in ordinata il valore della massima accelerazione rilevata, in funzione della distanza dalla sorgente di emissione. I grafici sono negli Allegati - parte II.

4.2.2.3 Il PUNDIT e la misura della velocità degli ultrasuoni trasmessi in direzione perpendicolare alla fibratura del legno

Per semplicità questo tipo di prova viene definito "trasversale", ma la definizione è legata solo alla geometria della trave e non alle direzioni anatomiche del legno. Infatti, a causa delle dimensioni dei provini e della posizione del midollo all'interno, alcune delle misure "trasversali" sono risultate principalmente radiali, in riferimento alla vera direzione anatomica lungo la quale si propagano nel legno, altre sono per lo più tangenziali. Anche se le due direzioni andrebbero distinte, vista la differenza esistente tra le velocità ($V_t=0.63V_r$, FACAU & BUCUR, 1974), è stato scelto di trascurare questo aspetto sia perché la vera direzione in cui si propagano gli ultrasuoni non è nota e comunque non può mai essere solo radiale o solo tangenziale, sia perché in opera non sarebbe stato possibile fare tali distinzioni.

Lo strumento

Il PUNDIT è uno strumento progettato in particolare per le prove sul calcestruzzo che ormai da tempo è stato sperimentato anche per le prove sul legname. È un apparecchio ad ultrasuoni semplice, costituito da questi elementi: due sonde di forma cilindrica con un diametro di 50 mm, collegate con la centralina per la misura dei tempi di propagazione. La frequenza delle onde emesse è di 54 kHz. L'intensità del segnale è inferiore rispetto a quella del SYLVATEST.

Come la gran parte degli strumenti ad ultrasuoni il PUNDIT necessita di una sostanza che faciliti l'accoppiamento acustico tra metallo e legno. Se tra le due superfici rimanesse una discontinuità l'aria interposta falserebbe la misura. In questo caso è stato utilizzato del grasso sintetico.

La superficie di contatto relativamente grande ha permesso di ricevere il segnale più potente all'interno dell'area di circa 20 cm² delle sonde. Le misure che si sono potute ottenere in direzione trasversale sono risultate così più stabili, ripetibili e libere dalle piccole variazioni legate alle condizioni locali della superficie.

La prova

Il tipo di prova è facilmente eseguibile su una trave "in situ", se le due facce laterali sono accessibili, e può dare interessanti informazioni sulle condizioni interne del legno.

Le sonde sono state posizionate sulle facce laterali della trave (facce B e D), in corrispondenza delle sezioni tracciate durante la preparazione della stessa (par. 3.2), una di fronte all'altra, in posizione speculare. Su ogni sezione sono state rilevate tre misure, una al centro della faccia, la seconda alla distanza di 6 cm tra centro del trasduttore e l'estradosso e la terza alla stessa distanza dall'intradosso. Questo schema di prova è detto anche "misura in trasparenza". È stata scelta questa disposizione per mantenere una buona densità dei rilevamenti, pur contenendone il numero.

Sono risultati da 48 a 54 misurazioni per ogni trave, che sono andate a costituire una sorta di "mappa" delle condizioni interne del legno. I grafici sono negli Allegati - parte II.

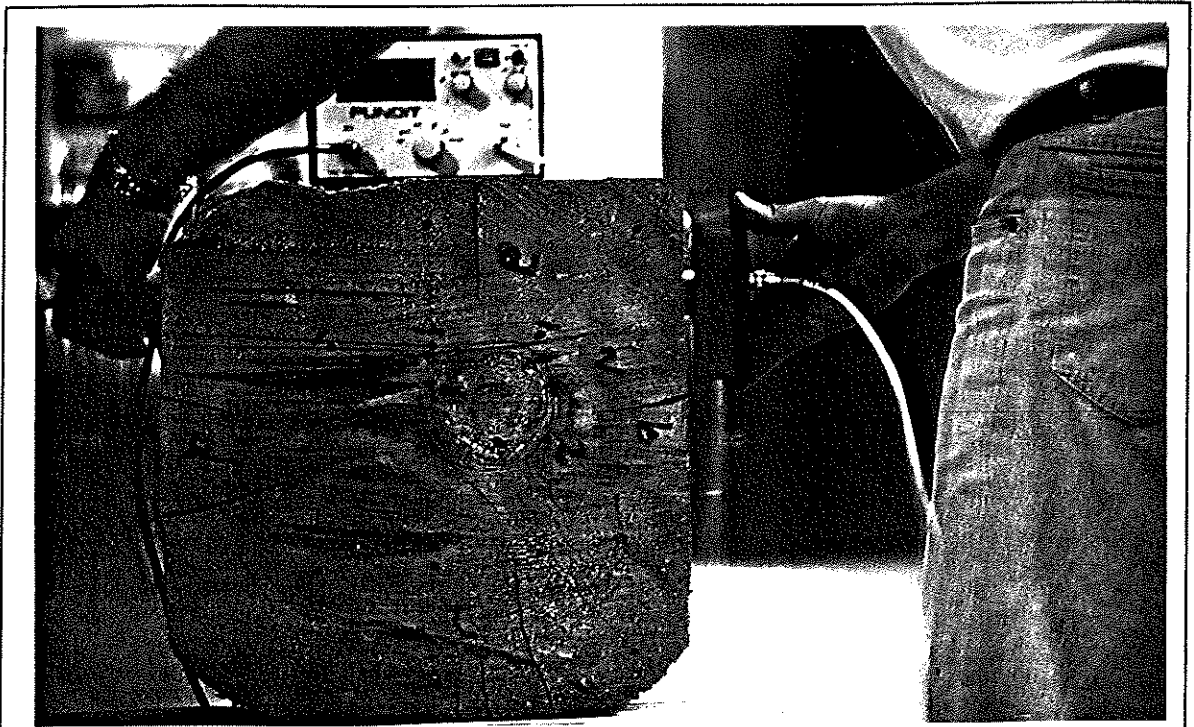


Figura 11 - Posizione dei trasduttori del PUNDIT per la misura del tempo di propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale

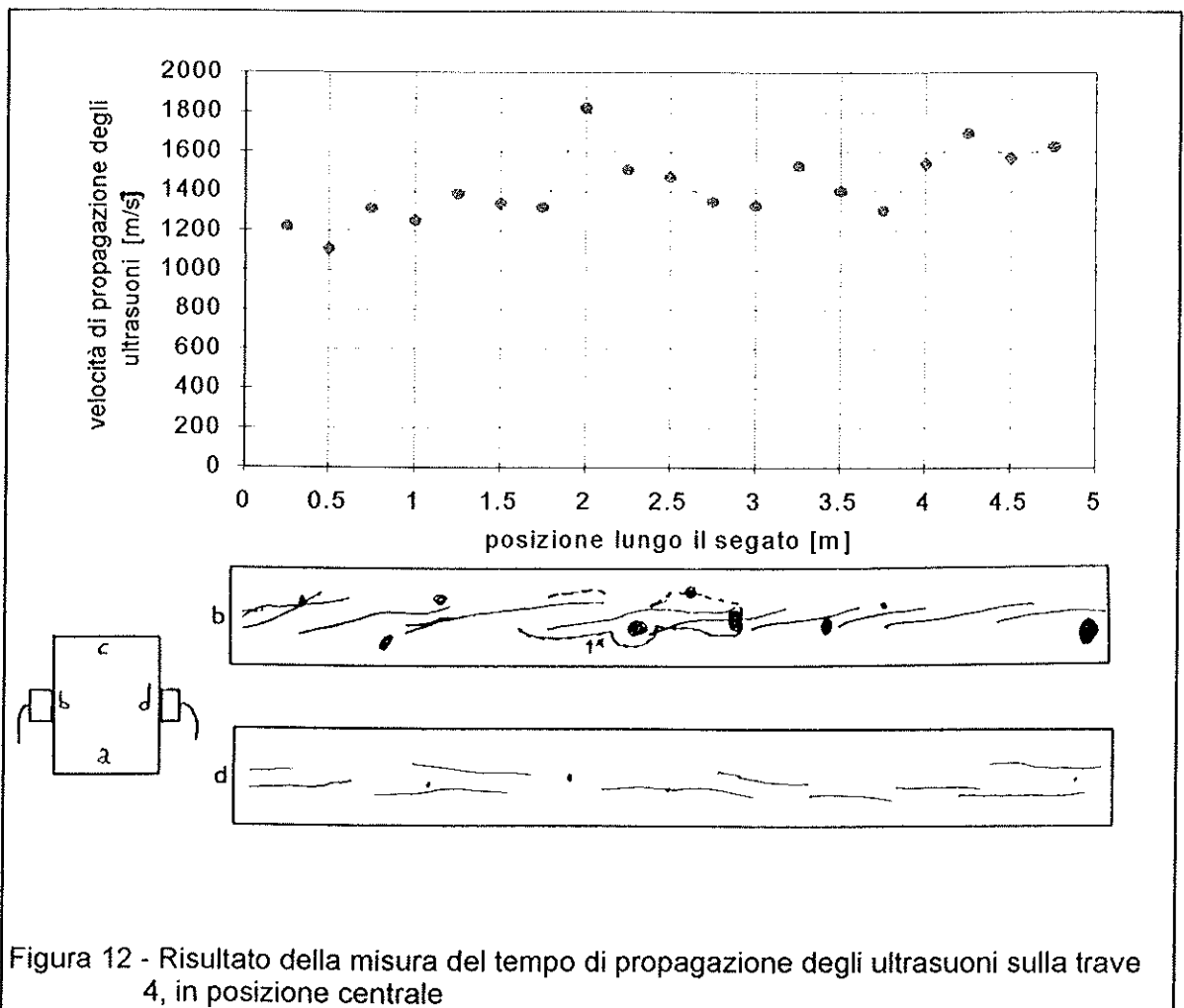


Figura 12 - Risultato della misura del tempo di propagazione degli ultrasuoni sulla trave 4, in posizione centrale

4.2.3 Le prove di vibrazione

La misura delle frequenze di vibrazione sulle travi "in situ" presenta diversi problemi.

Le oscillazioni della trave in direzione perpendicolare al suo asse longitudinale dipendono principalmente dai carichi che gravano sull'elemento ligneo e dalla configurazione dell'appoggio. In direzione longitudinale la vibrazione è svincolata dai problemi suddetti ma risulta rapidamente smorzata per i vincoli esistenti alle estremità.

Per questi motivi si è scelto di concentrare l'attenzione sulla vibrazione in direzione longitudinale:

- è libera dai disturbi causati dalla presenza di carichi,
- è idonea a dare informazioni sulle caratteristiche globali del materiale,
- è più facilmente riproducibile in cantiere essendo svincolata dalla necessità di riprodurre appoggi precisi,
- è la meno influenzata dalle deformazioni legate al taglio, importanti date le dimensioni delle travi (par. 2.3.2).

Oltre alle misure di frequenza, durante la stessa prova è stato rilevato lo smorzamento della vibrazione. In una struttura l'energia persa durante la vibrazione dipende dagli attriti in corrispondenza dei collegamenti e dallo smorzamento del materiale. Eliminando la prima causa di attenuazione cioè svincolando la trave da qualsiasi punto d'appoggio si è misurato solamente lo smorzamento (il decremento logaritmico della frequenza fondamentale di vibrazione libera) dovuto alle caratteristiche del materiale, sensibile in particolare alla presenza di degradamento e di difetti (par. 2.3.3).

4.2.3.1 La vibrazione libera longitudinale

Gli strumenti

Lo strumento adoperato per rilevare le oscillazioni è ancora l'accelerometro fissato a cera in posizioni prestabilite lungo la trave.

Come acquisitore dati è stato usato il RION, piccolo strumento portatile, con display a cristalli liquidi, utilizzabile sia come semplice oscilloscopio che come analizzatore d'onda. Nel nostro caso è servito principalmente come registratore e analizzatore di frequenza.

L'impulso meccanico per porre in vibrazione libera la trave è stato fornito attraverso un comune martello di gomma.

La prova

In questa prova siamo andati alla ricerca della frequenza del modo fondamentale di vibrazione longitudinale e dei primi due modi longitudinali superiori.

La trave è stata sospesa al centro per mezzo di fasce collegate ad una gru idraulica. La collocazione della trave su cavalletti o su altri tipi di appoggi non avrebbe alterato la frequenza di vibrazione rilevata, ma avrebbe solamente smorzato più rapidamente l'oscillazione libera. Questo sarebbe stato un ostacolo nella misura dello smorzamento, descritta più avanti, eseguita durante la stessa prova. La fascia sistemata sulla mezzera, poiché è risultata sul nodo del primo modo di vibrazione e su un ventre

del secondo, ha attenuato solamente le oscillazioni del secondo e non quelle del fondamentale.

L'accelerometro è stato messo in diversi punti lungo la faccia A (l'intradosso), in maniera da porre in risalto di volta in volta il primo modo di vibrare o i modi superiori: per fare questo si sono sfruttate le posizioni teoriche dei nodi e dei ventri delle une o delle altre⁶:

- ad un sesto della lunghezza della trave: un nodo per la 3° modo,
- ad un quarto della lunghezza: un nodo per la 2° modo,
- ad un terzo della lunghezza: un ventre per la 3° modo,
- a metà lunghezza: un ventre della 2° e un nodo per il fondamentale,
- su una estremità: ventri per tutte le frequenze.

Una volta sospesa la trave e posizionato l'accelerometro, a seguito dell'impulso esercitato dal martello che l'ha posta in vibrazione, si è dato il via all'acquisizione del segnale con il RION. L'operazione è stata ripetuta per ogni nuova posizione dell'accelerometro.

Il RION, registrato l'insieme di impulsi nel dominio del tempo, è in grado istantaneamente di analizzare le frequenze che compongono il segnale attraverso la trasformata di Fourier. Sul display di volta in volta sono stati letti i valori delle prime tre frequenze caratteristiche, più o meno evidenti in funzione delle posizioni scelte per l'accelerometro lungo la trave.

Il modulo elastico dinamico è stato calcolato per tutte le frequenze di oscillazione longitudinale attraverso la relazione

$$E = \frac{4 \cdot f^2 \cdot l^2 \cdot \rho}{n}$$

dove f è la frequenza analizzata, in Hz, l è la lunghezza del segato, in m, ρ è la massa volumica, in kg/m³, n è il numero del modo di vibrare di volta in volta utilizzato.

4.2.3.2 Lo smorzamento della vibrazione libera longitudinale.

In assenza di vincoli esterni la rapidità con cui l'oscillazione libera di un corpo si attenua dipende esclusivamente dal materiale. Nel caso del legno vi è l'influenza delle caratteristiche globali, dalla presenza di difetti e di degradamento.

Operativamente lo smorzamento percentuale può essere determinato sia sul diagramma della vibrazione libera nel dominio del tempo, sia sullo spettro di frequenza. Nel primo caso si elabora la curva d'inviluppo del diagramma dell'oscillazione, nel secondo si misura un intervallo di frequenza in corrispondenza di due valori, individuati direttamente sullo spettro, di ampiezza pari a $P_{\max} / \sqrt{2}$, corrispondenti ad una riduzione del 50% della potenza del segnale massimo P_{\max} che è il picco di intensità per la frequenza studiata. In questo studio si è adoperato il primo sistema.

Lo smorzamento percentuale (ξ) di una vibrazione è direttamente proporzionale

⁶ In un'onda stazionaria si definisce ventre il punto di elongazione massima delle particelle in vibrazione, nodo quello in cui le particelle sono ferme.

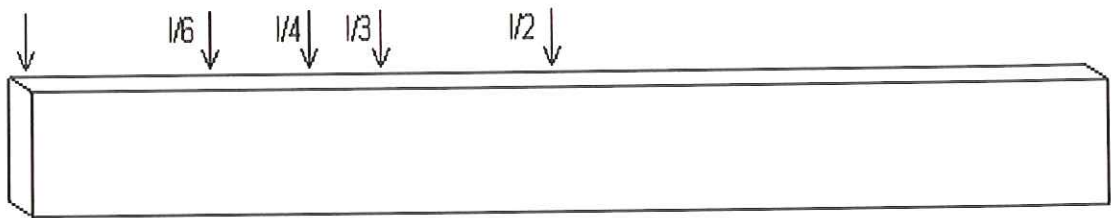


Figura 13 - Schematizzazione delle posizioni in cui è stata rilevata la vibrazione per mezzo dell'accelerometro

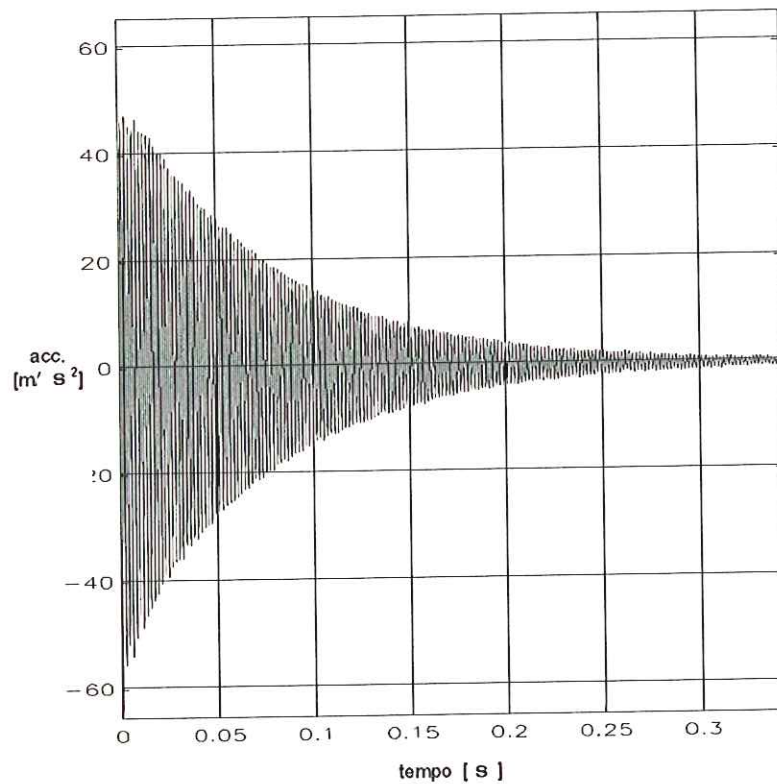


Figura 14 - Diagramma dell'oscillazione libera della trave 9

al decremento logaritmico (δ):

$$\xi = \delta / 2 \cdot \pi$$

Il decremento logaritmico è definito dal logaritmo naturale del rapporto tra le ampiezza di due qualsiasi picchi della vibrazione ed il numero di cicli tra di essi intercorrenti:

$$\delta = 1 / n \cdot \ln (A_0 / A_n)$$

Per cui sul diagramma di vibrazione libera nel dominio del tempo è necessario individuare i punti A_0 e A_n e contare il numero dei cicli per poter esprimere δ . Pur essendo possibile operare manualmente in questo modo, è stato scelto l'uso di un programma capace di eseguire automaticamente e molto rapidamente questa elaborazione a seguito dell'acquisizione dei dati della prova di vibrazione libera.

Gli strumenti e la prova

Lo schema di prova, l'accelerometro e l'acquisitore sono indicati in 4.2.3.1 (la prova è unica); a valle del sistema di misura è stato collegato un computer dotato di scheda di acquisizione di segnale nonché di programmi atti all'elaborazione successiva.

L'operazione di registrazione dell'onda è avvenuta con l'accelerometro collocato su una testata durante l'esecuzione della prova per il rilevamento della frequenza di vibrazione libera.

Il calcolo del decremento logaritmico dell'onda è stato effettuato dal calcolatore che ha interpolato i valori dei picchi delle onde rappresentanti la vibrazione, registrata e restituita nel dominio del tempo, con una curva d'involuppo. L'equazione della curva è stata impiegata per il calcolo dello smorzamento percentuale (ξ).

Tutte le curve sono presentate negli Allegati - parte II.

4.3 Le prove di carico

Con le prove di carico sono state determinate le caratteristiche elastiche di riferimento delle travi. Lo scopo è quello di ottenere i valori di elasticità necessari per qualificare il materiale. I dati sono utilizzati anche per il confronto con le prove non distruttive, per accertare con quale precisione possono essere previsti i moduli di elasticità di elementi lignei "in situ".

Alcune di queste prove di carico possono essere eseguite anche su elementi in opera o a pie' d'opera. Ciò che cambia è la precisione con cui possono essere rilevati i valori di deformazione.

Le prove di flessione statica sono state eseguite sia con carico unico centrale sia con carico ripartito su due punti. Con la prima prova si è determinato un modulo di elasticità semplificato (apparente), influenzato anche dalle deformazioni di taglio, con il secondo è stato determinato un modulo depurato da altre deformazioni (limitatamente al tratto fra i punti di applicazione del carico).

Il documento di riferimento per l'impostazione della geometria di prova è il documento CEN prEN 408 che riprende integralmente la norma internazionale ISO 8375. Lo schema statico suggerito dalla normativa non è stato seguito integralmente perché il rapporto lunghezza-altezza delle travi si discosta molto da quello previsto dalla norma. Perciò sono stati eseguiti aggiustamenti sulle distanze tra gli appoggi e tra i pressori di carico.

4.3.1 Organizzazione delle prove

Le prove di carico sono state effettuate nel Laboratorio Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile della Facoltà di Ingegneria di Firenze.

Per l'esecuzione delle prove è stato impiegato il telaio metallico di contrasto sul quale sono state sistemate di volta in volta le travi.

Sono state effettuate tre prove di carico mantenendo, per ogni trave, la stessa geometria del telaio di contrasto, fuorché per i pressori. La prima a carico unico centrale, la seconda e la terza con carico ripartito su due pressori. Le prime due prove sono state eseguite per la determinazione dei moduli elastici, rimanendo quindi ampiamente nel campo elastico della trave, la terza, per il calcolo dei valori della resistenza, è stata portata avanti sino alla rottura definitiva delle travi.

4.3.1.1 Il telaio di contrasto

Per le prove di flessione delle travi è stato necessario utilizzare parte del grande telaio prova-materiali del Laboratorio Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile.

Come supporto degli appoggi sono state utilizzate due longherine di metallo HE300 fissate perpendicolarmente agli elementi longitudinali del telaio. Poiché le luci libere tra gli appoggi sono state scelte in funzione della lunghezza delle travi, le due travi-appoggio sono state spostate di 10 in 10 cm per ottenere di volta in volta le luci prestabilite: 4 m, 4,2 m, 4,4 m.

Al centro delle due HE300 sono stati fissati due parallelepipedi d'acciaio a sostegno di due cilindri di 6 cm di diametro, sui quali sono state appoggiate le travi con interposta la piastra di ripartizione di carico, avente spessore di 1 cm. Uno dei due rulli

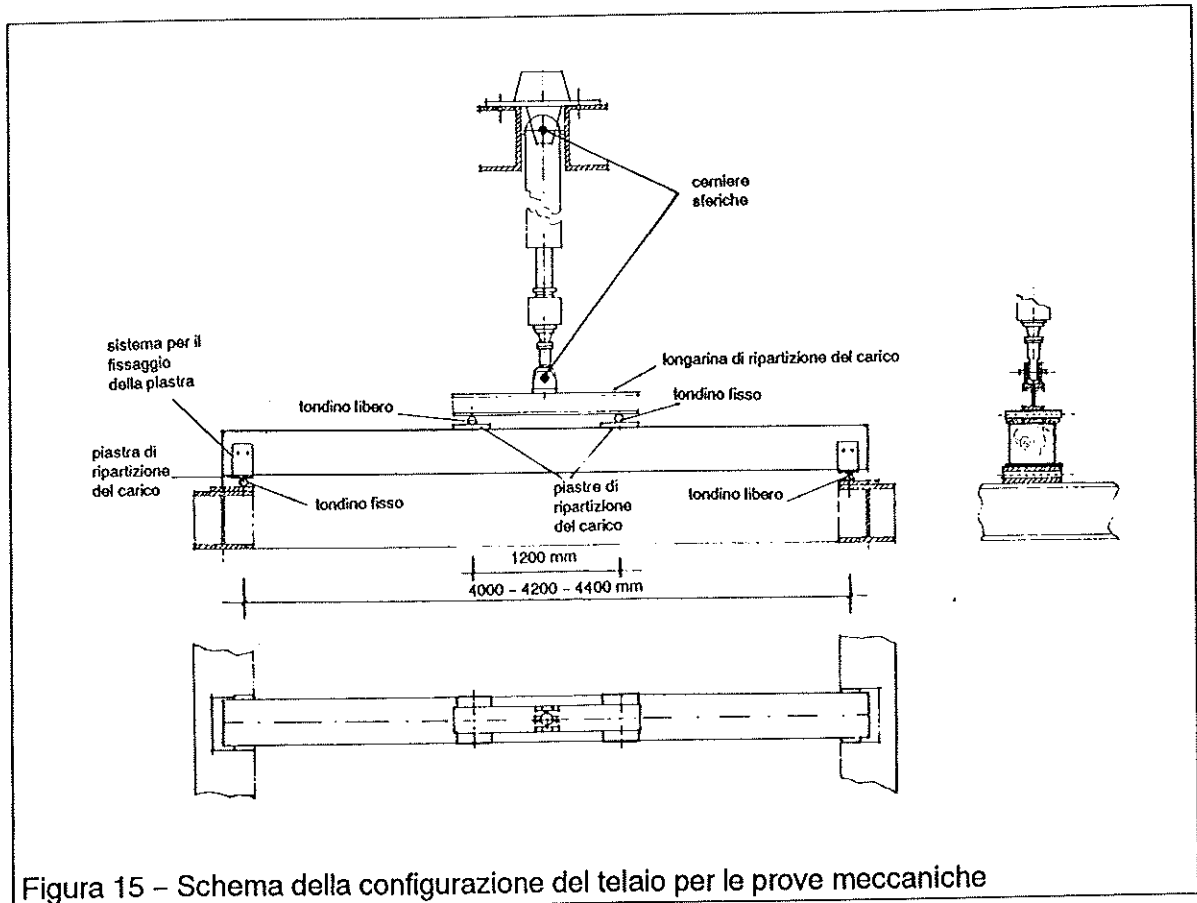


Figura 15 - Schema della configurazione del telaio per le prove meccaniche

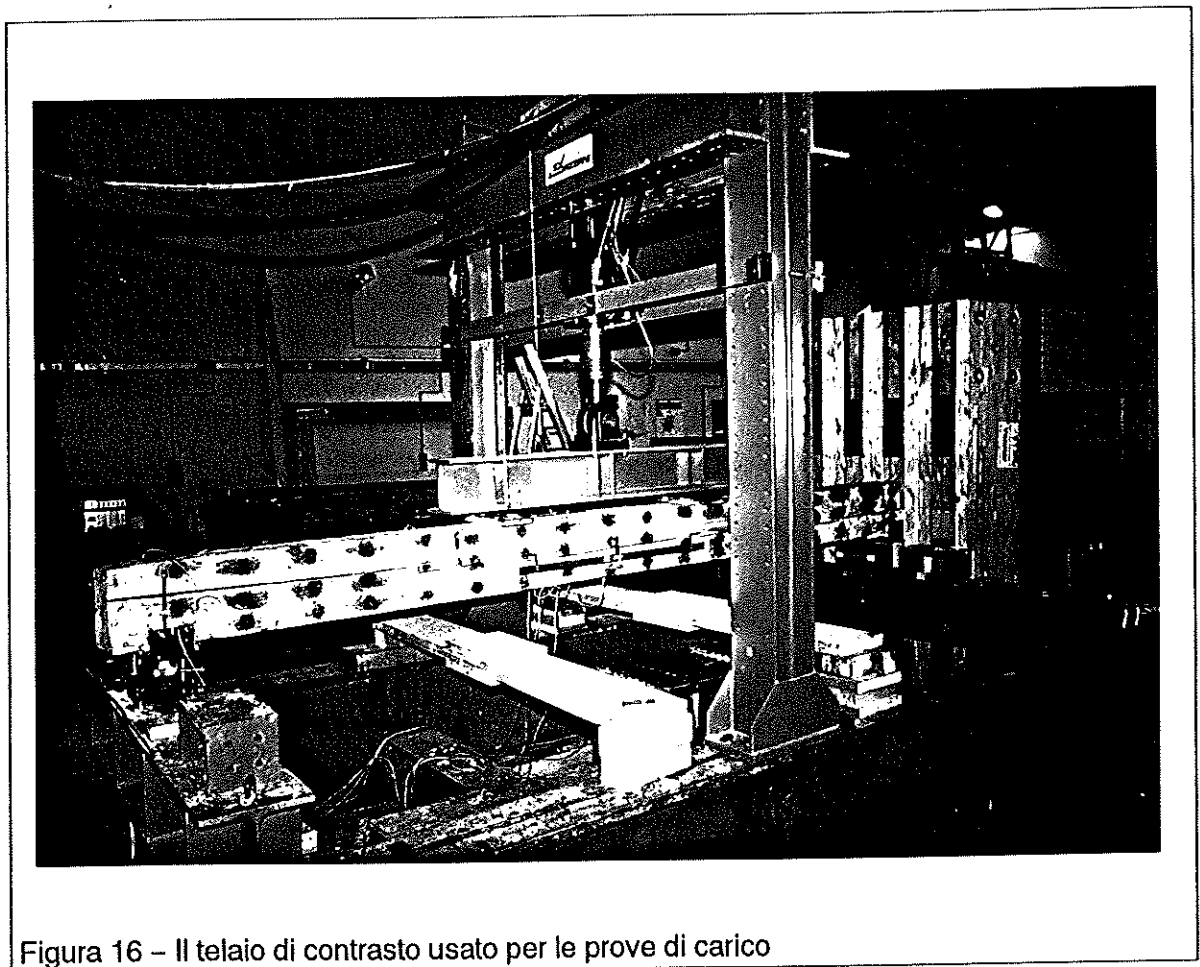


Figura 16 - Il telaio di contrasto usato per le prove di carico

era basculante allo scopo di compensare l'eventuale non complanarità delle estremità delle travi.

I pressori di carico, costituiti da due piastre d'acciaio di 0,5 cm di spessore, a cui sono stati poggiati due cilindri di 2,5 cm di diametro, sono stati fissati ad una HE240 appesa direttamente all'attuatore. Come attuatore è stato utilizzato un martinetto idraulico, a controllo elettronico di spostamento, con carico massimo di 35 t e corsa massima di 12 cm. Il pistone idraulico è stato bloccato a due profilati a U, paralleli alle travi-appoggio, fissati a due colonne avvitate direttamente sulle basi del telaio.

Poiché il pistone idraulico è fornito di due cerniere alle estremità, a metà lunghezza è stato controventato con due profilati di acciaio a sezione quadrata, fissati anch'essi alle colonne, allo scopo di evitare gli sbandamenti laterali e le conseguenti eventuali asimmetrie nella fase di carico.

4.3.1.2 La collocazione della trave

A causa delle notevoli dimensioni delle sezioni, dell'irregolarità delle superfici e della presenza di deformazioni, per ottenere una buona ripartizione del carico, è stato necessario:

- livellare la superficie attraverso l'asciatura della trave sui punti d'appoggio,
- applicare un sottile strato di gesso tra il legno e la piastra,
- ruotare l'appoggio basculante nel caso che le correzioni precedenti non fossero state sufficienti.

Un livellamento della superficie è stato eseguito anche in corrispondenza dei pressori. In quei punti le superfici sono state rettificate solamente attraverso l'aggiunta di gesso, senza quindi intaccare le sezioni resistenti con una levigatura, poiché si era in prossimità delle zone dove, durante le prove, il momento flettente sarebbe stato massimo.

La piastra è stata interposta tra legno e cilindro per evitare che le travi si intaccassero per il carico esercitato dal pressore, a causa della compressione perpendicolare alla fibratura. In questo modo il carico si è ripartito su una superficie più ampia, data dalla larghezza della trave per il lato minore della piastra. Per i carichi più elevati si è avuta comunque una sollecitazione elevata, tale da schiacciare i primi strati di cellule.

Per evitare lo spostamento delle piastre rispetto alla trave, esse sono state rese solidali con quest'ultima attraverso due "L" di metallo imbullonate alle piastre stesse: sul tratto verticale della "L", parallelo alle facce laterali della trave sono state avvitate due barre filettate che, di volta in volta, sono state serrate contro il legno.

4.3.1.3 Gli strumenti di misura

Sono stati misurati carichi e deformazioni.

Il carico applicato dall'attuatore è stato rilevato da una cella di carico estensimetrica inserita all'interno del martinetto idraulico.

La freccia di inflessione totale è stata misurata con un trasduttore di spostamento (LVDT con una corsa utile di ± 200 mm), fissato a terra e collegato alla trave per mezzo di un filo di invar legato ad un occhiello, avvitato in corrispondenza della mezzera sull'intradosso della trave. Il filo è stato rinviato alla trave per mezzo di una carrucola

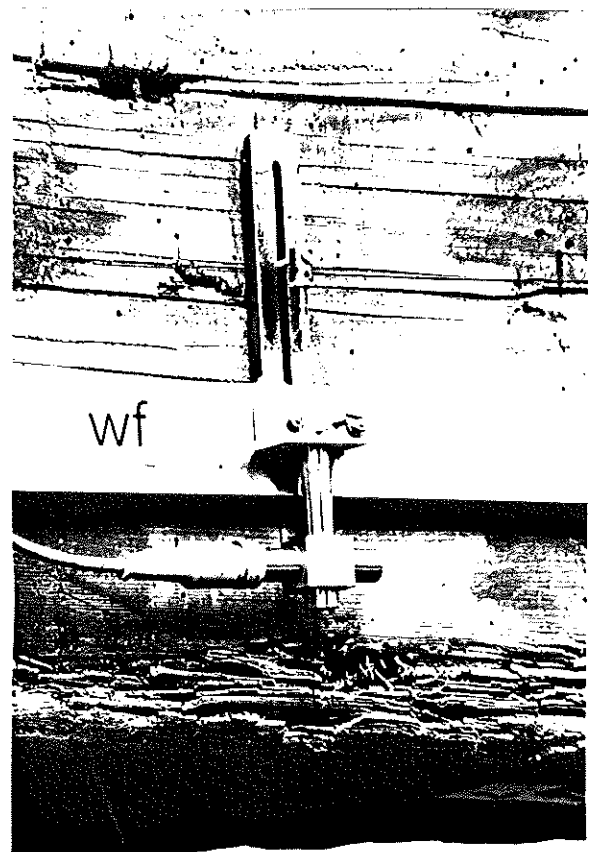


Figure 17 e 18 - Sistema di misura della freccia relativa: il supporto di metallo del trasduttore di spostamento appeso su un lato della trave e trasduttore LVDT W10

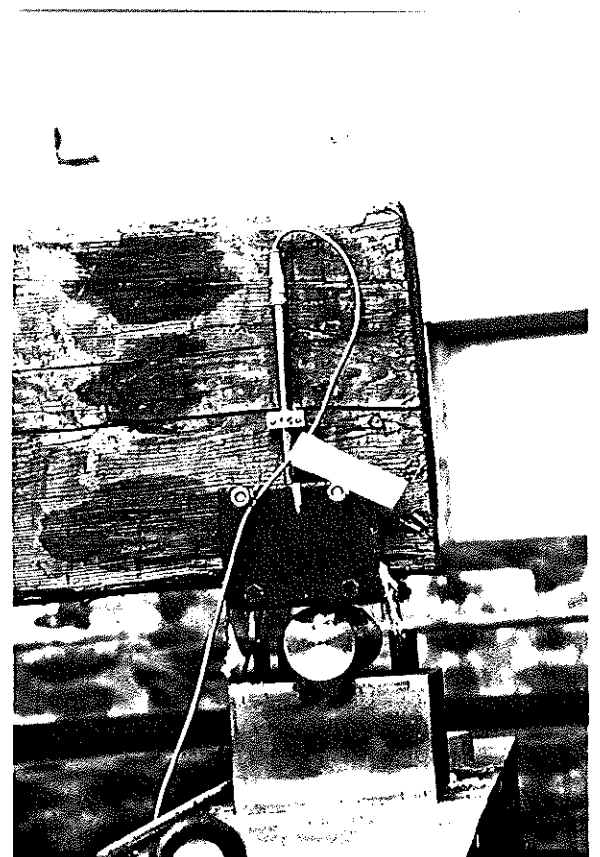
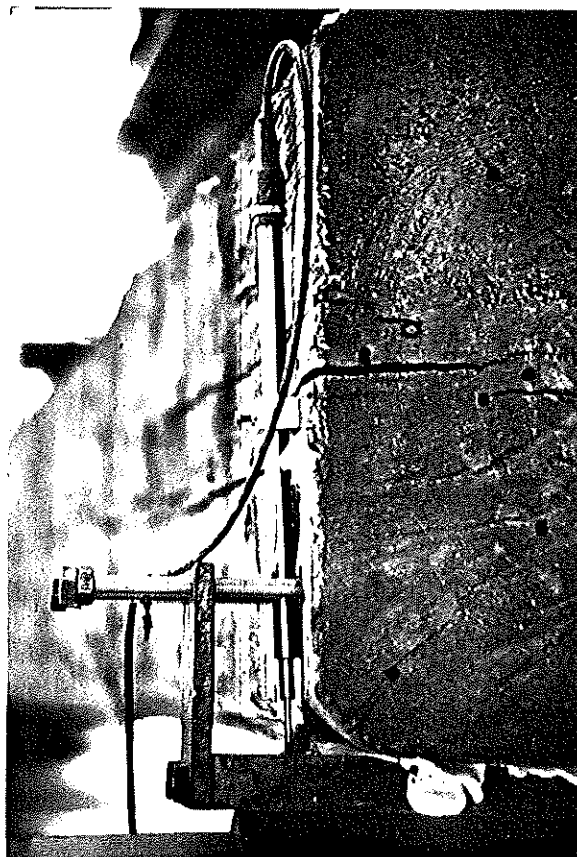


Figure 19 e 20 - Sistema per la misura dello schiacciamento del legno sugli appoggi per mezzo di un LVDT W20 e particolare di un appoggio. La piastra è stata vincolata alla trave attraverso due barre filettate serrate contro il legno

posta sullo stesso piano del W200 e sulla verticale dell'occhiello. E' stato misurato così l'abbassamento della trave rispetto ai due appoggi laterali. La risoluzione di questo strumento, dovendo lavorare con frecce totali di alcuni cm, è stata impostata a 0,05 mm.

La freccia di inflessione relativa è stata rilevata come indicato dalla prEN 408: in corrispondenza dell'asse neutro (geometrico), su una lato della trave, per mezzo di due chiodi, è stato appeso un telaio di metallo ("giogo") a cui era fissato un trasduttore di posizione W10 (LVDT, con una corsa utile di ± 10 mm). Il tastatore di questo LVDT è stato agganciato al terzo chiodo, alla metà della distanza dagli altri due, infisso sempre sull'asse neutro. In questo modo è stato misurato l'abbassamento del punto (chiodo) centrale sull'asse neutro rispetto agli altri due. Poiché le dimensioni delle travi, la posizione delle fessurazioni e degli altri difetti hanno fatto prevedere una asimmetria nella deformazione a flessione, si è deciso di raddoppiare le misure e di sistemare un altro trasduttore W10 su un secondo giogo simmetrico rispetto al primo. La risoluzione di questi strumenti è stata impostata a circa 0,5 μm , dato che le frecce relative erano dell'ordine di qualche decimo di mm.

Sulle piastre di ripartizione del carico, sopra i rulli d'appoggio, sono stati sistemati altri quattro trasduttori W20 (± 20 mm di corsa utile), allo scopo di controllare l'entità degli schiacciamenti subiti dalla trave, in corrispondenza degli appoggi, in fase di carico, e correggere la misura della freccia assoluta. I supporti d'alluminio per i trasduttori sono stati fissati per mezzo di due viti autofilettanti, sull'asse neutro della trave e il tastatore dei trasduttori è stato portato a contatto con la piastra di ripartizione del carico.

Due comparatori centesimali sono stati sistemati sotto il centro delle HE300, che hanno costituito i supporti degli appoggi, per considerare anche l'eventuale abbassamento per la flessione delle due longherine, e correggere ulteriormente il valore della freccia assoluta.

Tutti i segnali elettrici sono stati convogliati al computer, dotato di scheda di acquisizione di segnale e convertitore analogico-digitale, e registrati. In un secondo momento sono stati trasformati da "digit" in unità tecniche per procedere all'elaborazione. Contemporaneamente alla registrazione, su un plotter x-y, è stata riportata la curva rappresentante l'andamento della deformazione della freccia totale in mezzeria in funzione del carico.

4.3.2 I moduli di elasticità

4.3.2.1 Flessione statica a carico unico centrale

Lo scopo di questa prova è stato quello di ricavare un modulo elastico apparente con una semplice configurazione di prova. L'applicazione del carico è avvenuta al centro della trave appoggiata agli estremi; la misura della deformazione assoluta è stata rilevata sull'intradosso in mezzeria, e sull'asse neutro.

Questo modulo di elasticità viene definito apparente, p. es. dalla EN 408, perché la freccia totale d'inflessione è data dalla somma della freccia dovuta alla flessione e di quella dovuta alla deformazione di taglio. Dato che nel calcolo le due componenti non vengono distinte, il modulo elastico viene definito "apparente" (E_{app}) perché risulta *minore* del modulo elastico "puro".

La prova di carico si è svolta in controllo automatico di spostamento, ed è stata impostata in modo da raggiungere un carico di 7000 kg in circa 90 secondi. Nelle travi

con forti problemi di degradamento il carico massimo raggiunto è stato limitato a 3000 o 2000 kg (un momento flettente di circa 5000 kgm), mantenendo lo stesso tempo di prova, per evitare di produrre danni. Le prove vere e proprie sono state procedute da un test preliminare per la verifica degli strumenti di acquisizione.

Per mezzo di questa prova di flessione statica sono stati determinati due moduli d'elasticità: uno calcolato con la freccia assoluta e l'altro con la freccia relativa misurata lungo l'asse neutro, con l'impiego di due supporti per i trasduttori, come descritto in 4.3.1.3. La misura della freccia assoluta è riproponibile anche senza l'impiego di strumenti elettronici, poiché le deflessioni sono dell'ordine dei millimetri e quindi facilmente rilevabili anche con strumenti meccanici (ad esempio un comparatore centesimale).

Il calcolo del modulo di elasticità con la freccia misurata all'intradosso, in mezzeria è stato effettuato utilizzando la relazione

$$E_{app} = \frac{dP \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot dW}$$

mentre per la freccia misurata sull'asse neutro

$$E_{app, an} = \frac{dP \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot dW \cdot \left[1 - 3 \cdot \frac{a}{l} + 4 \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right]}$$

dove dP è l'intervallo di carico considerato, in Newton, dW è la corrispondente freccia di inflessione, in mm, l è la luce libera tra gli appoggi, in mm, J è il momento d'inerzia della sezione, in mm⁴, a è la distanza tra l'appoggio e un'estremità della base di misura della freccia di inflessione relativa (giogo), in mm.

I valori sono presentati nelle tabelle negli Allegati - parte III.

4.3.2.2 Flessione statica su quattro punti

Attraverso questa prova di carico si è determinato il modulo d'elasticità netto dalle deformazioni legate al taglio.

Per ottenere questo si sono eseguite le misure delle frecce relative nel tratto centrale della trave, quello compreso tra i due pressori di carico. Su questa porzione centrale di trave il momento flettente è costante e il taglio nullo.

La dimensione del tratto centrale, e quindi la distanza tra i due pressori, è stata impostata a 1,2 m, identica per tutte le travi, mentre la distanza pressore di carico-appoggio e la luce tra i due appoggi sono state modificate di volta in volta, in funzione delle lunghezze delle travi.

I dati sono stati inseriti nella seguente relazione

$$E_0 = \frac{dP \cdot a \cdot l^2}{16 \cdot J \cdot dW}$$

dove dP è l'incremento di carico considerato, in Newton, dW è il corrispondente incremento di freccia relativa, in mm, l_1 è la base di misura della freccia relativa, in mm, a è la distanza dall'appoggio al punto di applicazione del carico più vicino, in mm.

La prova di carico è stata eseguita in modo da raggiungere un valore del momento flettente al centro della trave di circa 5000 kgm per le travi in ottimo stato, di 2000+4000 kgm per quelle in cui la presenza di degradamento ha consigliato prudenza.

Le tabelle con i risultati sono presentate negli Allegati - parte III.

4.3.2.3 Elaborazione del Modulo di Taglio G

Il calcolo del modulo di scorrimento G è stato eseguito utilizzando i dati risultanti dalle prove di elasticità a carico unico centrale ($E_{app,an}$) e a carico ripartito su due punti (E_0).

I valori sono stati utilizzati nella seguente espressione:

$$G = \frac{(1,2 \cdot h^2)}{\left[l^2 \cdot \left(\frac{1}{E_{app,an}} - \frac{1}{E_0} \right) \right]}$$

ottenuta dalla elaborazione della curva di deformazione totale di una trave ad inerzia costante sottoposta ad un carico concentrato nella mezzera, dove h è l'altezza del segato, in mm, l è la luce libera tra gli appoggi utilizzata nelle prove di flessione, in mm, $E_{app,an}$ è il modulo elastico apparente (4.3.2.1) e E_0 è il modulo elastico a momento flettente costante (4.3.2.2).

La luce tra gli appoggi delle travi per il calcolo dei due moduli e la base di misura della freccia sono le stesse sia per E_0 che per $E_{app,an}$.

I risultati delle elaborazioni sono presentati negli Allegati - parte III.

4.3.3 Determinazione della resistenza a flessione

La configurazione di prova finale, per giungere ai valori di resistenza delle travi, è rimasta quella della flessione statica con carico ripartito su due punti.

La prova è stata eseguita riducendo al minimo indispensabile gli strumenti di misura, onde evitare che i cedimenti delle travi al momento della rottura risultassero rovinosi per le apparecchiature. Oltre alla cella di carico è stato lasciato il trasduttore di posizione (W200) per la misura della freccia totale in mezzera.

A causa delle imprevedibili modalità di rottura delle travi, si è superato sempre il limite massimo di durata della prova, fissato in 7 minuti dalla norma prEN 408. La lunga durata del carico potrebbe aver avuto qualche effetto sui valori massimi di resistenza, i

quali possono risultare un po' ridotti a causa del comportamento viscoelastico del legno.

In tutti i casi le prove sono proseguite anche dopo il verificarsi delle prime rotture, sia che fossero dovute a taglio o a flessione. L'interruzione è avvenuta solo alla constatazione del raggiungimento della definitiva rottura della trave, a carichi particolarmente bassi.

4.3.3.1 Modulo di Rottura a flessione

Il primo MoR è stato calcolato con il valore massimo di carico raggiunto da ciascuna trave, senza prendere in considerazione la loro eventuale parzializzazione.

Il calcolo è stato eseguito inserendo nella relazione

$$MoR = \frac{F_u \cdot l}{4 \cdot W}$$

l la luce libera tra gli appoggi, in mm, F_u il carico massimo raggiunto, in Newton, W il modulo di resistenza, in mm³.

Tutti i grafici carico-deformazione, le descrizioni delle modalità di rottura e le tabelle sono presenti negli Allegati - parte IV.

4.3.3.2 Resistenza a flessione delle travi parzializzate

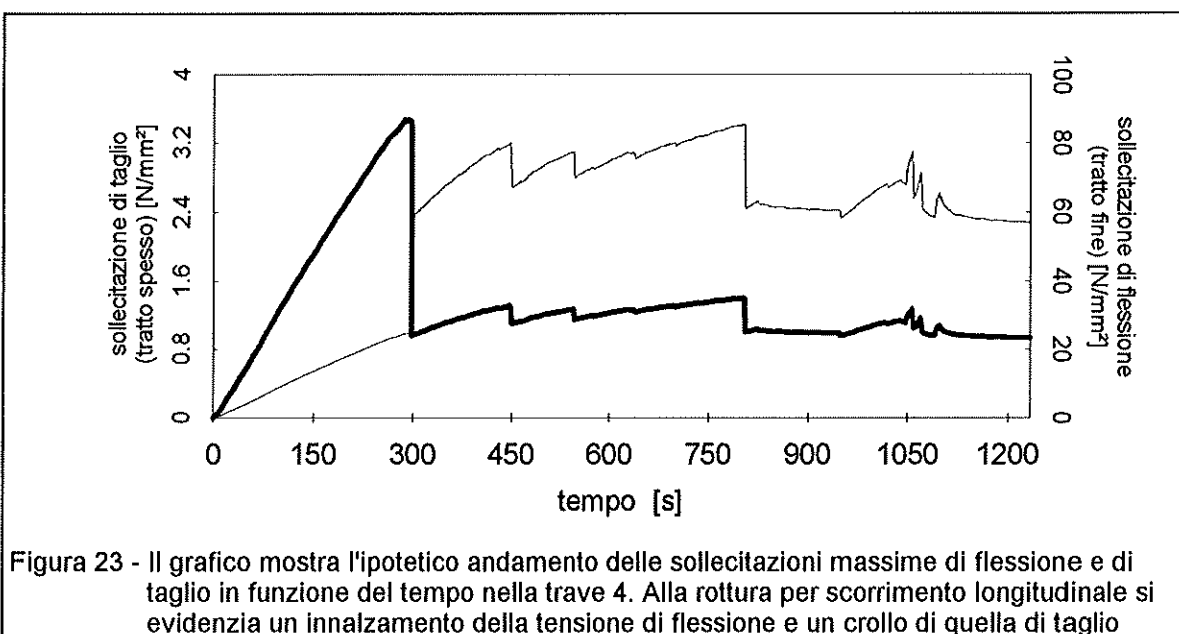
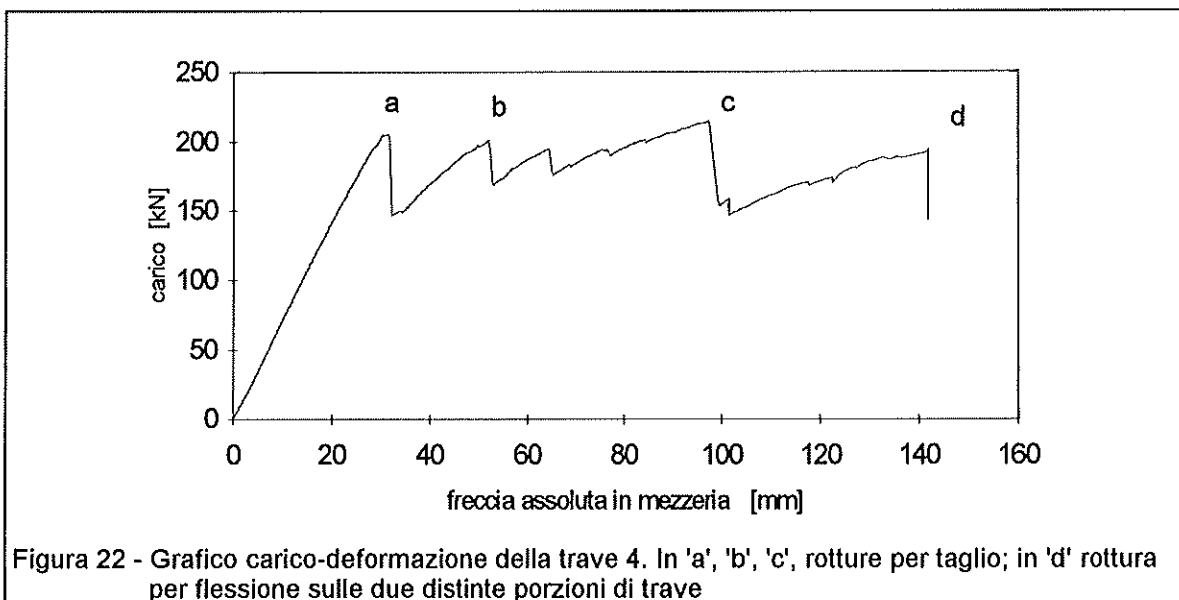
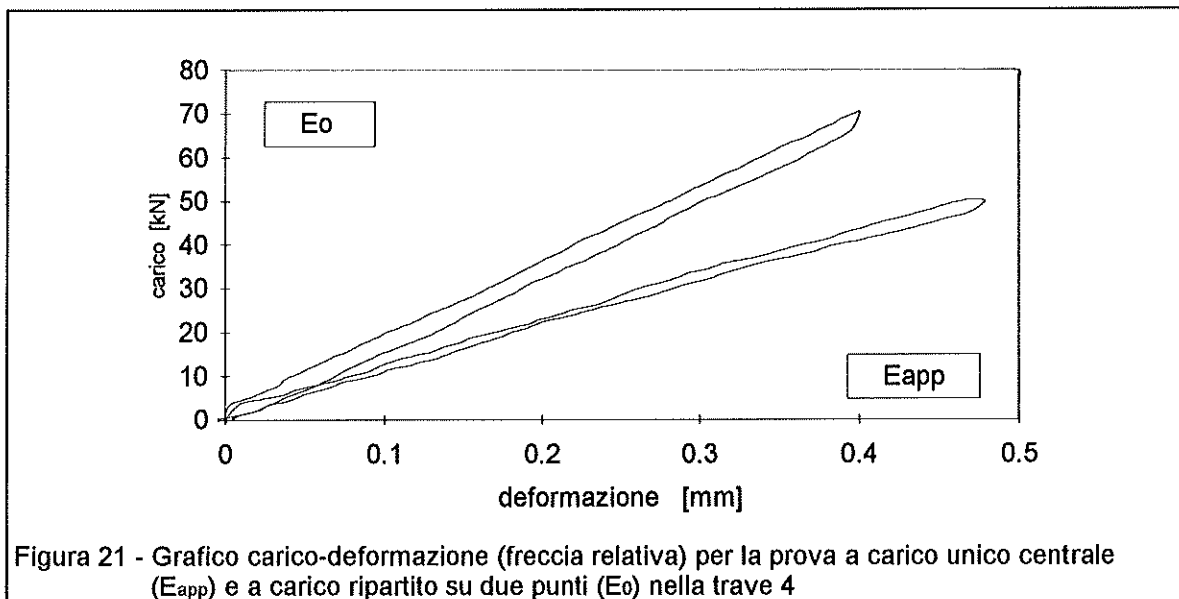
In 7 travi la prima rottura a verificarsi è stata quella a taglio in prossimità dell'asse neutro. Essa ha prodotto una separazione netta delle travi in due parti, a partire da una delle due testate, per circa la metà della lunghezza. L'altra estremità, una volta che parte delle tensioni di taglio si sono scaricate, è rimasta integra.

Normalmente la rottura al taglio è avvenuta ancora quando la curva carico-deformazione era in campo elastico, al di sotto del limite di proporzionalità: dal momento della prima rottura le due "mezze" travi si sono comportate indipendentemente sino al raggiungimento delle tensioni di rottura per flessione.

Il calcolo di queste tensioni è stato effettuato misurando il carico a cui era soggetta la trave nell'istante in cui è avvenuta la rottura per flessione e la posizione della linea di separazione tra le due parti. Questa seconda operazione è stata effettuata misurando in 4 punti lungo la linea di separazione l'altezza delle due "mezze" travi. Dalle misurazioni è stata ricavata l'altezza media per la parte superiore e quella per l'inferiore.

Utilizzando i valori medi è stata fatta una evidente semplificazione, dato che le superfici risultanti dalla rottura a taglio non erano perfettamente piane ma seguivano in parte i difetti e le fessurazioni preesistenti. Il rilievo della vera dimensione delle due parti sarebbe stato possibile solo tagliando le travi a fette, lungo il loro asse, e ricostruendo così i veri contorni, anche interni, delle due "semitravi".

E' stata necessaria un'ulteriore approssimazione perché gli attriti, che impedivano il libero scorrimento di una porzione di trave rispetto all'altra durante la flessione, non sono stati quantificati, anche se si suppone che l'effetto di questi attriti non possa che essere stato marginale.



Con queste nuove misure delle due parti di trave sono stati ricalcolati i moduli di rottura a flessione utilizzando la stessa relazione presente in 4.3.4.1. E' stato calcolato il MoR della parte che si è veramente rotta ($MoR(P)_{max}$), una media tra i MoR delle due parti ($MoR(P)_{medio}$), e un MoR medio supponendo una divisione precisa sull'asse neutro tra le due travi parzializzate ($MoR(P)_{1/2}$). I valori sono in tabella 8, negli Allegati - parte IV.

4.3.3.3 Resistenza a Taglio

In sette travi su dodici, prima di raggiungere il limite di resistenza a flessione del materiale, è stato superato il limite di resistenza al taglio (τ) in corrispondenza dell'asse neutro.

Questo tipo di rottura si è verificata in particolare laddove le sezioni erano ridotte dalla presenza di fessurazioni da ritiro o di cipollature, in prossimità delle zone dove le sollecitazioni di taglio sono risultate maggiori. La τ massima si ha sulla linea dell'asse neutro per cui la presenza di questo tipo di difetti in prossimità di quella zona aveva fatto prevedere la possibilità di giungere a rottura per lo scorrimento longitudinale tra la parte tesa e quella compressa della trave.

In fase di elaborazione i valori delle tensioni di taglio, raggiunti al momento della rottura, sono stati calcolati dapprima immaginando le travi intere, senza fessurazioni né cipollature e quindi ottenendo un valore medio su tutta la sezione, attraverso la formula semplificata per gli elementi di forma rettangolare

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{T}{A}$$

dove T è lo sforzo di taglio, in Newton, e A è l'area della sezione, in mm^2 , e successivamente in funzione delle reali dimensioni delle sezioni resistenti nei punti di rottura.

In questo secondo caso sono state utilizzate la profondità e la posizione delle grandi fessurazioni longitudinali, dovute al ritiro del legno, e delle cipollature, rilevate nell'ispezione visuale.

Nel caso in cui i cretti da ritiro non fossero simmetrici rispetto all'asse della sezione si è ricorsi ad una semplificazione trascurando il problema della flessione deviata. Ricalcolare la distribuzione delle tensioni in funzione della asimmetria delle sezioni delle travi sarebbe risultato improponibile per la difficoltà e le complicazioni che sarebbero sorte.

Inoltre è stata mantenuta l'ipotesi che il materiale fosse omogeneo e la rimanente sezione regolare.

I dati sono stati elaborati attraverso la formula

$$\tau = \frac{T \cdot S_i}{J \cdot b_i}$$

utilizzata per il calcolo della tensione tangenziale τ in una sezione qualsiasi, dove T è lo sforzo di taglio, in Newton, S_i è il momento statico dell'area delimitata dalla retta su cui si

vuole calcolare τ , in mm^3 , J e il momento di inerzia della sezione, in mm^4 , b_i è la larghezza della sezione nel punto considerato.

Tutti i valori sono in tabella 8, negli Allegati - parte IV.

5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo sono stati presentati e discussi gli esiti dell'ispezione visuale, delle prove non distruttive e delle prove di carico.

Si può anticipare che le informazioni acquisite sono di due tipi: un'indicazione qualitativa sulle specificità della trave, difficilmente quantificabile, fornita da alcune delle rilevazioni dell'ispezione visuale e da alcuni dati delle prove non distruttive; un'informazione quantitativa, ottenuta dalla maggior parte delle prove non distruttive, da quelle di carico e da qualche parametro ricavato dall'ispezione visuale.

Nella seconda parte del capitolo sono state descritte le elaborazioni statistiche eseguite sui dati e i risultati più significativi conseguiti.

La prima parte dell'analisi statistica è basata sul calcolo delle medie, dei coefficienti di variazione e degli altri valori significativi. Quindi le variabili sono state incrociate per il controllo della eventuale presenza di interessanti coefficienti di correlazione.

Sui dati che hanno dimostrato di poter fornire informazioni rilevanti per la previsione delle caratteristiche elastiche e di resistenza del materiale sono state eseguite delle regressioni semplici. Combinando diverse variabili tra quelle disponibili sono state formulate delle regressioni multiple per verificare la possibilità di giungere ad una più accurata previsione del comportamento delle travi.

5.1 L'ispezione visuale

5.1.1 Considerazioni generali sul materiale

Le travi, a causa delle loro grandi dimensioni, hanno in comune le seguenti caratteristiche: il midollo è contenuto all'incirca al centro della sezione, le fessurazioni sono sempre e abbondantemente presenti, le superfici, essendo lavorate a mano, si presentano molto irregolari e gli smussi sono frequenti.

L'esame visuale delle travi e la loro descrizione ha consentito di giungere alle seguenti considerazioni:

- in buona parte del materiale a nostra disposizione, ben cinque travi su dodici, sono presenti cipollature più o meno estese, dovute a volte alla brusca variazione della dimensione degli anelli, altre volte senza cause evidenti. Nel primo caso è risultata palese la differente velocità di crescita degli alberi, legata a sua volta o ad eventi calamitosi o a forti interventi selvicolturali. Le cipollature sono state valutate attentamente perché, chiaramente, hanno un peso notevole sulle caratteristiche elastiche, sulle resistenze e sulla valutazione dei risultati di alcune prove non distruttive;
- la faccia C (che in base alla preparazione della trave corrisponde all'estradosso sulla trave in opera), ha presentato spesso del degradamento, a volte molto intenso, altre

volte superficiale ed appena accennato. E' probabile che durante la vita della struttura questi elementi subissero, o meglio avessero subito in modo sporadico, infiltrazioni d'acqua dal solaio soprastante oppure fossero stati soggetti alla formazione di condense, trovandosi nella zona più nascosta e meno ventilata. A condizioni di umidità del legno più elevata, in particolare nell'interno delle fessurazioni in cui l'accumulo di acqua era maggiore, le ife fungine hanno avuto la possibilità di proliferare;

- lo spessore medio degli anelli d'accrescimento di tutte le travi è piuttosto basso. Se ne può dedurre che l'accrescimento degli alberi all'interno dei boschi dell'Appennino nei secoli passati era piuttosto lento. Il risultato è che il materiale presenta anelli uniformi, di spessore intorno a 1 mm, con massa volumica piuttosto elevata e con caratteristiche meccaniche verosimilmente buone.

5.1.2 La classificazione visuale

Si deve rimarcare che le norme in questione vengono usate per la classificazione di materiale nuovo e di dimensioni ridotte e quindi l'applicazione senza modifiche alle travi di questo studio ha un valore relativo.

I risultati delle classificazioni hanno mostrato che nel nostro campione solo 1 trave poteva rispondere ai requisiti richiesti. I motivi per cui le altre 11 sono state scartate sono principalmente la presenza di fessurazioni da ritiro, di degradamento del legno e delle cipollature. La norma tedesca è stata la meno restrittiva perché accetta ogni tipo di fessurazione da ritiro.

Si deve aggiungere che non è possibile selezionare in classi, in funzione della resistenza, le travi antiche basandosi esclusivamente sui criteri presenti nell'una o nell'altra norma. Evidentemente è necessario che ogni trave, valutata in situ o a pie' d'opera, sia trattata come un caso particolare: l'estensione delle zone degradate, la dimensione delle fessurazioni, la loro posizione e tutti gli altri difetti vanno considerati ad uno ad uno, tenendo conto sia della loro importanza, sia della influenza reciproca e dell'effetto cumulativo sulle caratteristiche meccaniche dell'intero elemento.

Per fare questo è necessaria, oltre che una buona Norma, anche una certa dose di esperienza e di conoscenza del legno.

Un'altra difficoltà, che non ha riguardato questo studio ma che si presenta normalmente in opera, è l'impossibilità di osservare tutte le facce delle travi e quindi di effettuare una classificazione visuale. Questo aspetto andrebbe valutato a parte se si dovesse approntare una nuova norma di classificazione visuale utilizzabile anche sul materiale in opera.

In conclusione, volendo effettuare una classificazione visuale, è necessario adattare i criteri delle norme considerate, in modo da tenere conto delle caratteristiche delle travi di grandi dimensioni.

5.1.2.1 Proposta di modifica di alcuni criteri di classificazione delle norme utilizzate

Sulla base delle precedenti considerazioni, vengono di seguito proposte alcune modifiche alle norme tecniche vigenti.

La prima proposta è quella di non considerare il criterio "fessurazioni da ritiro" (come del resto già fa la norma tedesca), vista la scarsa influenza che queste hanno sulla resistenza a flessione. Vanno comunque tenute in conto le situazioni particolari, come ad esempio la presenza di due fessurazioni confluenti in prossimità di quello che potrebbe essere l'asse neutro, per non sottostimare il pericolo di rotture per taglio.

La seconda è quella di modificare il criterio che valuta la presenza di degradamento del legno, ponendo dei valori-limite per la sua estensione. Sulle travi vecchie è improbabile non trovare anche piccole porzioni di materiale attaccato da funghi; se viene verificata la presenza di un attacco di funghi deve essere ammessa la valutazione della sua estensione lungo la superficie e all'interno della trave.

In questo caso si è proposto una modifica di questo criterio con l'aggiunta dei seguenti limiti per tre categorie, di qualsiasi norma facciano parte:

- 1^a categoria = degradamento non presente;
- 2^a categoria = ammessa la presenza di degradamento del legno sino ad una profondità uguale al 4% dell'altezza del segato (ad esempio per segati con 25 cm di altezza il legno riprende la sua normale consistenza ad 1 cm sotto la superficie), coprente non più del 10% della superficie della trave;
- 3^a categoria = oltre a quanto indicato sopra, ammesso il degradamento sino ad una profondità uguale al 10 % dell'altezza della trave, per piccoli tratti.

Con questi aggiustamenti si giungerebbe all'inserimento in categorie di 4 delle 12 travi. Evidentemente le 3 travi con uno stato avanzato di degradamento non potrebbero comunque essere accettate come materiale classificato, a cui attribuire una sezione "efficace" ed un valore di tensione ammissibile valido per l'intera sezione.

Per il problema della cipollatura non valgono le stesse considerazioni. L'andamento di questa fessurazione longitudinale non è risultato prevedibile: alcuni tratti lungo i lati del segato in cui le cipollature sono state localizzate hanno messo in evidenza la loro ampia estensione, ma non è stato possibile indicarne i contorni precisi, né con metodi visuali né con gli ultrasuoni.

Perciò, una volta individuato questo tipo di difetto a cui soprattutto l'Abete bianco e il Castagno sono soggetti, secondo il livello attuale delle conoscenze è opportuno scartare la trave, oppure, nel caso che siano accertate le apparentemente modeste dimensioni dell'anomalia applicare dei forti coefficienti di riduzione sulle tensioni ammissibili.

5.1.3 Stima delle sezioni residue

L'insieme delle informazioni ricavate ha consentito di giungere ad una stima delle sezioni trasversali dei punti critici presenti lungo la trave. In pratica alcune sezioni sono state disegnate in scala, comprese le dimensioni dei nodi, del degradamento, della profondità e della larghezza delle fessurazioni ecc.

Non ci sono stati problemi per l'individuazione dei difetti lungo le superfici e per la

ricostruzione dell'interno della trave. E' rimasta l'incognita della possibile presenza di difetti nascosti, quali ferite, grossi nodi ecc., anche se la probabilità che non siano stati rivelati da alcun segno esterno è molto piccola.

Invece per l'estensione del degradamento interno della sezione, a volte sono rimasti dei dubbi. Non sempre è stato possibile arrivare a stime precise sul volume occupato dal legno sano e si è stati costretti a giungere ad approssimazioni, cercando comunque di rimanere dalla parte della sicurezza, cioè immaginando la parte di legno sano minore che nella realtà. Questo atteggiamento ha portato alla sottovalutazione della percentuale di sezione resistente. Essa si è ripercossa sul calcolo di alcuni moduli di elasticità (par. 5.3) e dei valori di resistenza, risultati in qualche caso eccessivamente alti, tanto da apparire non attendibili. La verità è che si sono ottenuti momenti d'inerzia e moduli di resistenza troppo bassi.

Si ritiene comunque che un atteggiamento di prudenza sia necessario in presenza di dubbi sull'entità del degradamento, soprattutto nel caso di travi in opera, quando non vi è la possibilità di accedere comodamente a tutte le zone delle travi.

5.2 Le prove strumentali non distruttive

5.2.1 Le prove densitometriche

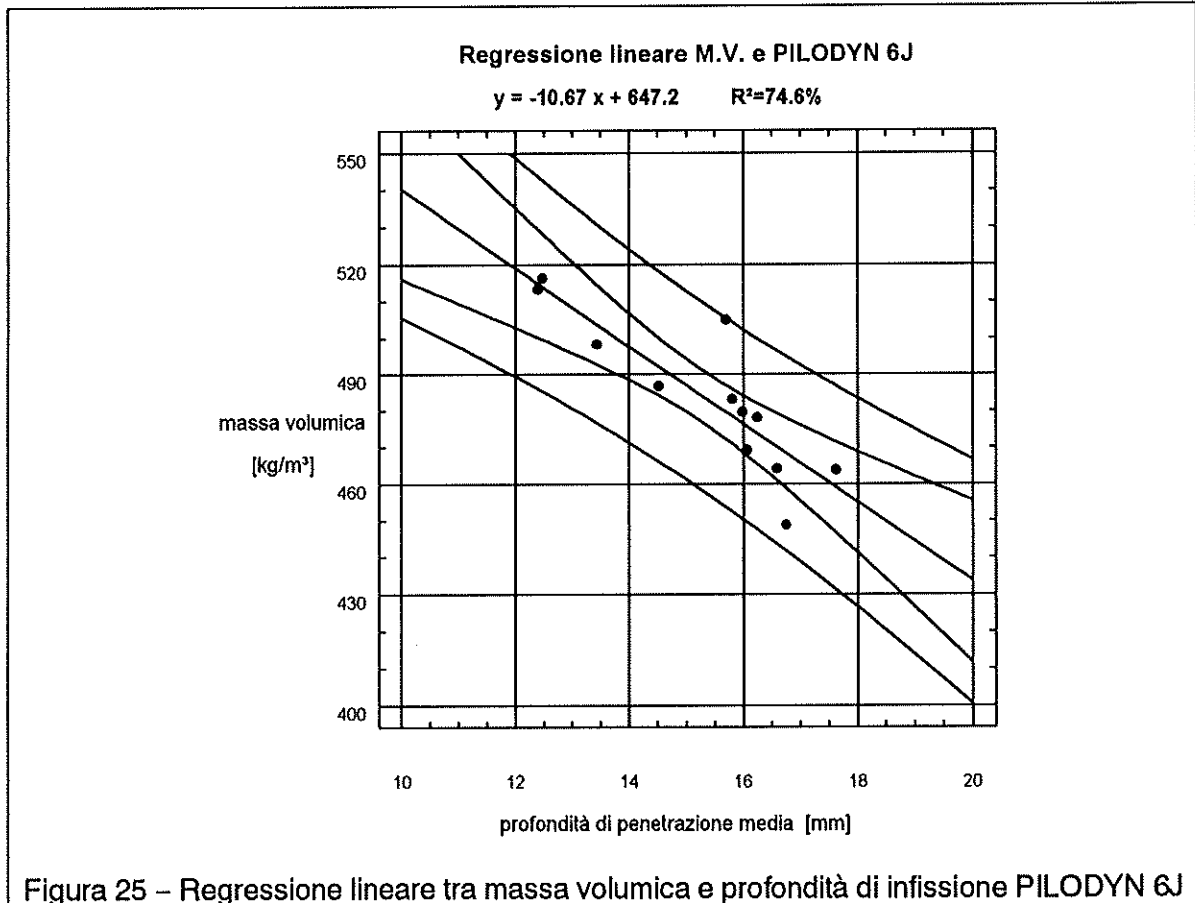
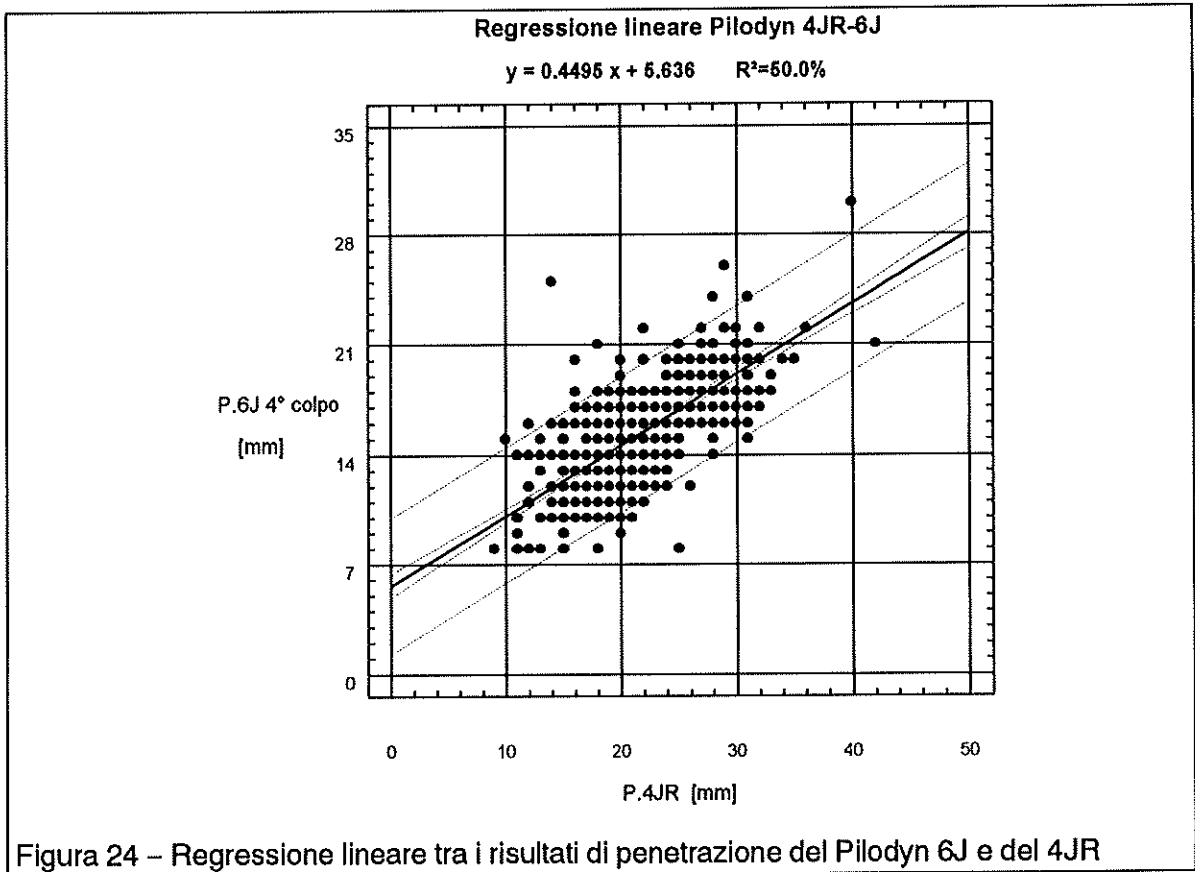
Dall'uso dei due Pilodyn si sono ricavati:

- le profondità di infissione dello spillo totali e parziali: per entrambi gli strumenti sono stati ottenuti valori medi minimi e massimi di penetrazione; per il Pilodyn Repetier sono stati ricavati anche i valori medi per ciascuno dei primi tre colpi,
- l'andamento della resistenza a penetrazione lungo i tre lati ispezionati: un dato qualitativo che ha fornito un supplemento di informazioni sulle caratteristiche della superficie della trave.

I valori che si sono ottenuti da entrambi gli strumenti si sono dimostrati abbastanza correlati con la massa volumica delle travi, a conferma di quanto indicato dalla letteratura. La relazione empirica individuata da GÖRLACHER (op.cit), per l'Abete rosso, il quale per massa volumica e proprietà meccaniche ha caratteristiche abbastanza simili all'Abete bianco, non è stata riscontrata dalle prove eseguite su questo materiale.

Malgrado tutti e due i tipi di prova abbiano dato risultati simili nei confronti della massa volumica, i due sistemi non sono sostituibili uno all'altro acriticamente. Infatti il coefficiente di correlazione tra tutti i valori di penetrazione totale dei due Pilodyn è di 0,74. Per il grande numero di prove su cui questo dato è stato calcolato, il valore dell'"r" ha indicato che il rapporto tra i dati è sicuramente significativo, ma non a sufficienza per asserire che i due Pilodyn siano intercambiabili.

Dal punto di vista pratico la prova è di semplice esecuzione con entrambi gli strumenti, per il Pilodyn 4JR è necessario però uno spazio maggiore per la carica della molla.



Prove con i Pilodyn									
	massa volumica kg/m ³	numero dei punti di prova	Pilodyn 6J		Pilodyn 4JR (valori medi)				
			media	C.V.	valori medi [mm]				C.V.
			mm	%	1°colpo	2°colpo	3°colpo	4°colpo	%
trave 1	480	51	16.0	21.3	7.6	12.8	18.3	24.1	23.6
trave 2	483	48	15.8	20.2	6.7	11.5	16.4	21.3	21.5
trave 3	516	54	12.5	<i>11.7</i>	6.4	10.7	15.0	19.7	15.3
trave 4	464	57	17.6	12.6	8.4	14.4	20.8	26.7	14.7
trave 5	487	54	14.5	14.4	7.2	11.4	15.4	19.7	16.6
trave 6	505	57	15.7	39.9	6.8	11.0	15.4	19.3	21.5
trave 7	464	57	16.6	12.1	7.5	12.3	17.1	22.0	18.4
trave 8	513	54	12.4	15.5	5.9	9.6	13.3	17.0	18.3
trave 9	498	57	13.4	15.5	7.2	10.7	14.4	17.9	16.7
trave 10	478	51	16.3	12.9	7.2	12.6	18.0	23.1	13.8
trave 11	469	54	16.1	15.8	7.7	12.5	17.6	23.5	22.4
trave 12	449	54	16.8	19.7	7.6	12.7	17.8	22.4	21.6

Risultati delle due prove di penetrazione dinamica con il Pilodyn 6J e il Pilodyn 4JR e valori della massa volumica determinati sulla trave intera. In grassetto sono riportati i valori massimi per ogni colonna, in corsivo i valori minimi

5.2.2 Le prove ultrasoniche

5.2.2.1 Analisi in direzione longitudinale

La velocità

Le misure delle velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione longitudinale sono leggermente differenziate in funzione della posizione dei trasduttori.

I valori ottenuti con le sonde inserite sui lati, inclinate a 45° sulla superficie, hanno mostrato una maggior variabilità rispetto a quelli con i trasduttori sulle testate, paralleli all'asse longitudinale del segato. Sull'insieme delle misurazioni il coefficiente di variazione è risultato più che doppio per le sonde inclinate, mentre, sulle singole travi, gli stessi coefficienti si sono diversificati da una trave all'altra: in presenza di degradamento le misure sulle facce sono risultate maggiormente variabili rispetto a quelle sulle testate [$C.V.(E_{us,45})=5 \cdot C.V.(E_{us,0})$], mentre per le travi in buono stato la differenza si è dimostrata più piccola [$C.V.(E_{us,45}) \cong 1,8 \cdot C.V.(E_{us,0})$].

Questo ha indicato che la prova con le sonde inclinate è più sensibile alla presenza di difetti e di degradamento prevalentemente superficiali. Si è già scritto che non è possibile conoscere il percorso degli ultrasuoni, ma, dati i risultati ottenuti, si può pensare che in questa prova, ponendo i trasduttori in una zona superficiale, il treno di onde sia stato influenzato principalmente dalle caratteristiche della superficie del segato.

A conferma che i due tipi di prove sono sufficientemente diversi da essere distinti oltre che come esecuzione anche come risultati ottenibili, vi è la bassa correlazione tra i valori rilevati nei due modi. Il coefficiente di correlazione è risultato uguale a 0,77, indice di un'incerta corrispondenza tra i dati della prima prova e quelli della seconda.

Il modulo elastico dinamico

Una volta individuate le velocità di propagazione degli ultrasuoni si sono scelti i valori per il calcolo dei moduli d'elasticità. E' stato utilizzato il valore medio, per avere indicazioni sulle caratteristiche generali del materiale, il valore minimo, che ha caratterizzato le zone più deboli, e la media dei minimi, per evitare che la presenza di singolo valore molto basso deprimesse eccessivamente il modulo elastico dinamico della trave.

Le differenze che già sussistevano a livello di velocità sono state esaltate dall'inserimento della massa volumica ($E_d = v^2 \cdot d$), calcolata sull'intera trave.

Il primo elemento che è stato notato è la grande variabilità dei valori: con dodici dati si è avuto un coefficiente di variazione del 20%, un campo di variazione intorno agli 8000 N/mm² su un valore medio di circa 13000. Ciò è indice della notevole eterogeneità del materiale e della incertezza della misura.

Il modulo elasto-dinamico, ottenuto attraverso la misura del tempo di propagazione degli ultrasuoni in direzione longitudinale, è risultato insensibile alla presenza di tutte le fessurazioni, poiché evidentemente, non c'è soluzione di continuità lungo le fibre. Perciò le cinque travi cipollate hanno mostrato lo stesso modulo elastico medio dell'intero gruppo. E' stato invece influenzato dalla presenza di degradamento, infatti le tre travi con carie del legno più estesa (travi 6,7 e 11) hanno tutti i valori di E_{US} concentrati nella parte bassa del gruppo.

Lo smorzamento del treno di onde ultrasoniche

L'andamento dell'intensità del segnale ultrasonico in funzione della distanza dalla sonda emittente è stato rappresentato da una curva di tipo $y = ax^b$ (con $b < 0$), valida nel campo dei valori positivi, che ha per asintoti le rette $x=0$ e $y=0$.

I grafici hanno mostrato delle differenze notevoli tra le curve ottenute da materiale in ottimo stato e quelle su travi con degradamento.

Il confronto tra le curve ottenute è stato effettuato ottenendo due valori:

- risolvendo l'equazione in y , con il valore di $x=10$, trovando cioè quale intensità dell'onda si sarebbe misurata con la curva di attenuazione della trave, su un ipotetico provino, alla distanza di 10 m dalla sorgente delle onde;
- risolvendola in x , con $y=1$, individuando a quale distanza sulla trave l'accelerazione sarebbe stata uguale a 0,01 m/s² (=1mV).

E' stato notato però che i risultati di questa prova sono stati fortemente influenzati dai difetti presenti sulla superficie del legno quali degradamento, deviazione della fibratura, nodosità ecc. in quanto lo strumento sensibile (l'accelerometro), data la sua posizione, ha rilevato le onde di pressione in prossimità della superficie. Ciò è stato confermato dal fatto che in presenza di fessurazioni o di grandi deviazioni della fibratura in prossimità di nodi, si è pervenuti a rapide attenuazioni del segnale. Al contrario in presenza di degradamento interno (ad es. trave 11), la trasmissione di ultrasuoni lungo

la superficie non ha subito diminuzioni.

Il sistema sarebbe realizzabile sulle travi in opera poiché necessiterebbe solamente di una faccia libera. La possibilità che si riescano ad ottenere risultati significativi va però verificata con un campione più vasto e di materiale con dimensioni ridotte, per limitare le fonti di variabilità dei risultati (la dimensione e la ripartizione di difetti).

Dal punto di vista della praticità il sistema di prova con le sonde a 45° rispetto alla superficie del legno, si è dimostrato particolarmente comodo e di facile realizzazione su una trave in opera, perché consente di scegliere la posizione che meglio permette l'inserimento delle sonde, anche in presenza di spazi ridotti.

	massa volumica	Misure con gli ultrasuoni in direzione longitudinale					
		sonde parallele alla fibratura (valori medi)		sonde inclinate (valori medi)		attenuazione del segnale	
		velocità	$E_{us,0}$	velocità	$E_{us,45}$	acc. a 10 m dalla sonda emittente	distanza da sonda a cui $a=1 \text{ cm/sec}^2$
		[kg/m ³]	[m/sec]	[N/mm ²]	[m/sec]	[N/mm ²]	[cm/sec ²]
trave 1	480	5274	13341	5146	12701	0.080	2890
trave 2	483	5095	12279	5001	11829	0.069	2401
trave 3	516	5936	18194	6039	18829	0.548	6652
trave 4	464	5835	15782	5853	15880	0.924	9440
trave 5	487	5829	16534	5683	15720	0.398	5271
trave 6	505	5580	15722	4735	11319	0.273	4750
trave 7	464	5412	13592	5050	11833	<i>0.038</i>	2697
trave 8	513	5773	17107	5705	16708	0.423	5565
trave 9	498	5723	16322	5681	16083	0.066	2477
trave 10	478	5625	15118	5673	15378	0.339	5292
trave 11	469	<i>5039</i>	<i>11909</i>	<i>4377</i>	<i>8988</i>	0.104	3148
trave 12	449	5933	15799	5686	14510	0.131	3111

Risultati delle misure effettuate con gli ultrasuoni in direzione longitudinale. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

5.2.2.2 Analisi in direzione trasversale

Dalle misure di propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale sono stati calcolati:

- i valori medi, minimi, massimi e il campo di variazione delle velocità,
- i coefficienti di variazione dei suddetti valori, indici della omogeneità dei risultati lungo la trave,
- le "mappe" dell'andamento delle velocità nelle posizioni lungo la trave.

Le travi con un elevatissimo C.V. sono state quelle con presenza di abbondante carie del legno o con un'estesa cipollatura (travi 11, 6 e 1) la quale in alcuni tratti ha

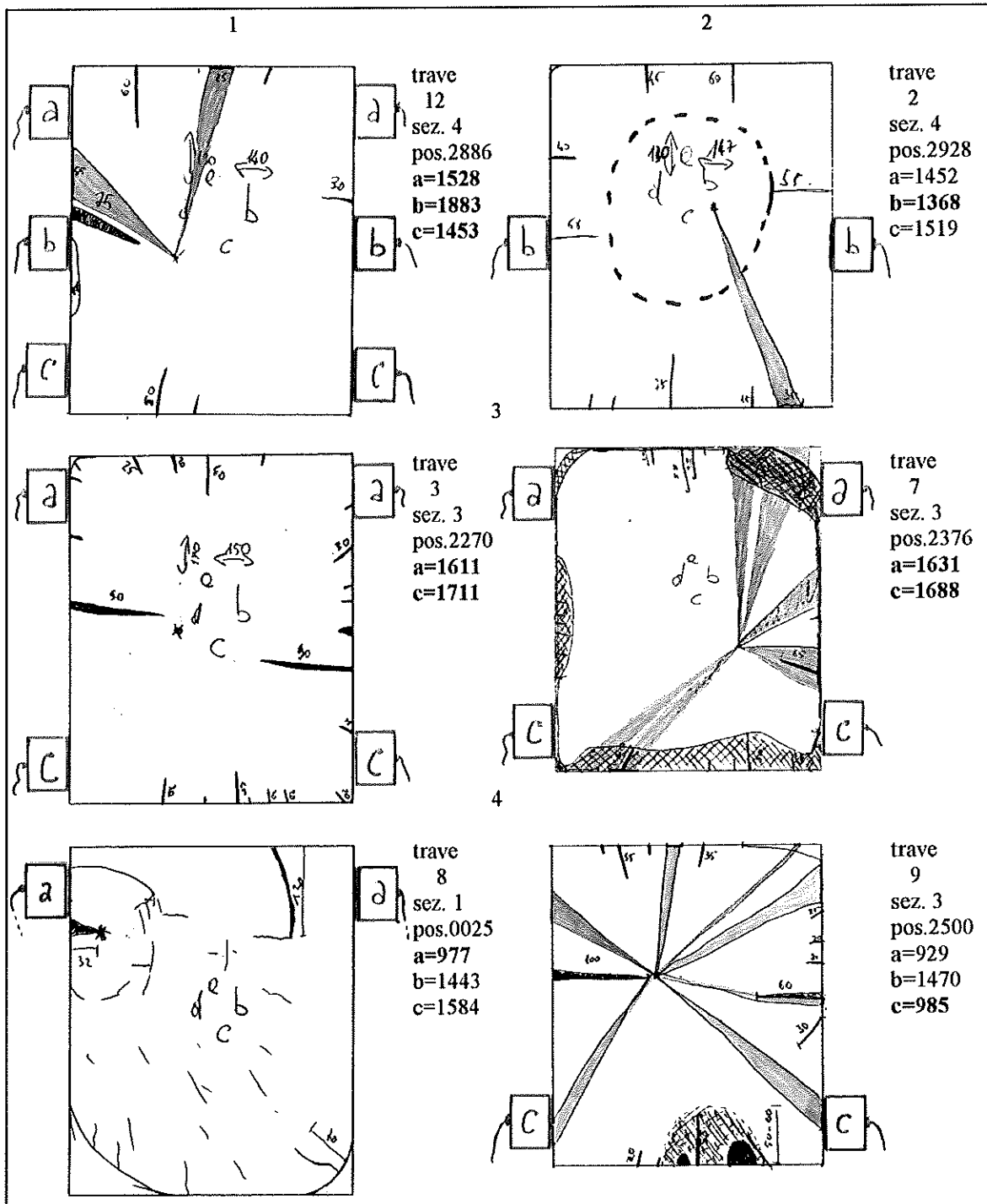


Figura 26 - Esempi di situazioni in cui la velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale ha fornito indicazioni discutibili (pos: è la posizione lungo il segato, in mm; i dati rilevati sono espressi in m/s):
 1) le velocità nei punti 'a' e 'c' sono inferiori del 20% rispetto a 'b', unico motivo possibile le fessurazioni da ritiro sulle facce A e C
 2) in questa sezione gli ultrasuoni non risultano sensibili alla presenza della cipollatura che nella trave 2 è estesa per tutto il segato
 3) le velocità delle due travi nei punti 'a' e 'c' sono alte e simili ma le condizioni del legno risultano ben diverse: la trave 7 presenta del degradamento sul lato C e sullo spigolo A-B, la trave 3 solo fessurazioni da ritiro
 4) le velocità delle due travi sono simili ma determinate da due problemi molto differenti: una cipollatura di limitata estensione e il degradamento

impedito completamente la trasmissione del segnale. Contemporaneamente la velocità media di propagazione degli ultrasuoni delle stesse travi è risultata la più piccola del gruppo.

Un comportamento differente si è verificato nella trave 2, in cui era presente una notevole cipollatura. Il motivo può essere attribuito allo stretto contatto tra le due superfici divise dalla cipollatura: il loro accostamento ha consentito la trasmissione degli ultrasuoni da parte a parte, ma ha rallentato ugualmente la velocità, infatti i valori medi sono risultati comunque tra i più bassi.

Tra tutti le travi un esito anomalo si è avuto per la numero 7 che, pur essendo caratterizzata dalla presenza di un esteso degradamento superficiale, è risultata quella con la velocità media più elevata ed un C.V. tra i più bassi. L'unica spiegazione a questa "anomalia" è la scarsa profondità della carie lungo l'elemento ligneo, che non ha effetto sui tempi di propagazione degli ultrasuoni all'interno.

Quest'ultimo punto, la propagazione degli ultrasuoni all'interno, poteva fornire un contributo all'ispezione visuale, perché gli ultrasuoni entrano nel legno e "sentono" ciò che noi non possiamo vedere dalla superficie. Invece in alcune travi è avvenuto il contrario: per spiegare i risultati delle prove, a volte si è dovuto ricorrere alle informazioni ottenute attraverso l'ispezione visuale. Infatti la presenza di cipollature e di profonde fessurazioni, ha impedito la normale propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale, ostacolandone completamente il passaggio in certi tratti. Perciò, per esempio, i risultati ottenuti esaminando una sezione di trave con del degradamento al centro erano del tutto assimilabili a quelli influenzati dalla presenza di una cipollatura. Oppure il "pericoloso" degradamento presente sull'estradosso provocava lo stesso risultato di una tanto profonda quanto innocua fessurazione da ritiro sulla stessa faccia.

I tipi di difetti evidenziati non hanno lo stesso effetto sulle caratteristiche di resistenza del materiale, per cui la difficoltà di trasmissione degli ultrasuoni deve essere valutata diversamente in base alle vere anomalie presenti su ogni trave.

Per questi risultati si può asserire che in molti dei punti in cui la velocità di propagazione è risultata alta (maggiore di 1600 m/s) si era in presenza di legno in buone condizioni mentre la situazione contraria non si è mostrata vera in assoluto: non è detto che a basse velocità corrispondesse legno poco resistente; i casi dubbi sono stati valutati con l'ausilio di altre prove o dell'ispezione visuale.

Si ritiene che questa considerazione conclusiva, benché non la si possa considerare valida in assoluto ma in termini probabilistici, sia estensibile a tutte le prove di trasmissione degli ultrasuoni in direzione trasversale, anche su travi in opera, a parità di specie legnosa; la sola differenza è data dai tempi medi di propagazione che, dipendendo anche dalla massa volumica, variano da elemento ad elemento.

5.2.3 Le prove vibrazionali

Con questa prova sono stati rilevati i primi tre modi di vibrazione libera longitudinale del materiale. I valori del primo modo variano da un massimo di 600 ad un minimo di 512 Hz.

Con la misura delle frequenze sono stati ottenuti tre moduli elastici dinamici (E_r , 1,2,3) per i primi tre modi. I valori relativi ai primi due modi sono risultati abbastanza simili tra loro mentre quelli calcolati con il terzo in qualche caso si sono dimostrati

leggermente diversi e meno costanti per le varie prove, a causa della difficoltà di rilevare la vibrazione per lo smorzamento molto più rapido di queste frequenze.

Gli E_{fr} sono risultati anch'essi ben ripartiti andando da circa 9000 a 14500 N/mm². Il coefficiente di variazione globale è circa del 16%.

Per questo modulo elastico valgono le stesse osservazioni fatte nel capitolo 5.2.2.1, relativamente ai moduli elastici dinamici determinati con il SYLVATEST. Infatti la sensibilità ai difetti più importanti si è dimostrata la stessa: scarsissima alla presenza di cipollature, ottima a quella del degradamento.

Perciò si può concludere che mentre il degradamento di una certa importanza ha un'influenza sulla vibrazione libera longitudinale delle travi, è possibile che le fessurazioni non abbiano alcun effetto di questo genere.

Probabilmente per evidenziare questo tipo di anomalie sarebbe stata più adatta l'oscillazione libera in direzione trasversale, che però, come si è scritto, soffre di altri problemi⁷.

Dal punto di vista pratico la prova di vibrazione libera in direzione longitudinale è di semplicissima esecuzione, ma presenta qualche problema sulla trave in opera per la difficoltà di registrazione della vibrazione, la quale si smorza molto rapidamente. Inoltre risulta piuttosto complicato trasmettere l'impulso alla trave nella direzione longitudinale nel caso in cui le testate non siano libere.

Lo smorzamento della vibrazione libera in direzione longitudinale

Il calcolo dello smorzamento con il sistema che analizza la vibrazione nel dominio del tempo dà risultati imprecisi quando la risposta registrata del provino contiene più di una frequenza (CHUI, 1989). In queste condizioni il metodo non tiene conto della presenza contemporanea di più frequenze e quindi non è in grado di selezionare lo smorzamento da misurare.

Nel caso in studio per la maggior parte delle travi sono risultate sempre presenti le altre frequenze di vibrazione, ma ad intensità molto inferiori rispetto alla fondamentale. Invece nelle travi con una notevole presenza di degradamento gli altri modi di vibrare sono "emersi" e hanno prodotto una risposta che è la somma di più vibrazioni. Perciò non tutti i dati ottenuti sono risultati affidabili. Il caso eclatante è quello della trave 11, che ha mostrato un valore particolarmente alto di smorzamento che si può spiegare proprio in base a quanto detto sopra.

Per verificare l'attendibilità del metodo sarebbe opportuno effettuare le stesse prove con gli strumenti atti a misurare lo smorzamento direttamente sullo spettro, nel dominio della frequenza. Infatti, attraverso la Trasformata di Fourier vengono distinte con precisione le diverse componenti della vibrazione e quindi può essere calcolato lo smorzamento di ognuna senza interferenze con le altre.

⁷ Teoricamente la vibrazione in direzione trasversale, perpendicolare cioè all'asse longitudinale del segato, dovrebbe essere più sensibile alla presenza delle cipollature e delle fessurazioni da ritiro (in prossimità dell'asse neutro), rispetto alla oscillazione effettivamente misurata. Infatti l'entità della deformazione a cui la trave è sottoposta vibrando trasversalmente, è influenzata anche dallo stato fessurativo, in quanto il momento d'inerzia della sezione risulta sicuramente inferiore rispetto ad una trave senza soluzioni di continuità.

	massa volumica kg/m ³	Misure di vibrazione libera				
		frequenza	E _{fr}	E _{fr}	E _{fr}	smorzamento
		1° modo	1° modo	2° modo	3° modo	1° modo
		Hz	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
trave 1	480	544	10425	10703	10524	0.480
trave 2	483	520	9266	8861	9675	0.455
trave 3	516	576	14578	14578	14599	0.740
trave 4	464	544	13286	13286	12960	0.495
trave 5	487	568	14051	13741	13517	0.430
trave 6	505	512	11826	11768	11865	0.680
trave 7	464	516	10087	9890	9760	0.420
trave 8	513	576	14488	14174	14070	0.450
trave 9	498	532	13082	13206	12184	0.390
trave 10	478	600	13220	13385	13073	0.500
trave 11	469	512	8719	8719	9327	3.210
trave 12	449	588	13001	13147	13339	0.350

Risultati delle misure di vibrazione libera. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

5.3 Le prove di carico

I risultati delle prove di flessione statica sono serviti per la determinazione dei valori di riferimento di elasticità. Poiché la rigidità (EJ) del materiale dipende anche dal valore del momento d'inerzia, esso è stato calcolato attraverso l'elaborazione dei dati riguardanti la misura delle sezioni.

Sono stati ricavati due gruppi di valori: il primo calcolato con le dimensioni intere delle sezioni, come rilevate in 4.1.1, il secondo calcolato con le stesse dimensioni, corrette in funzione del degradamento presente, stimato attraverso l'ispezione visuale (par. 4.1.4).

All'interno di ogni gruppo sono stati calcolati 5 momenti d'inerzia: un valore medio (nessun segno al piede dei simboli dei moduli elastici), il minimo (m), il massimo (M) sulla trave intera; il valore in mezzera (1/2) e quello medio (c), sul tratto centrale della trave. Per indicare i valori corretti in funzione del degradamento si è aggiunto un asterisco (*) al simbolo. La stessa suddivisione è stata ripetuta nel calcolo dei moduli di resistenza W, per differenziare i valori di MoR.

Per il primo gruppo le divergenze tra i cinque valori sono risultate molto modeste e dovute esclusivamente alla irregolarità della trave. Sono molto più importanti nel secondo gruppo poiché il degradamento poteva essere localizzato in alcune zone. Per esempio la sezione minima, in caso di presenza di degradamento, può essere risultata anche molto diversa da quella media. Anche concettualmente esistono diversità in quanto la posizione della sezione minima e massima può essere risultata lontana dal centro, in qualsiasi tratto della trave.

5.3.1 Flessione statica a carico unico centrale

La prova a carico unico centrale ha consentito di calcolare due moduli elastici. Il primo in base alla freccia assoluta misurata sulla mezzeria della trave (E_{app}), l'altro, mantenendo la stessa configurazione di prova, è stato calcolato per mezzo delle frecce relative misurate in corrispondenza dell'asse neutro, sui due bordi della trave ($E_{app,an}$).

Le due prove hanno dato risultati differenti sostanzialmente per la risposta deformativa della trave alla sollecitazione. Mentre sull'asse neutro la freccia di inflessione può essere stata alterata dalla presenza di alcuni difetti, la freccia misurata in mezzeria non ha risentito della loro presenza.

Durante la prova di carico la presenza di fessurazioni ha dato origine a delle asimmetrie nell'andamento della deformazione delle travi. Ad esempio nel grafico carico-deformazione della trave 4 è risultato un comportamento asimmetrico delle due frecce relative, misurate sulle due facce laterali della trave. La causa di questa asimmetria è stata attribuita ad una grande fessurazione presente solo sul lato B che, durante le operazioni di carico con il pressore centrale, si è parzialmente richiusa.

Questo problema si è avuto solo per questo tipo di misurazione e per la prova con il carico concentrato in mezzeria, a causa della sovrapposizione del punto di fissaggio del sistema di rilevamento della freccia, con il pressore di carico. Infatti, in prossimità degli appoggi e dei pressori, può essere individuata una zona limitata in cui sono presenti delle sollecitazioni di compressione trasversale (KEENAN, 1974), le quali si ritiene possano portare alla chiusura delle fessurazioni esistenti e quindi all'avvicinamento di una parte della trave rispetto all'altra. Perciò, in questa prova alcune delle frecce relative possono essere state falsate.

Modulo elastico a flessione statica, carico unico centrale					
(freccia assoluta misurata sull'intradosso)					
Trave n.	E_{app}	$E_{app,m}$	$E_{app,M}$	$E_{app,1/2}$	$E_{app,c}$
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	7063	7635	6139	7528	7365
2	6820	7549	6322	6537	6570
3	10919	11652	10252	11165	10919
4	8929	9483	8534	9483	9183
5	10405	10763	9972	10760	10598
6	7990	8553	7445	7902	8179
7	7689	8463	7307	7527	7485
8	11192	11900	10259	11338	11129
9	9782	10151	9354	10082	9938
10	11313	12221	10515	11526	11311
11	<i>6014</i>	<i>6424</i>	<i>5724</i>	<i>5897</i>	<i>5915</i>
12	8705	9253	8187	8745	9008

Valori del modulo elastico a flessione statica con carico unico centrale. La freccia utilizzata nella relazione è quella assoluta, misurata sull'intradosso a metà della lunghezza della trave. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

Modulo elastico a flessione statica, carico unico centrale					
(freccia relativa misurata sull'asse neutro)					
Trave n.	E_{app,an}	E_{app,an,m}	E_{app,an,M}	E_{app,an,1/2}	E_{app,an,c}
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	7405	8005	6437	7893	7722
2	7257	8032	6726	6956	6990
3	14694	15680	13796	15026	14695
4	10249	10885	9796	10885	10541
5	9483	9809	9088	9807	9658
6	9158	9803	8533	9058	9375
7	6909	7604	6566	6763	6725
8	10541	11209	9663	10680	10482
9	9267	9617	8862	9552	9415
10	10866	11738	10099	11070	10863
11	5072	5418	4828	4974	4989
12	7522	7996	7075	7556	7784

Valori del modulo elastico a flessione statica con carico unico centrale. La freccia utilizzata nella relazione è quella relativa, misurata lungo l'asse neutro. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

NB Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi. I valori di elasticità e resistenza sono stati ricavati utilizzando momenti d'inerzia e moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione: nessun segno al piede: valore medio di l sull'intera trave; m: valore minimo; M: valore massimo; 1/2: valore in mezzzeria; C: valore medio del tratto centrale della trave.

5.3.2 Flessione statica su quattro punti

La flessione statica con il carico ripartito su due pressori è il miglior indice per la valutazione del modulo d'elasticità del materiale.

Le risposte ottenute dalle travi sono risultate molto diversificate. I valori minimi, tutti intorno agli 8000 N/mm², sono stati ottenuti dalle travi 1, 2, 7 e 11.

I primi due risultati hanno dimostrato chiaramente che la presenza di una cipollatura intera, continua lungo tutta la trave, ha avuto un effetto rilevante sulle caratteristiche elastiche. Tale comportamento si può spiegare abbastanza semplicemente se si immagina che le travi siano nettamente divise in due parti: un nucleo centrale cilindrico e un parallelepipedo forato che lo contiene, con le superfici di separazione non aderenti e con gli assi neutri delle porzioni di trave non coincidenti. Allora l'inerzia dell'insieme risulta molto ridotta rispetto a quella della trave intera.

Le travi 7 ed 11 sono state evidentemente minate dagli attacchi fungini, la prima in particolare nella zona centrale, in corrispondenza del lembo teso, la seconda per un lungo tratto all'interno della sezione.

Il fatto che la trave 6, che pure aveva subito un notevole attacco da parte di funghi, abbia mostrato un MoE lievemente più alto (circa 10500 N/mm²) si può spiegare con la presenza di legno piuttosto buono in corrispondenza della base di misura della

freccia relativa. Durante la prova il guasto è rimasto esterno al tratto centrale, in prossimità del pressore di carico e ha avuto effetto solo sulla freccia assoluta.

Le travi 8, 4 e 5 hanno mostrato un modulo elastico superiore a 13000 N/mm² pur essendo tutte e tre segnate dalla presenza delle cipollature. Però, in questo caso le fessurazioni non erano continue e quindi le sollecitazioni sono state trasmesse da una zona all'altra della trave, consentendole di comportarsi come un corpo unico. Questo è vero all'interno del campo elastico, prima che le sollecitazioni diventino talmente elevate da risentire della mancanza della continuità tra alcune parti (di avere difficoltà a trasmettere le elevate tensioni in presenza di discontinuità all'interno del materiale).

La trave 3 ha confermato di avere delle ottime caratteristiche elastiche, come alcune prove non distruttive avevano indicato, grazie ad una massa volumica molto elevata (la più alta), una omogeneità della dimensione degli anelli ed alla buona distribuzione dei difetti.

Modulo elastico a flessione statica					
<i>(carico ripartito su due pressori)</i>					
Trave n.	E₀	E_{0,m}	E_{0,M}	E_{0,1/2}	E_{0,c}
	<i>[N/mm²]</i>	<i>[N/mm²]</i>	<i>[N/mm²]</i>	<i>[N/mm²]</i>	<i>[N/mm²]</i>
1	8689	9393	7554	9261	9061
2	8273	9157	7668	7929	7969
3	18266	19492	17150	18679	18267
4	13048	13858	12472	13858	13420
5	12906	13350	12369	13347	13145
6	10355	11084	9648	10241	10599
7	8102	8918	7700	7932	7887
8	14013	14900	12846	14197	13934
9	11747	12191	11234	12108	11935
10	12243	13226	11379	12473	12240
11	7104	7588	6761	6966	6987
12	11630	12363	10939	11684	12036

Valori del modulo elastico a flessione statica con carico ripartito su due punti. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

NB Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi. I valori di elasticità e resistenza sono stati ricavati utilizzando momenti d'inerzia e moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione: nessun segno al piede: valore medio di l sull'intera trave; m: valore minimo; M: valore massimo; 1/2: valore in mezzzeria; C: valore medio del tratto centrale della trave.

5.3.3 Calcolo del modulo di taglio G

I moduli di taglio sono risultati estremamente variabili andando da un minimo di 124 ad un massimo di 814 N/mm². I valori si sono mostrati piuttosto bassi, infatti il rapporto E₀ su G, che nella letteratura viene indicato mediamente intorno a 16, si è rivelato molto più alto, con una media di 35 e un massimo intorno a 80.

Utilizzando il modulo elastico apparente calcolato per mezzo della freccia misurata in mezzzeria (E_{m,app}) anziché E_{m,app,an}, i valori medi, i minimi ed il rapporto medio

E_v/G non cambiano.

I risultati possono solo far immaginare o che il metodo per calcolare G , quello che sostanzialmente confronta due moduli elastici, quello che comprende le deformazioni di taglio e quello netto, non è il più adatto per travi di tali dimensioni, oppure che le travi con grandi fessurazioni hanno effettivamente un modulo di scorrimento minore rispetto a quelle di piccole dimensioni, cioè a parità di tensione le deformazioni, rispetto alle travi piccole, sono maggiori.

In questo caso si può solo prendere atto di questi risultati e rimandare la risposta al problema della determinazione del modulo di taglio a ricerche specifiche più approfondite.

5.3.4 I valori di resistenza

Le travi sono state portate a rottura conducendo a termine la prova di flessione statica. Il comportamento di ogni trave durante la sequenza dei carichi è stato annotato meticolosamente per individuare i valori e le cause dei cedimenti.

In generale le travi hanno dato risultati interessanti, le rotture sono avvenute sempre con largo preavviso e a valori piuttosto alti.

Per procedere nell'analisi dei tipi di rotture e delle sollecitazioni a cui le travi hanno ceduto si è agito in due modi:

- in un primo momento si sono trascurate le modalità di rottura e si è considerato solo il carico massimo a cui la trave ha resistito, come se effettivamente si trattasse di un elemento ligneo facente parte di una struttura giunta al limite della sua resistenza;
- poi si è valutata attentamente la vera resistenza del legno che costituiva la trave. Si sono calcolati i valori reali di resistenza alla flessione ed al taglio, per comprendere a fondo il comportamento resistente del materiale componente gli elementi strutturali.

Entrambi i sistemi verranno utilizzati per avere dei termini di confronto con i risultati delle prove non distruttive e delle prove di carico.

5.3.4.1 Il Modulo di Rottura a flessione calcolato in base al valore massimo di resistenza

Il MoR calcolato sulla trave intera, con il valore di carico massimo raggiunto da ciascuna trave, ha mostrato un valore medio abbastanza alto.

Non si sono rilevate differenze sostanziali raggruppando diversamente le travi: estraendo dal valore medio i dati delle travi degradate (6, 7 e 11) si è ottenuto un incremento di soli 2 N/mm², togliendo quelli delle travi con le cipollature (1,2,4,5 e 8) la media è diminuita di 1 N/mm². Questo significa che i MoR, pur avendo un C.V. superiore al 25%, si sono distribuiti uniformemente sulle travi con i diversi difetti. Troviamo infatti i primi tre valori più bassi su travi con degradamento, e con la cipollatura, mentre tra i tre valori più alti si è inserito anche quello di una trave parzialmente cipollata.

Questa "uniformità" potrebbe indicare che le travi di bassa qualità del campione studiato arrivavano alla tensione massima di flessione quando le sollecitazioni di taglio erano ancora scarse, viceversa quelle molto buone superavano il valore limite di resi-

stenza per il taglio quando ancora le riserve di resistenza per la flessione erano elevate.

I valori dei moduli di resistenza, calcolati in base alle dimensioni delle sezioni residue, sono sembrati interessanti ma hanno dato anche qualche risultato discutibile.

E' il caso della trave 6 per la quale è stato ottenuto un MoR_m , esageratamente alto, a causa della stima della sezione residua con la quale si è sottovalutata la quantità di materiale resistente presente.

In generale però, le decurtazioni effettuate sulle dimensioni delle travi in funzione della presenza di degradamento non sono risultate troppo arrischiate: escludendo i valori del modulo di resistenza ottenuti attraverso la stima della sezione ridotta minima (W_m), che non hanno fornito gli esiti sperati soprattutto per la non coincidenza della sezione minima con quella di effettiva rottura, tutti gli altri risultati si sono dimostrati realistici e hanno offerto una spiegazione agli alti valori di resistenza ottenuti con alcune travi degradate, indicando come risposta la buona qualità della porzione di materiale non affetto da attacchi fungini.

Da questo si potrebbe desumere che eseguendo una stima della sezione residua nella maniera indicata nel presente lavoro si perviene a risultati attendibili che possono facilitare l'eventuale lavoro di chi si trova a valutare delle travi antiche e deteriorate. Ciò potrebbe risultare vero se le metodologie mostrate in questo lavoro trovassero un riscontro in prove effettuate con specie legnose diverse e con differenti gradi di degradamento.

	carico (massimo) kN	Sollecitazione di flessione			Sollecitazione di taglio	
		trave intera	trave parzializzata		sezione intera	sezione ridotta
		MoR	MoR max	MoR medio	τ	τ
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
trave 1	269.31	25.0	54.9	41.2	1.60	2.81
trave 2	309.86	28.0	42.7	38.3	1.85	3.36
trave 3	282.46	39.6	86.2	80.6	2.22	7.51
trave 4	214.98	25.8	55.5	45.5	1.43	3.43
trave 5	336.23	44.8	(44.8)	(44.8)	2.36	6.42
trave 6	211.14	33.9	(33.9)	(33.9)	1.68	2.27
trave 7	237.51	30.9	(30.9)	(30.9)	(1.72)	(4.73)
trave 8	328.54	47.0	99.5	69.1	2.63	7.81
trave 9	297.01	38.5	(38.5)	(38.5)	2.05	3.98
trave 10	289.35	29.4	61.7	56.6	1.40	5.26
trave 11	94.35	15.3	(15.3)	(15.3)	(0.80)	(2.08)
trave 12	140.73	30.1	66.4	58.3	1.16	2.43
media		32.36	52.53	46.08	1.74	4.34

Moduli di rottura calcolati sulle travi intere e sulle travi parzializzate; valori di resistenza a taglio calcolati considerando le sezioni intere e corrette per le fessurazioni. Per ogni colonna, in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo quelli minimi. Tra parentesi sono indicati i valori di tensione massima raggiunti per la sollecitazione di taglio, senza giungere alla rottura

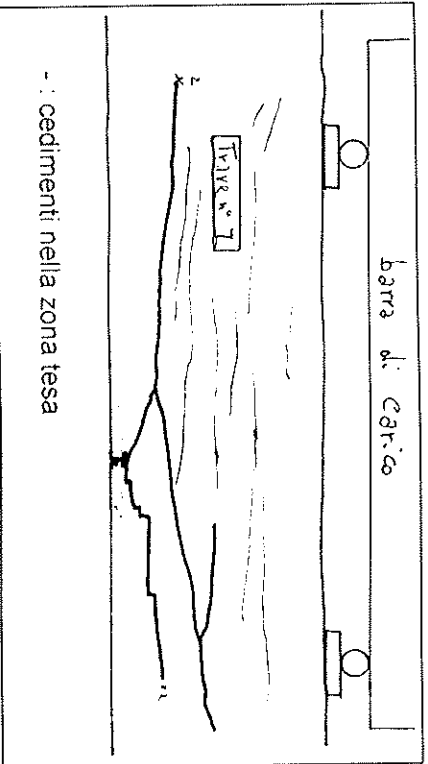
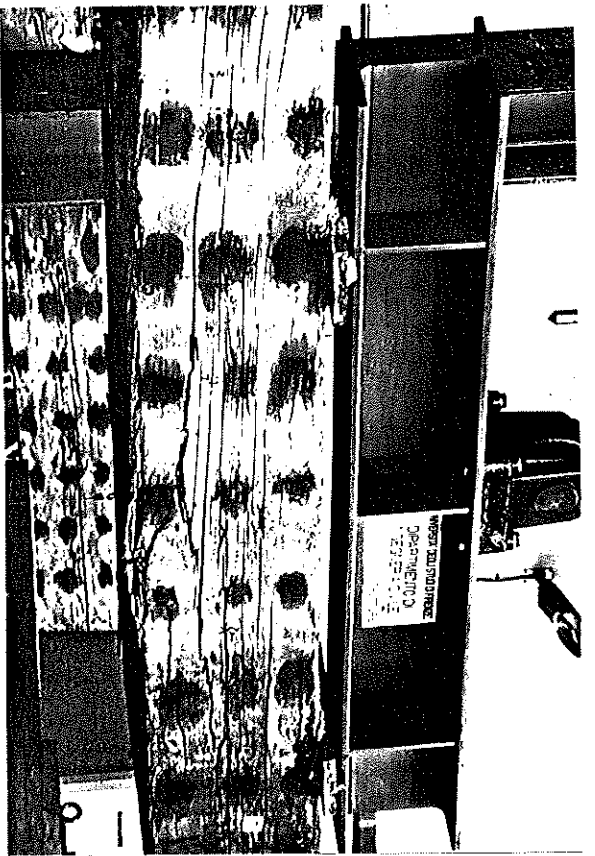


Figura 27 - Immagine e schematizzazione di un tipo di rottura nella prova a flessione statica: nella trave 7 ha ceduto fragilmente il lembo teso, lo schianto si è propagato rapidamente al resto del segato, le superfici di rottura sono poco compenetrato

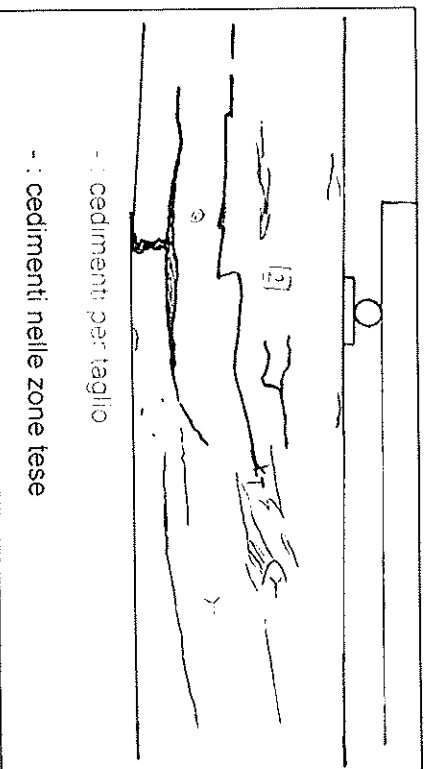
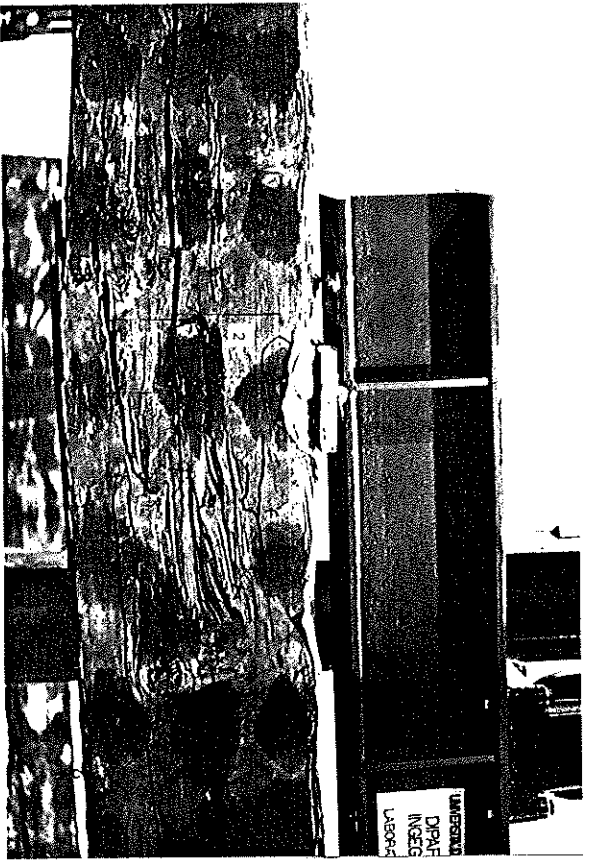


Figura 28 - Immagine e schematizzazione di un tipo di rottura nella prova a flessione statica: la trave 2, dopo il cedimento per taglio avvenuto in prossimità dell'asse neutro, ha subito delle rotture a trazione sui lembi tesi delle due porzioni di trave

5.3.4.2 Il Modulo di Rottura delle travi parzializzate

I MoR risultanti da queste elaborazioni dovrebbero mettere in evidenza le vere caratteristiche di resistenza a flessione del materiale oggetto di studio. In realtà alcuni dei valori che sono stati calcolati sono risultati esageratamente alti, quasi ai livelli di provini al netto di difetti, e ciò potrebbe essere un sintomo della incertezza nel calcolo dei moduli di resistenza delle travi parzializzate, o meglio delle semplificazioni necessarie per ottenere una stima delle vere dimensioni delle sezioni dopo la rottura a taglio.

Fatte queste dovute premesse, anche se i risultati potrebbero essere messi in discussione, il tentativo rimane comunque un approccio interessante per comprendere il comportamento di queste travi.

Considerando la media delle resistenze a flessione delle travi parzializzate si è ottenuto un valore superiore di circa il 25% rispetto a quello indicato nel precedente capitolo.

Questo potrebbe significare che se non fossero intervenuti i 7 cedimenti per taglio le travi sarebbero state in grado di reggere tensioni, a flessione, di tutto rispetto.

I valori più elevati sono stati ottenuti per le travi 3, 8, 10 e 12. La trave 8 in realtà non si è riuscita a rompere a flessione quindi i valori espressi sono quelli relativi alla massima tensione raggiunta dalle sue due porzioni.

Il MoR calcolato su parte della trave 3, che ha ceduto prima a taglio, è risultato molto alto rispetto agli altri valori. In questo caso è possibile che si avvicini di più al valore vero della resistenza visto che il materiale presentava caratteristiche ottime: anelli molto sottili, massa volumica elevata e un livello di difettosità piuttosto basso.

La numero 10 e la 12 invece, dopo aver ceduto per taglio, hanno retto ancora ad un carico più alto di quello della prima rottura.

I valori delle travi che si sono rotte direttamente per flessione non sono modificati rispetto a quanto mostrato nel capitolo precedente Il più basso è risultato ancora quello relativo alla trave 11 nella quale l'entità del degradamento aveva compromesso considerevolmente la resistenza. In generale le altre travi con degradamento non sono arrivate a carichi tali da subire la rottura per taglio.

In conclusione le travi del nostro campione, per le caratteristiche del legno di cui erano costituite, hanno mostrato di poter garantire ottime prestazioni meccaniche, per le sollecitazioni di flessione.

5.3.4.3 La resistenza a Taglio

I valori medi di resistenza al taglio sono stati calcolati supponendo che le travi fossero di sezione rettangolare regolare, costituite da materiale omogeneo, senza variazioni di massa volumica e senza difetti.

Con questa serie di approssimazioni si sono ottenuti dei valori piuttosto bassi, con una media di $1,7 \text{ N/mm}^2$. Ricordiamo che la resistenza media dell'Abete bianco per il taglio è di circa 5 N/mm^2 (GIORDANO, op.cit.).

Invece, analizzando le modalità di rottura per le sollecitazioni di taglio (come indicato nel par. 4.3.4.2), misurando l'entità delle fessurazioni e le sollecitazioni critiche lungo le sezioni, si sono ottenuti dei risultati più vicini a quelle che dovrebbero essere le prestazioni del materiale. E' stato ottenuto un valore medio di resistenza al taglio di circa

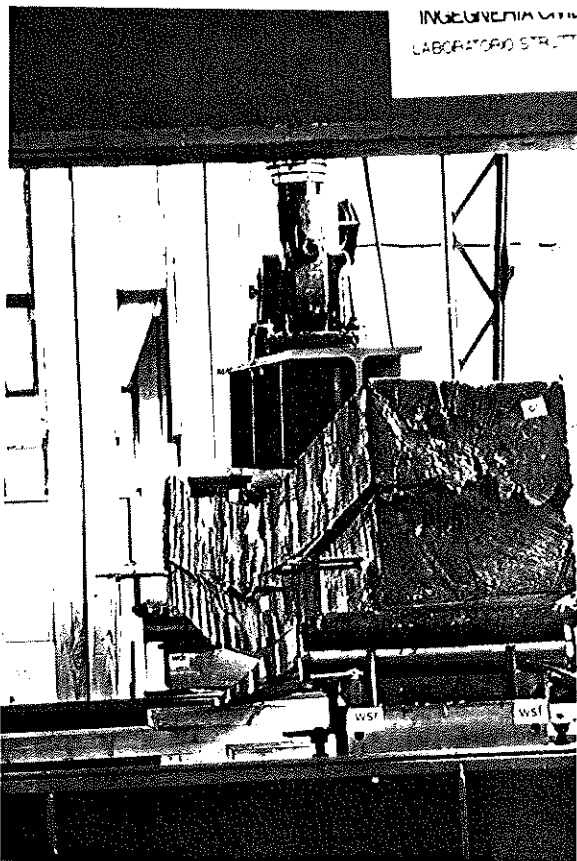
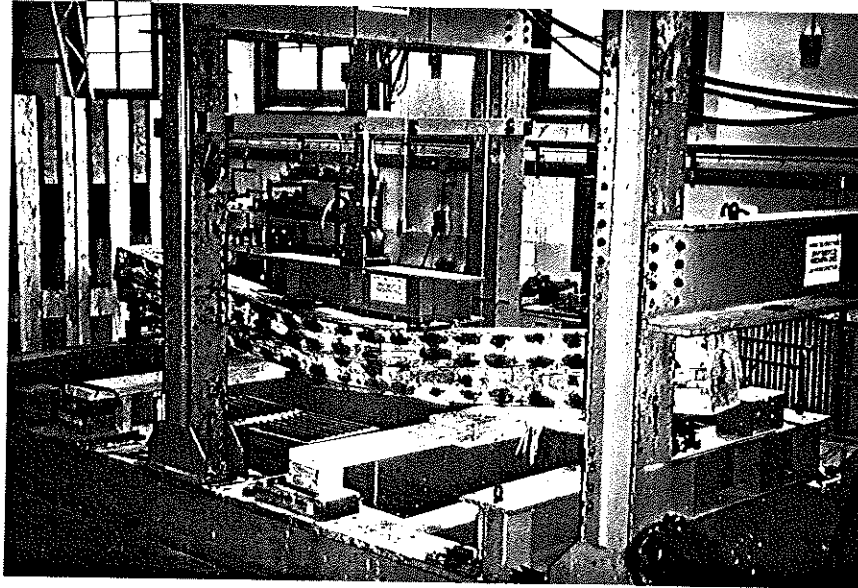


Figura 29 - Due delle travi rotte per il taglio: il cedimento nella trave 4 ha seguito alcune fessurazioni da ritiro e parte della cipollatura, nella trave 8 solamente una grande fessurazione da ritiro presente lungo tutto il lato D

4,8 N/mm², quasi 3 volte superiore a quello precedente.

Si deve tenere conto che non tutte le travi hanno raggiunto il limite di resistenza per la tensione tangenziale, in cinque travi è intervenuta prima la rottura per flessione. Ad esempio la trave 11 ha rivelato una τ uguale a 2.1 N/mm², il valore più piccolo del campione, perché la rottura per flessione è avvenuta ad un carico particolarmente basso; da ciò si può affermare solamente che la resistenza alla tensione tangenziale di quella trave è sicuramente superiore a 2,1 N/mm², ma non se ne può conoscere il valore preciso. Per questo motivo il vero valore medio per il nostro campione dovrebbe risultare più elevato.

I calcoli sull'andamento della sollecitazione e della resistenza a taglio sono comunque il risultato di una ulteriore semplificazione perché la misura della dimensione delle fessurazioni è stata rilevata su una sezione, mentre per avere una migliore approssimazione dei valori di resistenza, sarebbe stato più opportuno calcolare l'andamento delle fessurazioni in continuo lungo tutta la trave. In questo caso il rilevamento sarebbe risultato piuttosto lungo e complicato, il calcolo di esecuzione assai difficile.

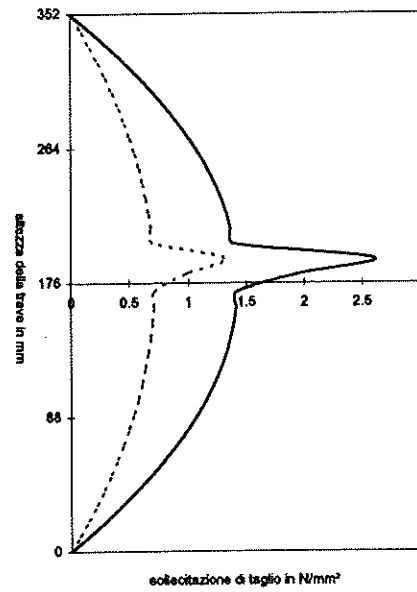
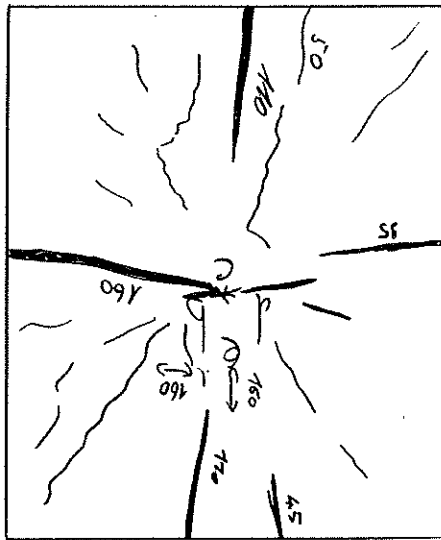
In ogni modo le informazioni ottenute possono essere una buona indicazione su quali siano i valori di resistenza al taglio che ci si può aspettare con materiale di questo genere.

In conclusione in base a questi risultati, di fronte al problema della valutazione della resistenza di travi antiche al taglio, si può fare affidamento sui valori medi di τ , tenendo ben presente però la dimensione e la posizione delle fessurazioni da ritiro in prossimità dei punti dove la tensione tangenziale è massima.

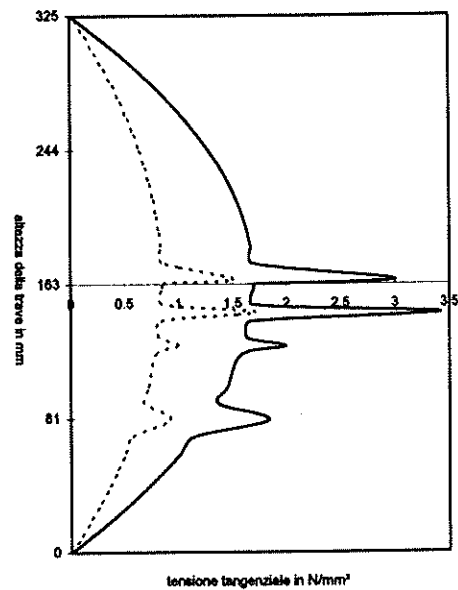
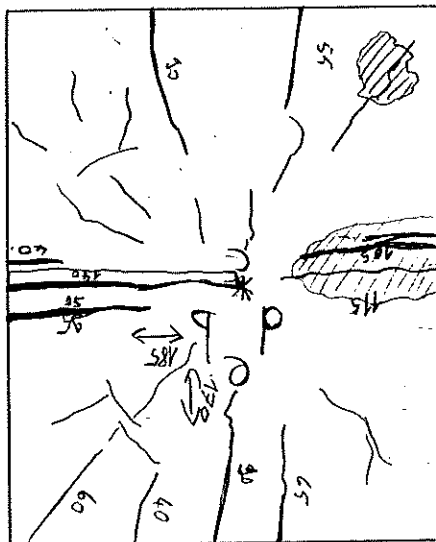
5.3.4.4 Considerazioni sulla resistenza del materiale

Osservando le modalità di rottura ed i valori di resistenza raggiunti si è considerato che le travi in questione, se adoperate come materiale per uso strutturale, avrebbero avuto un ottimo comportamento perché:

- hanno resistito a tensioni elevate: undici travi hanno raggiunto un valore di tensione superiore a 3 volte la tensione ammissibile a flessione delle travi di 3^a categoria di Abete bianco (GIORDANO, op.cit.); tra questi, cinque hanno raggiunto un valore superiore di tre volte quello della σ_{adm} della 1^a categoria dello stesso gruppo,
- delle tre travi con degradamento, che comunque non sarebbero mai state accettate come elementi da inserire in una struttura a causa dell'entità della carie, solo una ha ceduto ad un MoR basso che comunque era doppio del valore di tensione ammissibile della 3^a categoria, le altre due hanno resistito molto di più,
- hanno avuto tutte un comportamento "semi-duttile": al campo proporzionale, nel diagramma carico-deformazione, prima di arrivare alla rottura è seguito in 4 casi un tratto più o meno lungo più che proporzionale e in 7 casi si è arrivati addirittura a una o più riprese complete del carico raggiunto con la prima rottura, solo una trave non ha più ripreso il carico della prima rottura avvenuta in campo elastico,
- nell'eventualità di rotture per taglio la trave ha dato comunque molti preavvisi in forma di emissioni acustiche e piccoli cedimenti lungo le fessurazioni preesistenti,



Trave 10, sez. 5, pos. 4400



Trave 6, sez. B, pos. 4850

Figura 30a-Schematizzazione dell'andamento (teorico) delle sollecitazioni di taglio in prossimità delle fessurazioni da ritiro. Il diagramma è stato costruito supponendo il materiale omogeneo e i carichi distribuiti simmetricamente. La linea continua si riferisce ai valori di carico massimi raggiunti dalla trave durante la prova a flessione

- l'andamento delle rotture generalmente non è risultato di tipo fragile ed è stato determinato dal comportamento globale della trave: non è mai stato il singolo difetto localizzato a provocare la rottura ma ad ogni cedimento c'è stato un concorso del resto della trave al recupero di carico, sino al cedimento successivo. Il contrario di ciò che avviene normalmente nel materiale di più piccole dimensioni e nelle travi lamellari dove, una volta che è stato raggiunto il valore critico di resistenza di una determinata zona si giunge immediatamente al collasso.

5.4 L'analisi statistica

5.4.1 Le correlazioni

Un primo confronto tra tutti i dati disponibili è stato eseguito attraverso la verifica delle correlazioni esistenti. Sono state incrociate tutte le serie di valori riguardanti le prove meccaniche, i valori di resistenza, le prove non distruttive e alcune misurazioni ricavate nell'ispezione visuale.

Ogni parametro era costituito da una serie di dodici dati, uno per ogni trave. Per il confronto tra parametri con tale numerosità il valore minimo sotto il quale l'"r" (il coefficiente di correlazione) è sicuramente non significativo è 0,57.

Per schematizzare l'esposizione dei risultati di questi confronti i valori ottenuti sono stati divisi in quattro categorie:

- molto significativi ($r > 0,9$),
- abbastanza significativi ($0,8 < r < 0,9$),
- poco significativi ($0,6 < r < 0,8$),
- non significativi (n.s. $r < 0,6$).

Tutte le tabelle riportanti le correlazioni sono negli Allegati - parte V.

Correlazioni tra prove strumentali non distruttive e i moduli d'elasticità determinati con metodi statici

I risultati del confronto incrociato tra tutti questi valori sono apparsi molto positivi. I dati delle prove con gli ultrasuoni in direzione longitudinale hanno fornito valori di "r" vicini o superiori allo 0,9; quelli delle prove di vibrazione sono risultati superiori allo 0,9. Si conferma quindi la buona correlazione tra l'elasticità e i metodi non distruttivi dinamici, come indicato in letteratura.

Correlazioni con i valori dei MoR sulle travi intere

Gli unici parametri che hanno fornito delle buone correlazioni sono stati i dati relativi alla velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione longitudinale ($v_{l,0,min}$), e alcuni moduli elastici dinamici ($E_{us,0,min}$ e E_{fr}).

Mentre con la massa volumica le correlazioni sono risultate piuttosto deboli, inaspettatamente è stata rinvenuta una buona correlazione con i risultati di alcune prove con i Pilodyn. In particolare il Pilodyn 4JR ha consentito di ottenere valori di "r" anche superiori a 0,8.

In base a questi risultati si può affermare che il modulo di rottura sulle travi intere, che prescinde dalle modalità di rottura, non ha espresso le vere caratteristiche del materiale, evidenziate invece dai moduli elastici e attraverso le prove strumentali non distruttive. Le rotture per taglio hanno mascherato i veri valori di resistenza del materiale rendendo poco significative le correlazioni.

Correlazioni con i valori dei MoR sulle travi parzializzate

Sono molte le correlazioni con le prove non distruttive che sono risultate degne di interesse: le prove statiche in generale hanno fornito dei coefficienti intorno allo 0,8; alcune delle prove con gli ultrasuoni, usati in direzione longitudinale, hanno portato a "r" anche molto superiori a 0,8, in particolare v_{45° e $E_{us,45^\circ,min}$; pure la vibrazione libera longitudinale ha dato risultati più che positivi con una media degli "r" intorno allo 0,82.

La bontà delle correlazioni con i valori di elasticità ha dimostrato che il valore di resistenza delle travi parzializzate esprime meglio le caratteristiche di questo materiale. Se ne deduce che il tentativo di ricavare i valori del MoR per le porzioni di travi sia stato appropriato.

Valori scarsamente significativi sono stati ottenuti in tutte le correlazioni con il MoE e con il MoR in cui sono stati usati gli ultrasuoni in direzione trasversale, i dati della classificazione visuale (ad eccezione della massa volumica), i risultati dello smorzamento della vibrazione libera e i valori di attenuazione degli impulsi ultrasonici. Questo non significa che questi tipi di prove non distruttive siano inutili, ma che, per l'esperienza fatta, non possono essere utilizzate come meri strumenti per la selezione del materiale in base alla resistenza. Possono fornire però utili indicazioni a sostegno di altre prove e della ispezione visuale.

5.4.2 Le regressioni semplici

Attraverso il confronto incrociato dei dati è stato possibile scegliere le coppie di parametri meglio correlate tra di loro. Per queste coppie sono state elaborate le regressioni più adatte a spiegare la variazione di un parametro rispetto all'altro.

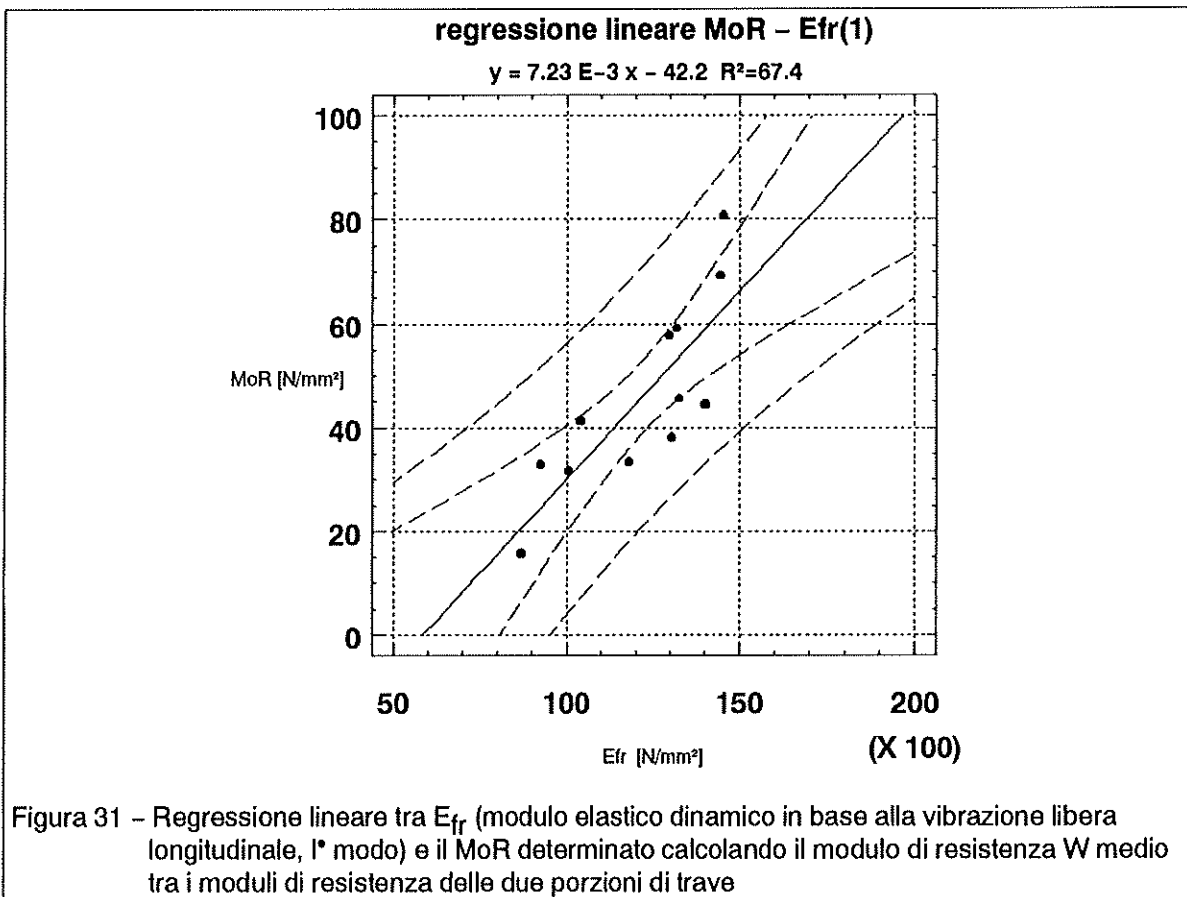
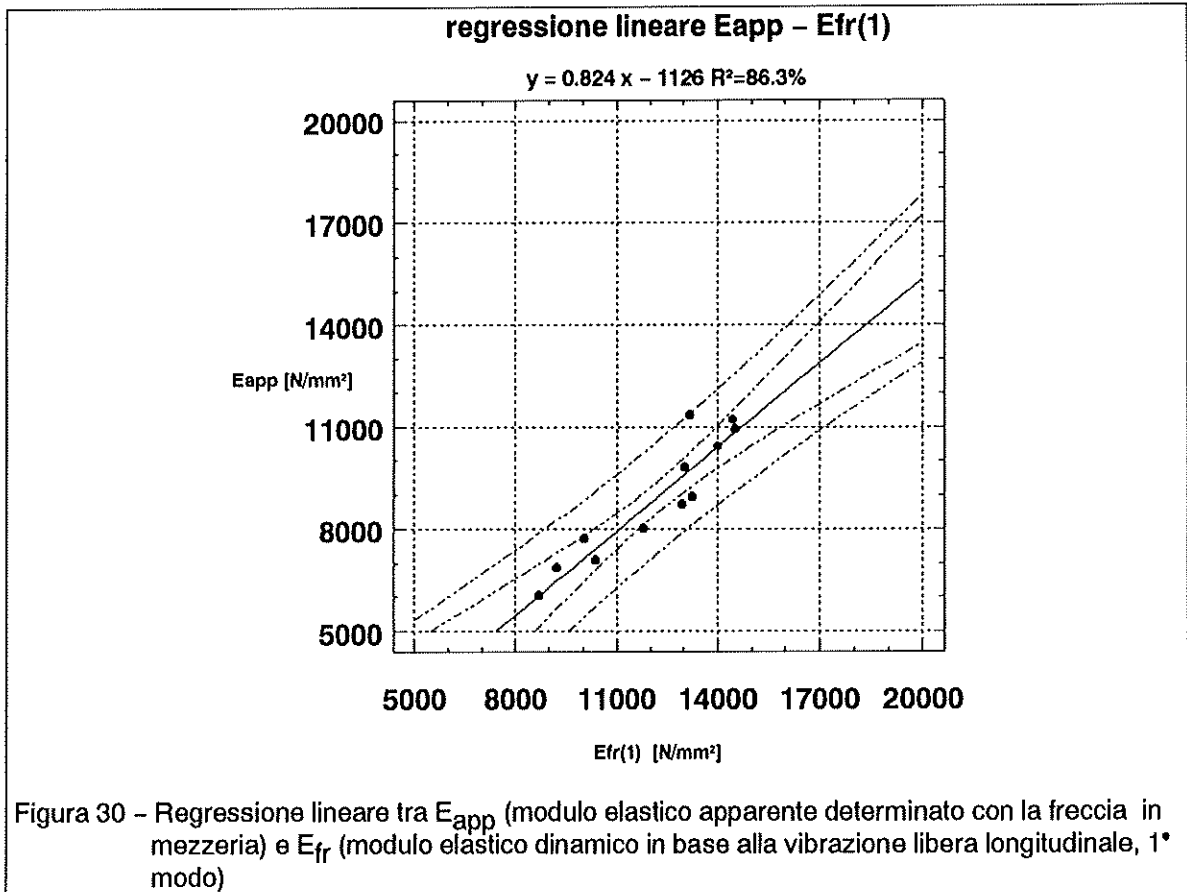
In particolare si è cercato di studiare quali dati delle caratteristiche fisiche e delle prove non distruttive sono utilizzabili per prevedere al meglio i valori di resistenza del materiale.

Le regressioni migliori sono risultate tutte di tipo lineare; i coefficienti di determinazione (R^2) delle regressioni lineari non hanno superato in nessun caso il valore dell'87%⁸.

Analizzando la distribuzione dei punti sui grafici x-y si è notato che anche nelle regressioni semplici migliori vi è stata una notevole dispersione dei dati. La piccola dimensione del campione sottoposto a prova implica che la posizione di ogni punto sperimentale della nuvola abbia un'influenza notevole sul risultato. La conseguenza è che l'affidabilità delle equazioni empiriche utilizzate è limitata al campione in studio e non è direttamente estensibile ad altre travi di altro materiale e di altra provenienza.

In conclusione questo significa che è stato possibile accertare la sensibilità di alcuni parametri rispetto alla variazione di altri, che è ragionevole utilizzare determinati tipi di prove per la previsione del comportamento meccanico degli elementi lignei. Nello stesso tempo i modelli utilizzati per spiegare queste variazioni non sono validi in assoluto ma limitatamente al materiale oggetto di studio. Per essere estesi e convalidati vanno perciò verificati aumentando le dimensioni del campione statistico ed eseguendo prove anche su campioni differenti per dimensioni, specie, provenienze ecc.

⁸ trattandosi di regressioni lineari, gli R^2 coincidono con il quadrato dei coefficienti di correlazione indicati nel capitolo precedente



I grafici e i dati di alcune regressioni sono riportati negli Allegati - parte V.

5.4.3 Le regressioni multiple

Se un parametro non distruttivo da solo ha consentito una certa previsione della resistenza del materiale, la combinazione di più parametri ha dato la possibilità di migliorare i risultati conseguibili.

L'elemento interessante è stato la possibilità di mettere assieme prove strumentali non distruttive che valutano aspetti diversi delle caratteristiche del materiale. Combinando i parametri che hanno stimato le qualità globali degli elementi lignei con altri che invece sono stati utilizzati per valutare le caratteristiche locali si sono ottenuti risultati positivi, come riportato anche da diversi autori su ricerche effettuate su materiale di sezione relativamente piccola (BLASS, GARD, 1994, CECCOTTI, NAKAI, TOGNI, 1994). Di fatto, nel nostro caso, è come se si fossero corretti i valori "medi" in base alle effettive caratteristiche locali della trave.

Come parametri locali sono stati usati

- la profondità di penetrazione del Pilodyn 6J (P6J),
- la profondità di penetrazione del Pilodyn 4JR (P4JR),
- la velocità degli ultrasuoni in direzione trasversale (v_t),

I parametri globali utilizzati sono stati

- la massa volumica (M.V.),
- la velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione longitudinale e i moduli elastici da essa ricavati (v_l , E_{us}),
- la frequenza di vibrazione libera longitudinale e i moduli elastici da essa ricavati (f_r , E_{fr}),
- i moduli elastici a flessione statica determinati nei diversi modi (E_0 , E_{app}).

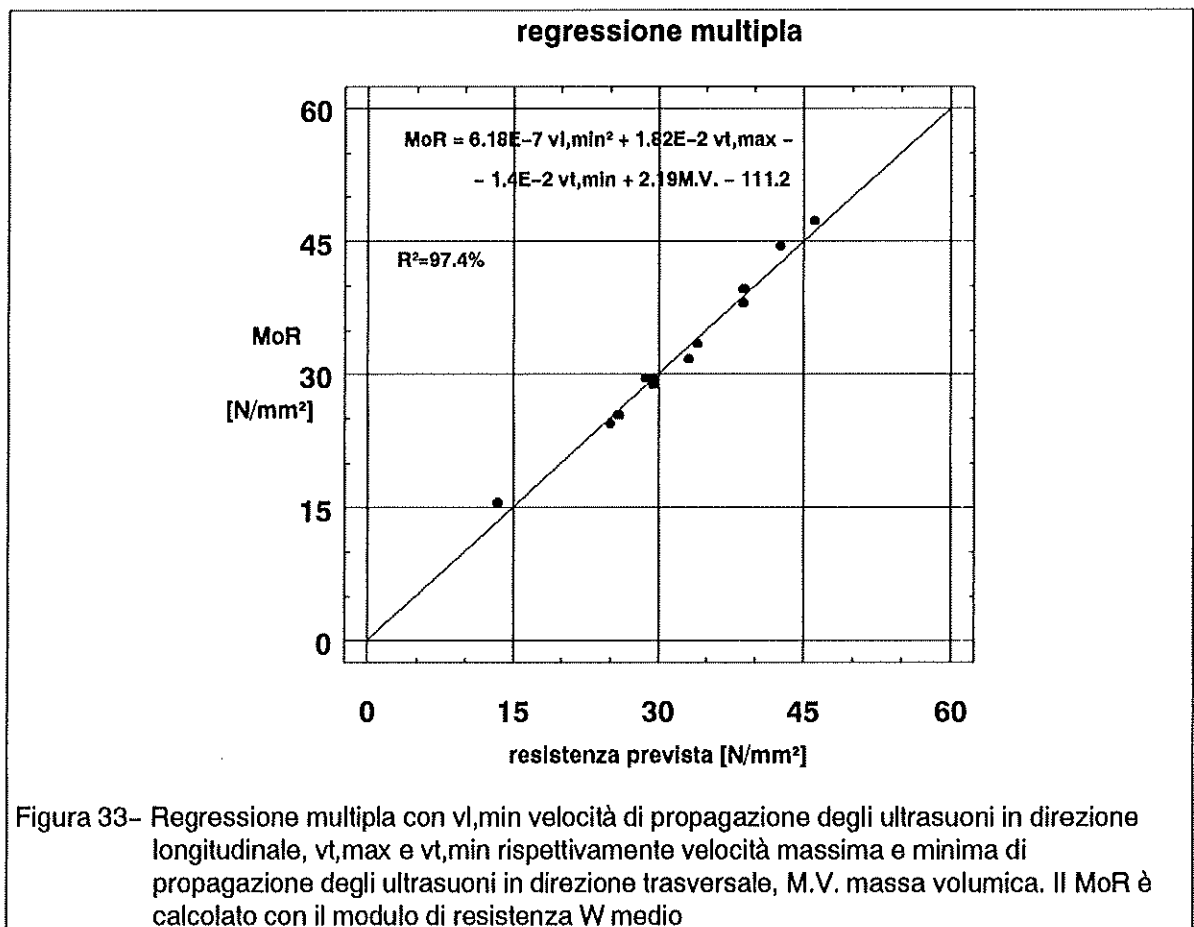
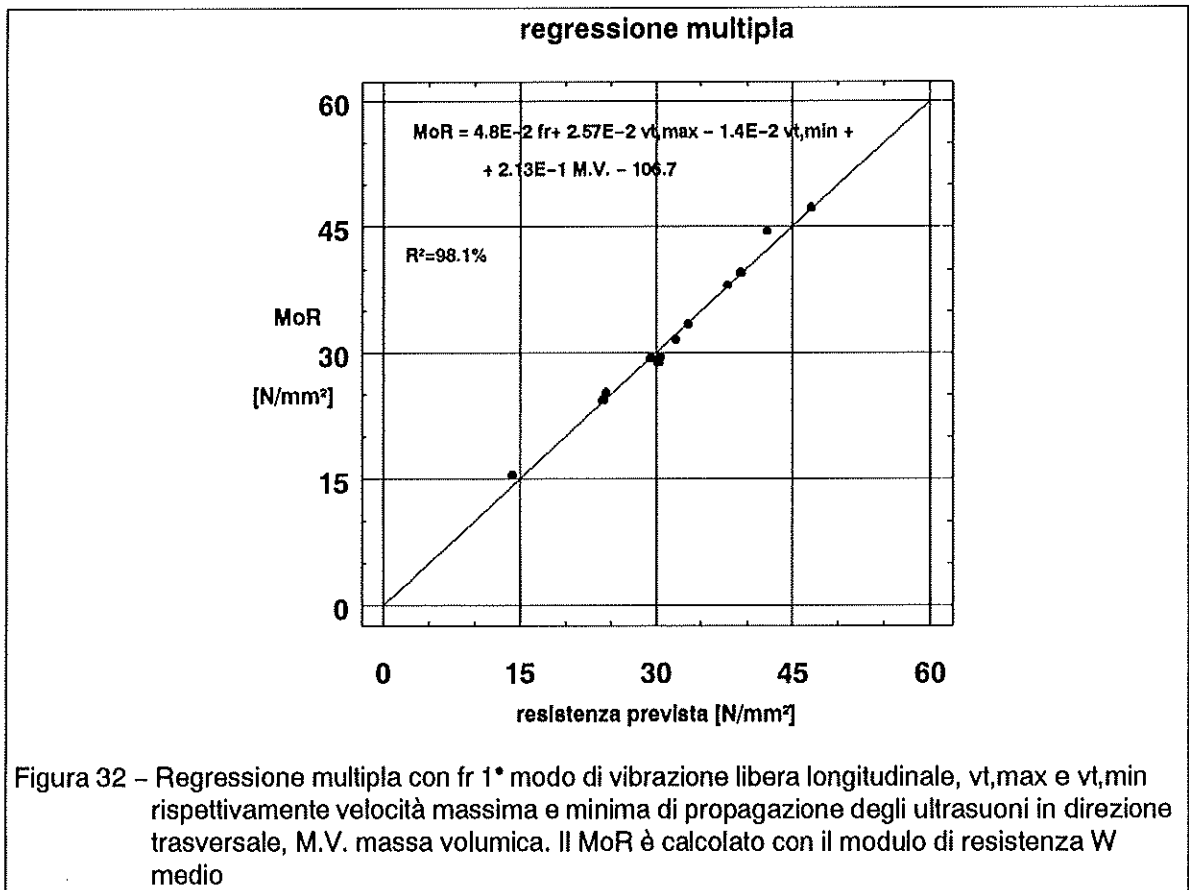
Sono stati costruiti modelli matematici su due o più valori tra quelli elencati. Evidentemente non sono state vagliate tutte le combinazioni possibili, che sarebbero risultate un numero spropositato, ma quelle con i dati che avevano già una certa correlazione con i valori di resistenza.

Confrontando i valori di R^2 , il livello di significatività della regressione e il livello di significatività delle singole variabili si sono scelte le otto migliori regressioni multiple in cui la resistenza "prevista", (o meglio "calcolata") era più vicina a quella del MoR (valore medio sulla trave intera) osservato.

Per queste si sono ottenuti $R^2 > 90\%$ e livelli di significatività molto alti. I grafici e i dati sono riportati negli Allegati - parte V.

5.4.4 Un modello matematico per il calcolo delle caratteristiche di resistenza?

Dai risultati emersi nel capitolo precedente è apparsa la possibilità di stimare le caratteristiche di resistenza del materiale attraverso la formulazione di modelli matematici che tengano conto di qualità locali e globali dell'elemento ligneo, determinate attraverso le prove non distruttive.



La combinazione di una velocità di propagazione longitudinale degli ultrasuoni ($v_{l,0}$) con un dato di profondità di infissione del Pilodyn ha permesso di ottenere un $R^2=89.8\%$. Con una velocità di propagazione longitudinale degli ultrasuoni ($v_{l,45}$), due velocità trasversali (v_{tmax} e v_{tmin}) e la massa volumica (M.V.) si è ottenuto un $R^2=97.4\%$. Con la frequenza di vibrazione libera (f_r), le velocità trasversali degli ultrasuoni (v_{tmax} e v_{tmin}) e la massa volumica (M.V.) si è ottenuto $R^2=98.1\%$.

Sono diverse le combinazioni che hanno indicato risultati positivi e questo significherebbe che su una trave in opera potrebbe essere sufficiente effettuare poche misure con gli ultrasuoni, per esempio nei punti stimati peggiori ed in quelli migliori (v_{tmax} e v_{tmin}), stimare la massa volumica e poche altre cose per prevedere con buona sicurezza la resistenza.

Pur notando che vi sono stati dei risultati piuttosto interessanti non si è così ottimisti perché il campione ha dimensioni molto piccole; ne risente l'affidabilità delle relazioni empiriche. Esse risultano avere una validità limitata al campione stesso. Dal lato pratico sarebbe necessario effettuare ulteriori prove su materiale simile per avere conferma delle relazioni ottenute; poter realizzare nuove prove su travi differenti sia per dimensioni, per specie che per "storia" per verificare l'estensibilità dei risultati conseguiti ad un campione più ampio.

Rimane l'indiscutibile indicazione che la combinazione di più parametri che valutano aspetti diversi delle caratteristiche delle travi può portare a risultati significativi.

6 CONCLUSIONI

Di fronte al recupero edilizio o all'adeguamento strutturale di edifici antichi la caratterizzazione delle travi lignee ai fini del loro reimpiego alimenta spesso forti dubbi anche negli addetti ai lavori.

Nel presente studio si sono affrontate alcune delle metodologie per la valutazione dello stato di "salute" del legno e per la stima delle caratteristiche di resistenza e di elasticità delle travi, con un'attenzione particolare ai metodi che meglio di altri possono essere impiegati sugli elementi in opera, in condizioni non sempre agevoli.

L'ispezione visuale, primo metodo considerato, è risultata indispensabile per prendere coscienza dei problemi e delle peculiarità degli elementi strutturali. I criteri di ispezione seguiti hanno condotto ad una buona conoscenza delle travi e delle sezioni resistenti residue. Tuttavia l'aspetto relativo alla stima di queste sezioni non ha fornito le risposte cercate, in quanto non è risultato sufficiente quantificare la presenza di degradamento per giustificare il comportamento meccanico delle travi. Tutto sommato la valutazione globale si è rivelata prudentiale; si può affermare che seguendo i passaggi indicati nel lavoro si sta dalla parte della sicurezza.

La classificazione visuale, in base alle norme indicate, non ha fornito risultati soddisfacenti. La modifica delle norme proposta, relativamente alla quantificazione e riconsiderazione del degradamento e delle fessurazioni da ritiro, le ha rese più adatte alla valutazione del materiale antico di grande sezione, consentendo comunque di rimanere abbondantemente dalla parte della sicurezza, infatti sono state scartate tutte le travi in cui vi erano degradamenti troppo diffusi e cipollature.

Il problema delle cipollature, assai importante nel campione studiato, è rimasto irrisolto. Una volta individuata la loro presenza, non si è stati in grado di indicarne l'incidenza sulle caratteristiche meccaniche a causa della impossibilità di stabilirne le dimensioni e l'influenza, anche con metodi non distruttivi. In generale, per le travature lignee, la cipollatura rimane comunque un problema relativamente modesto, legato soprattutto alla specie legnosa.

A conclusione di questo primo punto si deve aggiungere che nell'ispezione visuale permane una certa soggettività di giudizio e per questo risulta essenziale l'esperienza e la sensibilità del singolo operatore.

L'ispezione strumentale, secondo tipo di approccio per la valutazione del materiale, ha fornito risultati differenti da prova a prova.

I semplici esami con i Pilodyn hanno indicato l'esistenza di una correlazione con la massa volumica, ma queste relazioni empiriche vanno valutate con cautela in quanto per gli elementi di grandi sezioni intervengono alcune altre variabili (massa volumica esterna diversa da quella interna, presenza di attacchi di funghi e di insetti in superficie) che difficilmente si possono prendere in considerazione.

L'analisi con gli ultrasuoni nella direzione trasversale ha fornito delle indicazioni qualitative sullo stato del materiale, da valutare però volta per volta. Infatti non sempre alla presenza di difetti (degradamento e/o cipollature in particolare) si è riscontrata una risposta adeguata dello strumento, allo stesso modo, di fronte al legno in buone

condizioni, in qualche caso sono state rilevate velocità stranamente basse. Questo secondo caso si è verificato però più raramente, quindi, in linea di massima si può affermare che dove le prove non hanno indicato problemi (velocità elevate) il materiale era in buone condizioni, viceversa il caso contrario ha richiesto una più attenta verifica, cioè solo ad una parte dei "segnali d'allarme" ha corrisposto la presenza di marciume o di gravi difetti.

Gli ultrasuoni in direzione longitudinale hanno fornito interessanti correlazioni con le caratteristiche elastiche del materiale e qualche indicazione su alcuni valori di resistenza, però si sono rivelati poco sensibili alla presenza di alcuni difetti. La semplicità e la rapidità d'uso ne fanno uno strumento comodo e versatile. Si ricorda però che l'uso con le sonde inclinate su materiale in opera trascura completamente un'ampia porzione in prossimità delle testate, una zona fortemente a rischio negli edifici.

Le vibrazioni libere longitudinali, più adatte però a travi svincolate dalla struttura, hanno fornito correlazioni ugualmente interessanti. Anch'esse, considerando l'elemento nella sua globalità, hanno trascurato in parte i difetti particolari.

Le misure dell'attenuazione del segnale ultrasonico e dello smorzamento della vibrazione libera sono risultate poco significative. La prima perché i segnali sono stati troppo influenzati dalle caratteristiche locali del materiale (nodi, fessurazioni, deviazione locale della fibratura) che invece hanno pochissimo peso rispetto alla trave intera, la seconda per la difficoltà di ottenere un segnale "pulito"; il valore risultante è poi espressione delle caratteristiche globali della trave e si è allineato con la risposta delle travi alla vibrazione libera indicata sopra.

Da tutto ciò si deduce che non esiste al momento attuale una prova in grado di fornire la previsione statisticamente sicura di un valore di elasticità e di resistenza, oppure di indicare l'entità della sezione resistente su travi antiche di grande sezione. Si può giungere però a risultati interessanti mettendo assieme diversi tipi di esame, che prendono in considerazione aspetti differenti del materiale. Tutto ciò va poi letto ed interpretato in funzione dei risultati dell'ispezione visuale: infatti, ad alcuni risultati inaspettati delle prove strumentali è giunta una risposta grazie alle considerazioni fatte sui difetti e sulle caratteristiche tecnologiche delle travi, senza la quale qualche esito di test non distruttivo sarebbe stato travisato. Non vi è dubbio però che delle prove possano fornire un sostegno all'ispezione visuale, confermando, per esempio, la buona qualità del legno oppure i sospetti sulla presenza di difetti interni.

La formulazione di modelli matematici multiparametrici ha confermato poi quanto indicato sopra: l'idea di associare valori ottenuti da prove "locali" a parametri che valutano la trave nella sua totalità può dare buoni frutti nella previsione della resistenza, perché la qualità globale della trave viene temperata dalle caratteristiche locali. Però il fatto che la combinazione di alcuni metodi non distruttivi porti a risultati così incoraggianti deve essere valutato con ponderato entusiasmo. E' infatti necessario che le regressioni multiple presentate vengano verificate su altri campioni e con altre prove per poterne migliorare l'affidabilità statistica.

Il tipo di approccio "pluri-metodologico", visti i risultati conseguiti, si giudica sia il più corretto per proseguire nello studio di questo materiale.

Dal punto di vista meccanico le travi hanno rivelato di essere globalmente di buona qualità. La caratteristica che le ha accomunate è stata la "non fragilità": la tendenza delle travi a non rompersi istantaneamente una volta raggiunto il primo carico di rottura ma a resistere ancora. I cedimenti non si sono localizzati su sezioni ristrette ma hanno proceduto dal primo punto debole a quello successivo, ancora al successivo e così via, con continue riprese di carico. Quindi le travi non sono crollate a causa di un solo elemento critico, ma hanno ceduto in base alla presenza di un insieme di difetti e alla loro disposizione spaziale.

La scarsa snellezza delle travi, la presenza di fessurazioni a volte profonde, di cipollature molto estese ha fatto sì che il valore di resistenza per il taglio spesso fosse quello critico. Infatti elemento comune è stato la rottura per scorrimento longitudinale. Solitamente nelle strutture la dimensione degli elementi lignei è tale da non porre questo genere di problema, infatti normalmente il fattore limitante per la progettazione è il modulo elastico oppure la resistenza del materiale. Però, malgrado questo tipo di rottura abbia modificato gli esiti della gran parte delle prove, si è notato che la resistenza a flessione di travi parzialmente divise lungo l'asse neutro non è stata compromessa seriamente.

Le emissioni acustiche e a volte i veri e propri schianti, hanno sempre annunciato l'approssimarsi della rottura con largo anticipo.

I moduli elastici sono risultati notevolmente influenzati dalla presenza di cipollature continue e di degradamento molto diffuso, mentre non hanno risentito di altri difetti indicando dei valori in linea con i valori medi per l'Abete bianco indicati in letteratura.

Riassumendo, i vantaggi che presenta l'uso (o il riutilizzo) di materiale di grande sezione, antico, non pregiudicato dalla presenza di degradamento, possono essere così elencati:

- buone proprietà di resistenza e di elasticità, simili (se non superiori!) a quelle di materiale nuovo della stessa specie,
- distribuzione dei difetti tale da risultare improbabile che si venga a creare una sezione critica con un'alta concentrazione di anomalie,
- valore di resistenza determinato dalla continuità della presenza di materiale resistente lungo il segato e non da un punto debole unico (lo stesso concetto della distribuzione dei difetti visto dalla parte opposta) e quindi maggiore probabilità di avere delle prestazioni minime garantite,
- preavviso attraverso forti e numerose emissioni acustiche del raggiungimento di valori molto superiori al carico d'esercizio.

Questi risultati dovrebbero spingere la ricerca verso l'acquisizione di una mole maggiore di dati sperimentali su elementi lignei di grande sezione per verificare e consolidare le metodologie proposte nello studio, nonché per arrivare alla determinazione dei valori caratteristici del materiale di questo tipo, per ottenere i quali occorrono campioni più ampi.

BIBLIOGRAFIA

- Anthony R.W., Bodig J. (1989) *Non destructive evaluation on timber structures for reliable performance* - New Zealand Proceedings of the Second Pacific Timber Engineering Conference
- Arima T., Maruyama N.(1990) *Classification of log based on sound analysis and its application for grading laminae and drying process control* - Montreal I.U.F.R.O.
- Belluzzi O. (1941) *Scienza delle costruzioni*, Zanichelli, Bologna
- Blass H., Gard W., (1994) *Machine strength grading of timber* - Pacific Timber Engineering Conference Gold Coast Australia, 11-15 July
- Bonamini G., Ceccotti A., Montini E. (1990) *Indagini non distruttive per la verifica strutturale di travi di legno antico* - Univ. di Firenze,Atti della sezione strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, *Legno, materiale per l'ingegneria civile* n.16
- Bonamini G., Ceccotti A., Uzielli L., (1990) *Sulla valutazione della resistenza meccanica del legno antico* Atti del Congresso CTE su Tecnologia Edilizia in Evoluzione
- Bonamini G., Uzielli L., Zanuttini R., (1993) *Elementi di tecnologia del legno e utilizzazioni forestali* - Firenze
- Bucur (1979) *Le comportement a la rupture du bois massif étudié par la methode ultrasonique d'impulsion* - Nancy, Atti del 4^o Congresso Francese di Meccanica
- Ceccotti A., Nakai T., Togni M., (1994) *Strength grading of structural timber by non-destructive methods: a case study in Italy* - Proceedings of First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, 21-23 settembre
- Ceccotti A., Spinelli P.(1983) *Sul comportamento sotto carichi statici e dinamici di travi di legno lamellare incollato di Abete rosso e di Pioppo* - La Prefabbricazione n. 6, pp.401-416
- Ceccotti A., Uzielli L., (1989) *Sul grado di affidabilità strutturale sulle strutture in legno antiche* - Nardini, Firenze, Atti del 2^o Congresso Nazionale sul Restauro del Legno
- Chui Y.H., (1989) *Vibration testing of wood and wooden structures - pratical difficulties and possible sources of error* - NSERC Postdoctoral Fellow, Fredricton, New Brunswick, Canada
- 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 n.25 pp.125-134
- Chui Y.H., Smith I., (1989) *Quantifying damping in structural timber components* - New Zealand, Proceedings of the Second Pacific Timber Engineering Conference pp.57-60
- 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 n.24, pp. 233-245

- Divòs F., (1993) *Local densitometry by Gamma Back-scattering* - Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Madison, Wisconsin, USA
- Ehlbeck J., Görlacher R., (1987) *Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an altem Konstruktionsholz* - Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke pp. 235-247
- Erler K., (1989) *Zur Beurteilung der Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen (Assessing the load-bearing capacity of hystoric wooden structures)* - Holztechnologie vol. 30 n. 2 pp. 79-82
- Falk R.H., Moody R.C., (1989) *Inspection and evaluation of wood structures in North America - New Zealand*, Proceedings of the Second Pacific Timber Engineering Conference
- Falk R.H., Patton-Mallory M., McDonald K.A., (1988) *Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs* - Nondestructive testing and evaluation for manufacturing and construction: Proceedings of conference, 9-12 August, pp.137-147
- Facaoaru, Bucur, (1974) *Ultrasonics methods for investigating the poplar wood anisotropy* - Intervento al Simposio RILEM tenuto a Bucarest
- Gerhards C.C., (1980) *Effect of cross grain on stress waves in lumber* - USDA Forest Serv. Res. Pap., FPL 368, Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin
- Gerhards C.C., (1975) *Stress wave speed and MOE of Sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC* - Forest Products Journal vol. 25 n.4, pp.51-57
- Giordano G. (1983) *Tecnologia del legno: Le utilizzazioni industriali*, vol. 2, - U.T.E.T
- Giordano G., (1993) *Tecnica delle costruzioni in legno* Hoepli, Milano
- Görlacher R., (1986) *A dynamic method for determining elastic properties of wood* - Firenze Italy, I.U.F.R.O.
- Görlacher R., (1987) *Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein in situ-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte* - Holz als Roh- und Werkstoff n.45 pp. 273-278
- Görlacher R., (1991) *Bestimmung des Elastizitätsmoduls* - Bauen mit Holz
- Groom L., Polensek A., (1987) *Nondestructive prediction of load-deflection relations for lumber* - Wood and Fiber Science vol.19 n.3 pp.298-312
- Kaiserlik J.H., Pellerin R.F., (1977) *Stress Wave Attenuation as an indicator of lumber strength* Forest Products Journal vol.27 n.6, pp.39-43
- Keenan F.J., (1974) *Shear strength of wood beams* - Forest Products Journal vol.24 n.9, pp.63-70
- Kollmann F.F.P., Côté W.A., (1968) *Principles of wood science and technology* - Springer-Verlag, Berlin
- Kuipers J., (1986) *Effect of age and/or load on timber strength* - Firenze Proceedings of 19^o Meeting CIB-W18A

- Lanius R.M., (1982) *Evaluating residual strength and repair of structures* - New Haven
Structural uses of wood in adverse environments
- Lanius R.M., ASCE, Tichy R., Bulleit W.M.,(1981) *Strength of old wood joists*, - ASCE
Journal of structural division vol.107 n.12
- Madsen B., (1993) *Radiological density scanning - a portable gamma camera based on
back scatter tomography* - Madison, Wisconsin, USA, Proceedings of the 9th
International Symposium on Nondestructive Testing of Wood
- Madsen L.T. (1980) *The efficiency of visual and mechanical stress grading of Norway
Spruce timber, and the possibilities of improving the methods by means of the
Pilodyn instrument or additional annual ring width limits* - Paper presented at
the IUFRO Division, 5th Conference, Oxford
- Mantova P.,(1991) *Prove con due strumenti Pilodyn (6J e 4JR) per stimare la densità del
legno in segati di Douglasia e Pino laricio provenienti da popolamenti italiani* -
Università di Firenze, Tesi di laurea in Scienze Forestali, A.A.90-91
- Miller D.G., (1968) *Nondestructive testing of joist by vibrational technique* - Forest
Products Journal,vol. 18 n. 2, pp. 25-28
- Miller D.G., Tardif Y., (1967) *Development of a vibration grader and comparison of
vibration grading with visual and mechanical grading* - Canada, Forestry Branch,
Departmental Publication n.1208
- Nakai T., Tanaka T., (1988) *Non-destructive test by frequency of full size timber for
grading* Proceedings of CIB-W18A, 24-27 September
- Nakai T., Tanaka T., Nagao H., (1989) *Fundamental vibration frequency as a parameter
for grading sawn timber* - Proceedings of CIB-W18A, 25-28 September
- Nakai T., Tanaka T., Nagao H., (1990) *Comparison of non-destructive tests por
measuring modulus of elasticity as a parameter for grading sawn timber* - Tokyo,
International Timber Engineering Conference
- Ohlsson S., Perstorper M., (1992) *Elastic wood properties from dynamic tests and
computer modeling* - Journal of Structural Engineering vol. 118 n. 10, pp.2677-
2690
- Palaia *et al.*, (1993) *Using ultrasonic waves for the detection of timber decay in old
buildings* - Madison, Wisconsin, USA, Proceedings of the 9th International
Symposium on Nondestructive Testing of Wood
- Patton-Mallory M., De Groot R.C. (1989) *Acousto-ultrasonics for evaluating decayed
wood products* - New Zealand, Proceedings of the Second Pacific Timber
Engineering Conference
- Pellerin R.F., (1989) *Inspection of wood structures for decay using stress waves* - New
Zealand, Proceedings of the Second Pacific Timber Engineering Conference
- Perstorper M., (1993) *Dynamic modal tests of timber-evaluation according to Euler and
Timoshenko theory* - Madison, USA, 9th International Symposium on
Nondestructive Testing of Wood

- Regic, Srpcic, (1988) *Correlation between static and dynamic MOE of softwood at various moisture conditions* - Bordeaux, Colloque Scientifique European
- Ross R.J., Pellerin R.F., (1991) *NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber* - Forest Products Journal vol. 41 n. 6, pp. 57-59
- Ross R.J., Pellerin R.F., (1991) *Nondestructive testing for assessing wood members in structures* - Forest Product Laboratory, General Technical Report
- Rug W., Seeman A., (1991) *Strength of old timber* - Building Research and Information, vol. 19, n. 1
- Sandoz J.L., (1989) *Grading of construction timber by ultrasound* - Wood Science and Technology n. 23, pp. 95-108
- Sandoz J.L., (1991) *Nondestructive evaluation of building timber by ultrasound* - Vancouver, Washington, Proceedings of 8th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood
- Scribano R., (1986) *Classificazione secondo la resistenza dei segati di Abete bianco (Abies alba) del Casentino, provenienti da diradamenti: prove sperimentali* - Università di Firenze, Tesi di laurea in Scienze Forestali A.A. 85-86
- Serabian S., (1968) *Implications of the attenuation - produced pulse distortion upon the ultrasonic method of nondestructive testing* - Materials Evaluation, september, pp. 173-179
- Steck G., Görlacher R., (1986) *Methoden der zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Prüfung von Bauholz - eine Literaturlauswertung* - Karlsruhe, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke pp.191-210
- Suter T.G., (1982) *Evaluation of in situ strength of aged timber beams* - Ottawa, Canada, Structural uses of wood in adverse environments
- Turrini G.C., Piazza M. (1983) *Una tecnica di recupero statico dei solai di legno* - Recuperare n. 5 pp. 224-237
- Uzielli L., (1992) *Valutazione della capacità portante degli elementi strutturali lignei* - L'Edilizia n. 12 753-761

NORME CITATE NEL TESTO

- DIN 4074 - 1989 Parte 1, *Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit - Nadel schnittholz*
- prEN 384 (marzo 94) - *Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density*
- UNI - ISO 8375 (prEN 408) - *Strutture di legno - Legno massiccio in dimensioni d'uso strutturale - Determinazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche*
- UNI 8198 - *Segati di conifere - Classificazione in base alla resistenza meccanica*

RINGRAZIAMENTI

Lo svolgimento di questo lavoro è stato possibile grazie alla preziosa collaborazione di molte persone.

Per questo si ringraziano l'impresa Pontello, ed in particolare l'Ing. Giuseppe Fabiani, per avere gentilmente fornito il materiale oggetto della ricerca, il prof. Andrea Chiarugi per essersi interessato al problema, il prof. Ario Ceccotti e il prof. Luca Uzielli per la loro assistenza scientifica e per aver procurato molte occasioni di riflessione, il dott. Gabriele Bonamini e il dott. Marco Fioravanti per i suggerimenti sia in fase di esecuzione delle prove che di elaborazione dati, le persone afferenti all'Istituto di Assestamento e Tecnologia Forestale per la loro collaborazione. Un ringraziamento speciale va all'ospitalità del Laboratorio Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile della Facoltà di Ingegneria: ai tecnici Franco Bruni, Romero Mafucci e, in particolare, al direttore del laboratorio Saverio Giordano per le soluzioni proposte ai problemi presentatisi, per l'efficienza dimostrata e soprattutto per i preziosi consigli, frutto di una lunga esperienza nel campo delle prove di laboratorio.

ALLEGATI – PARTE I

Ispezione visuale

- descrizione delle travi
- selezione in categorie

Descrizione dettagliata dei provini e classificazione visuale¹

Trave 1

La prima trave mostra pochi nodi di dimensioni irrilevanti. La fibratura mediamente poco inclinata su tre lati, presenta una notevole pendenza sulla faccia D. In corrispondenza di una estremità su tutte e quattro le facce (sull'albero in piedi sarebbe stato in prossimità del piede) si trova una variazione brusca dell'inclinazione, che arriva ad un massimo di circa 40°. Nelle cerchie annuali sono presenti i segni di alterazioni nel ritmo di accrescimento dell'albero: l'ampiezza media degli anelli di accrescimento è di circa 1 mm ma sulle testate sono evidenti due gruppi distinti di anelli, uno verso l'interno con ampiezza media di 0,5 mm, uno verso l'esterno che supera gli 1,8 mm/anello. In corrispondenza della brusca variazione delle caratteristiche tra le due zone si sono aperte alcune cipollature, una delle quali ad anello, definita nell'Abete bianco "Girello" o "Difetto del palo". Questo tipo di cipollatura, sul punto di discontinuità nel ritmo di crescita dell'albero, segue tutta la trave da testata a testata.

Il legno non presenta segni di carie o di attacchi di insetti.

Le tre norme considerate scartano il segato a causa della presenza della cipollatura. Inoltre la norma UNI 8198 lo scarta anche per la deviazione della fibratura.

Trave 2

I provini n.1 e 2 sono le due metà dalla stessa trave. In questa i nodi, a differenza della n.1, sono molti e di grosse dimensioni. La fibratura è quasi diritta e presenta forti deviazioni solo presso i grossi nodi al centro della trave. Gli anelli sono suddivisibili in due gruppi: la corona circolare esterna con 1,5 mm per anello, il cerchio all'interno con un'ampiezza media di 0,6 mm. Anche in questo caso è presente il difetto del palo: la cipollatura percorre tutta la trave da testata a testata.

Del degradamento biologico è visibile su una estremità e il suo contorno è delimitato dalla cipollatura, segno evidente che a causa di un evento traumatico è stato troncato il cimale, quando l'albero era in piedi, consentendo l'ingresso agli xilofagi, sia funghi che insetti. Probabilmente fu proprio in concomitanza con quell'evento che si ebbe la liberazione della chioma, l'eliminazione della concorrenza (se per opera dell'uomo o di eventi meteorici non è possibile saperlo) e il conseguente rapido sviluppo della pianta.

Anche questa trave è stata scartata dalle tre classificazioni per la presenza della cipollatura, mentre sarebbe stata comunque scartata dalla classificazione Giordano per la dimensione di un gruppo di nodi.

Trave 3

I nodi sono di dimensioni medie, uniformemente distribuiti su tre facce, assenti sulla A. La fibratura è poco inclinata. Gli anelli sono di dimensioni uniformi su tutta la sezione, di ampiezza uguale a 1,5 mm. Grandi fessurazioni si aprono su tutti i lati; nella mezzeria la presenza di due profonde fenditure lungo l'asse neutro, divide la trave in due parti, che rimangono unite per un tratto continuo di legno largo un terzo della larghezza della sezione.

E' presente della carie del legno sulla faccia C, a metà della lunghezza, in superficie. Una testata appare molto degradata per i primi 3 cm, presumibilmente a causa

¹ Nell'attribuzione alle categorie di appartenenza non è stata presa in considerazione la presenza delle fessurazioni da ritiro, elemento comune a tutte le travi, perché non la si considera un difetto che influisce sulle caratteristiche di resistenza a flessione

dell'esposizione ad agenti atmosferici (sole e pioggia). Ma questo non ha influenza ai fini della resistenza per la sua modesta estensione.

E' però il degradamento del legno il fattore limitante per le tre classificazioni considerate: tutte escludono il provino da qualsiasi categoria.

Trave 4

Il provino numero 4 presenta nodi molto piccoli sulle facce B e C, e superfici nette sulle altre due facce. La fibratura è praticamente dritta. Le fessurazioni sono poco profonde su tutta la trave ad esclusione del lato D dove sono larghe e si approfondiscono sino al midollo. Gli anelli sono larghi mediamente poco più di 1,2 mm. Sulla superficie B, nel tratto centrale, affiora una cipollatura; essa risulta visibile anche attraverso le fessurazioni da ritiro aperte sullo stesso lato. Lo stesso difetto è presente su parte di un anello, su entrambe le sezioni agli estremi, da cui si conclude che la cipollatura coinvolge la trave per intero.

Il degradamento è presente solo in piccolissima percentuale in corrispondenza della estremità con la sigla.

Anche questa trave è esclusa da qualsiasi categoria a causa della cipollatura.

Trave 5

I nodi sono quasi assenti sui lati C e D, di piccole dimensioni sugli altri due. La fibratura è dritta. L'ampiezza media degli anelli inferiore al millimetro. La direzione del midollo è inclinata rispetto all'asse longitudinale del segato e la sua posizione non è al centro della sezione. Sono presenti alcune cipollature su anelli a distanze diverse dal midollo, affioranti sulle facce B, C e D della trave per lunghi tratti. Alcune cipollature sono visibili anche sulle estremità, per cui si può affermare che tutta la trave è affetta da questo difetto.

Un esteso degradamento è visibile su un quarto della trave in corrispondenza di una estremità, sulla faccia C e in parte della B. L'attacco di carie del legno è presente però solo in superficie; si approfondisce di pochi millimetri in più in prossimità delle fessurazioni sul lato C.

La carie e le cipollature escludono questa trave da qualsiasi categoria delle classificazioni a vista.

Trave 6

La trave contiene grossi nodi raccolti per lo più in verticilli, il maggiore dei quali si trova in prossimità dell'estremo con la sigla. Sono presenti profonde fessurazioni; su due spigoli nella mezzeria un tratto di superficie lesionata è ricoperta da callo di cicatrizzazione.

L'elemento che maggiormente caratterizza questo provino è la notevole percentuale di superficie attaccata dai funghi e in seguito anche dagli insetti, lungo tutto l'estradosso e in buona parte sulle facce laterali. Sulla faccia C, ai due terzi della lunghezza l'attacco della carie è progredito a tal punto da lasciare un vuoto che riduce fortemente la sezione resistente in quel punto. Verso l'altra estremità, al centro della faccia B, che esternamente si presenta in buono stato, il legno risulta molto indebolito all'interno. Infatti la resistenza alla penetrazione del succhiello è minima sino alla profondità di qualche centimetro. La stessa situazione si verifica all'altra estremità sulla faccia D.

Evidentemente la presenza di carie del legno in queste quantità rende il provino inaccettabile per qualsiasi norma di classificazione.

Trave 7

In questa trave sono presenti molti nodi, di differenti dimensioni, distribuiti prevalentemente sulle facce A, B e C. Il gruppo di nodi più importante è stato rilevato esattamente sulla mezzeria della trave mentre il nodo singolo di maggiori dimensioni si trova presso l'estremità opposta a quella con l'origine. Le fessurazioni da ritiro più grandi decorrono lungo la faccia B dove si approfondiscono sino al midollo.

Anche in questa trave il degradamento del legno è il difetto più importante: ne sono affetti i lati A, B e C. Sulla faccia C l'attacco di funghi è andato più a fondo, sino ad arrivare a 3, 4 cm di profondità. Sulla faccia B l'attacco è meno uniforme e penetra molto in profondità presso le fessurazioni mentre rimane superficiale per il resto della trave. Anche sullo spigolo A-D la carie ha deteriorato il legno per alcuni cm.

Per la classificazione visuale valgono le stesse considerazioni della trave precedente, cioè la trave è scartata da qualsiasi categoria.

Trave 8

Nodi di dimensioni importanti sono presenti in prossimità delle testate e lasciano libero il terzo medio. Il midollo è decentrato e si trova a pochi cm dalla faccia D. Per questo motivo su tutto il suddetto lato vi sono piccoli nodi e una unica grande fessurazione centrale. La fibratura, diritta su tre lati, è molto deviata sulla faccia A a causa della vicinanza del midollo che a sua volta non è parallelo all'asse longitudinale del segato. Nel tratto centrale è presente una lesione accompagnata dal callo di cicatrizzazione. Si rileva una cipollatura che, a partire da un'estremità, prosegue per un metro all'interno, mentre altri piccoli distacchi tra anelli si notano sulle due testate pochi cm attorno al midollo.

Il degradamento superficiale, mediamente di pochi millimetri e più profondo presso le fessure, copre tutto il lato C.

In questo caso la trave è scartata da tutte le norme a causa della cipollatura, della carie e alla deviazione della fibratura.

Trave 9

I nodi sono molti e irregolarmente distribuiti sulle quattro facce, con dimensioni molto variabili. La fibratura è poco inclinata. L'ampiezza media degli anelli è di 1.2 mm. Le fessurazioni presenti su tutte le facce, sono molto profonde sul lato D, dove arrivano sino al midollo, a circa 10 cm di profondità. Nel terzo medio c'è una cipollatura molto superficiale, affiorante sul lato B, interrotta da un nodo.

Mentre tutta la trave appare in ottimo stato di conservazione è presente sulla faccia C un'area circoscritta con del degradamento, per la maggior parte superficiale, che si approfondisce al centro fino a circa 5 cm all'interno.

Le norme anche in questo caso scartano la trave per la presenza della carie, mentre la cipollatura, essendo di dimensioni tutto sommato trascurabili, non è un fattore limitante.

Trave 10

I nodi sono pochi e raggruppati in tre verticilli. La fibratura è diritta. L'ampiezza media degli anelli intorno al millimetro. Le fessurazioni sono presenti su tutte le quattro facce e sono lunghe, larghe e profonde. Le più profonde sono sulla faccia A e su un tratto arrivano sino al midollo ad oltre 14 cm di profondità.

E' presente del legno degradato sulla superficie C. L'attacco penetra per pochi millimetri in alcune zone della faccia ed all'interno della fessurazione.

Pur essendo di modesta entità la parte del provino degradata lo esclude da qualsiasi categoria delle tre normative.

Trave 11

La trave presenta nodi di notevoli dimensioni, soprattutto sulla faccia B, e una fibratura elicoidale, molto inclinata su tutte le facce. Il difetto ha dato origine ad uno svergolamento che si aggiunge all'arcatura, dovuta invece prevalentemente al comportamento viscoelastico del legno ed ai carichi sopportati. Le fessurazioni sono molte e, per la loro inclinazione, raggiungono gli spigoli del provino. Sulla faccia C le fessure sono larghe e molto degradate.

E' la carie del legno che caratterizza questo provino: una testata è cava, la cavità prosegue all'interno sino alla mezzeria dove il degradamento confluisce nella faccia C. Questo lato è completamente cariato in superficie e in parte nell'interno, nella zona centrale. Nel terzo medio è presente della carie anche sulle facce laterali: in prossimità delle fessure penetra all'interno e probabilmente si congiunge al nucleo guasto della trave.

Le norme escludono la possibilità di utilizzo di un provino in queste condizioni di degradamento.

Trave 12

I nodi sono uniformemente distribuiti sulle facce A e D, sono assenti in C e puntiformi in B. La fibratura è parallela all'asse longitudinale del segato. L'ampiezza media degli anelli supera di poco il millimetro. La fessura sulla faccia D è l'unica molto larga e profonda², in alcuni tratti sino al midollo, sugli altri lati sono tutte di piccole dimensioni. Sullo spigolo A-B sono stati intagliati alcuni tasselli rettangolari (25x35x55 mm). In corrispondenza della mezzeria di una testata la fessurazione taglia il midollo e prosegue lateralmente coprendo circa il 70 % della larghezza della sezione.

Non ci sono porzioni superficiali degradate.

Escludendo il criterio che considera la dimensione delle fessure la trave sarebbe inserita nella categoria migliore di ogni norma.

² La grossa fessurazione sulla faccia D era stata chiusa con dei lunghi spessori di legno di forma trapezoidale, messi dentro a forza e tinteggiati come il resto della trave. La presenza dei "cunei" può aver impedito il libero movimento del legno che durante la sua vita, in determinate condizioni, può aver perso o riassorbito umidità e quindi essersi ritirato o rigonfiato. Se sui tembi di una qualsiasi fessurazione viene esercitata una forza in direzione perpendicolare alle fibre (quello che succederebbe in questo caso se trave e cunei avessero ripreso umidità) si avrebbe una tendenza allo spacco per trazione perpendicolare alle fibre, e all'approfondimento ed allargamento della fessurazione già esistente. La domanda che ci si è posti è questa: la fessurazione è così grande perché è stata tappata o è stata tappata perché era troppo grande?

Dimensioni delle travi				
	lunghezza [mm]	base (dimensione media) [mm]	altezza (dimensione media) [mm]	rapporto lunghezza / altezza
trave 1	4378	355	361	12,1
trave 2	4256	353	358	11.9
trave 3	4571	276	341	13.4
trave 4	4957	282	381	13.0
trave 5	4755	316	339	14.0
trave 6	4850	292	322	15.0
trave 7	4752	296	349	13.6
trave 8	4640	288	330	14.1
trave 9	4880	297	355	13.7
trave 10	4440	356	352	12.6
trave 11	4661	266	321	14.5
trave 12	4575	221	313	14.6
valori medi	4642.9	299.8	343.5	13.67

tabella 1. Le dimensioni delle travi. In grassetto sono riportati i valori massimi per ogni colonna, in corsivo i valori minimi

Criteri di classificazione utilizzati								
	dimens. anelli	max dev fibratura	nodosità (DIN 4074)	carie	cipollature	fessure da ritiro (UNI 8198 Giord.)	K.A.R. totale (UNI 8198)	K.A.R. marg. (UNI 8198)
	mm per anello	mm/m	mm/mm	presenza	presenza	presenza	classe	classe
trave 1	1,0	190	0,15	no	si	si	<20%	<20%
trave 2	0,9	40	0,18	no	si	si	<20%	<20%
trave 3	1,5	60	0,15	si (<1/10)	no	si	<20%	<33%
trave 4	1,2	44	0,21	no	si	si	<20%	<20%
trave 5	0,9	21	0,12	si (<1/10)	si	si	<20%	<20%
trave 6	1,2	71	0,21	si	no	si	<50%	<50%
trave 7	1,1	41	0,21	si	no	si	<50%	<33%
trave 8	1,3	61	0,125	si (<1/10)	si	si	<20%	<20%
trave 9	0,8	41	0,21	si (<1/10)	no	si	<20%	<33%
trave 10	1,1	15	0,12	si (<1/10)	no	si	<20%	<20%
trave 11	2,1	146	0,27	si	no	si	<20%	<20%
trave 12	1,3	18	0,12	no	no	si	<20%	<20%

tabella 2. Valori utilizzati per la classificazione delle travi, ricavati per mezzo dell'ispezione visuale

Risultati della classificazione visuale						
	senza modifiche			con le modifiche		
	U.N.I. 8198	D.I.N. 4074	Norma racc. Giordano	U.N.I. 8198	D.I.N. 4074	Norma racc. Giordano
totale non classificati	12	11	12	8	8	8
per fessurazioni	12	0	12	0	0	0
per cipollatura	5	5	5	5	5	5
per dev. fibratura	1	0	0	1	0	0
per carie	8	8	8	3	3	3

tabella 3. Riassunto dei risultati della selezione in categorie secondo le tre norme utilizzate e con le successive modifiche

Classificazione visuale						
	senza modifiche			con le modifiche		
	U.N.I. 8198	D.I.N. 4074	Norma racc. Giordano	U.N.I. 8198	D.I.N. 4074	Norma racc. Giordano
trave 1	n.c.:dev.fibr. fess. cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: fess. cipoll.	n.c.:dev.fibr. cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.
trave 2	n.c.: fess. cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: fess. cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.
trave 3	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: fess. carie	S8: carie	S10: carie	2^a: carie
trave 4	n.c.: fess. cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: fess. cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.
trave 5	n.c.: cipoll carie	n.c.: cipoll. carie	n.c.:cipoll. carie	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.
trave 6	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: fess. carie nodi	n.c.: carie	n.c.: carie	n.c.: carie
trave 7	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: carie	n.c.: carie
trave 8	n.c.: fess. cipoll. carie	n.c.: cipoll. carie	n.c.: fess. cipoll. carie	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.	n.c.: cipoll.
trave 9	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: fess. carie	S6: carie	S7: carie	3^a: carie nodi
trave 10	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: fess. carie	S8: carie	S10: carie	2^a: carie nodi
trave 11	n.c.: fess. carie	n.c.: carie	n.c.: fess. carie nodi	n.c.: carie	n.c.: carie	n.c.: carie nodi
trave 12	n.c.: fess.	S13	n.c.: fess.	S10	S13	1^a

tabella 4: Risultati della selezione in categorie secondo le tre norme utilizzate e con le successive modifiche (n.c.=non classificato)

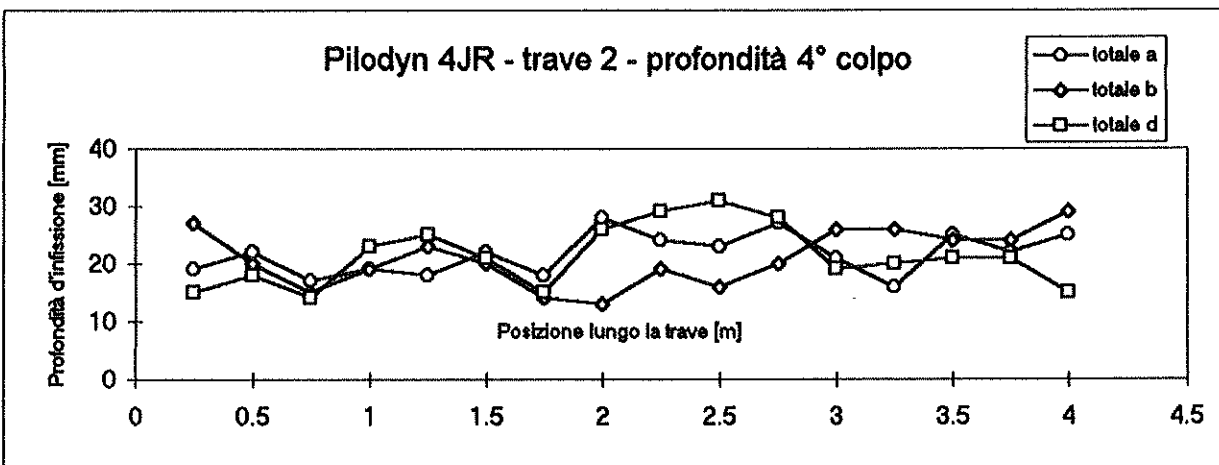
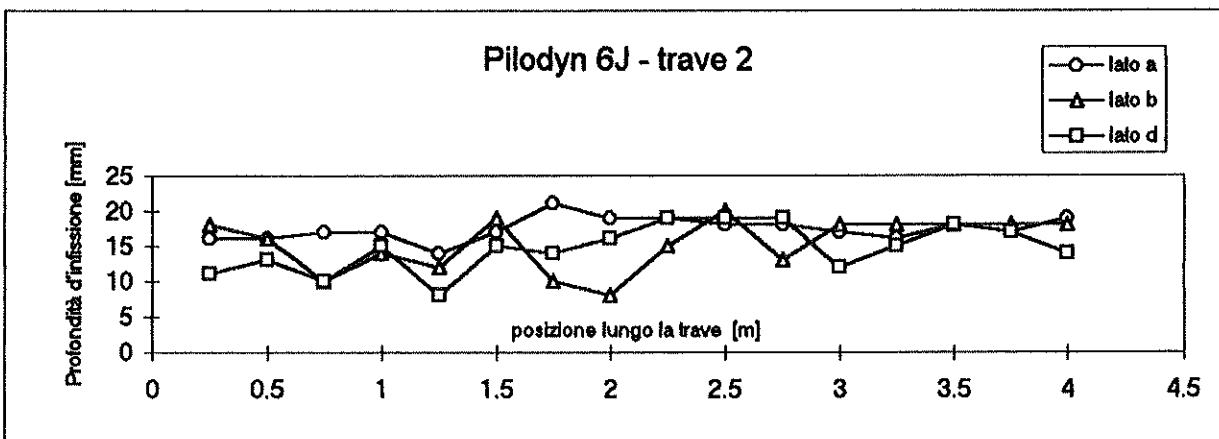
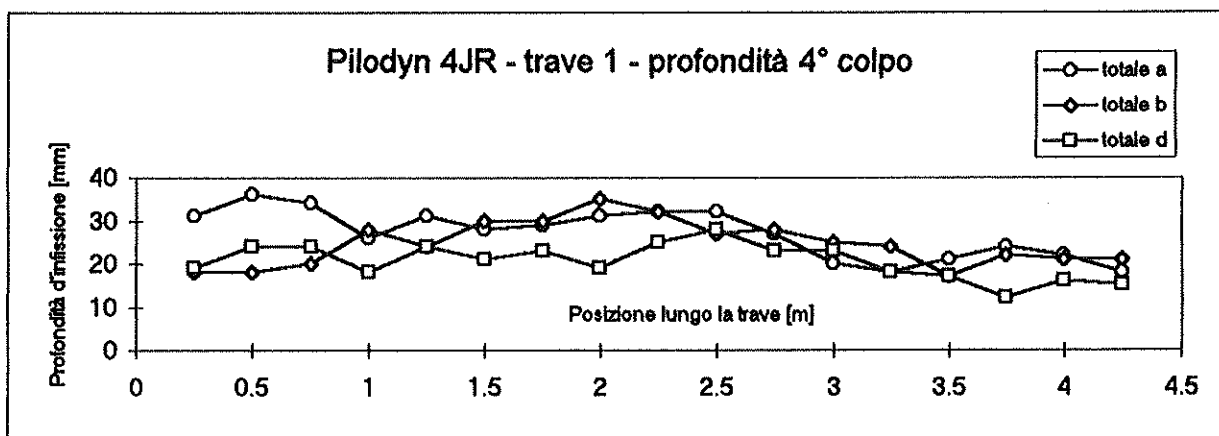
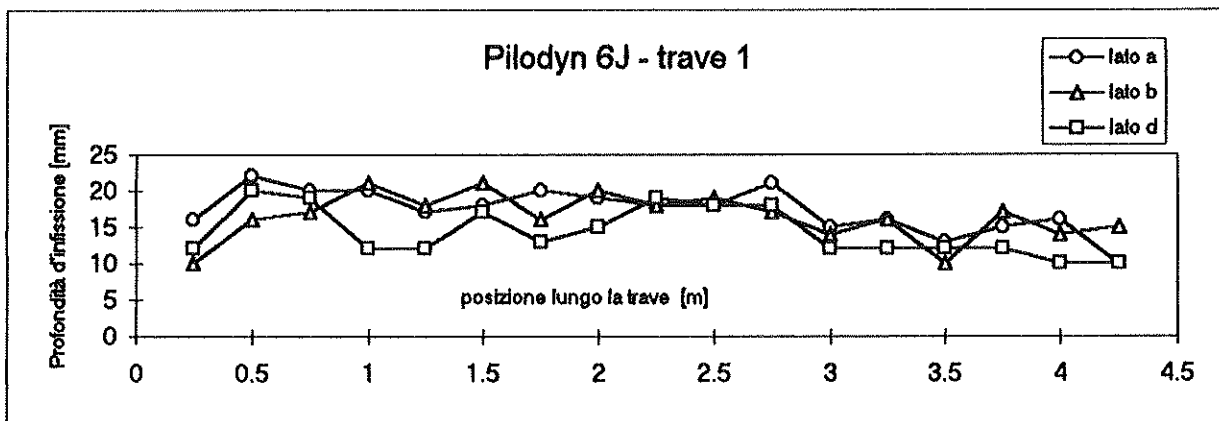
ALLEGATI – PARTE II

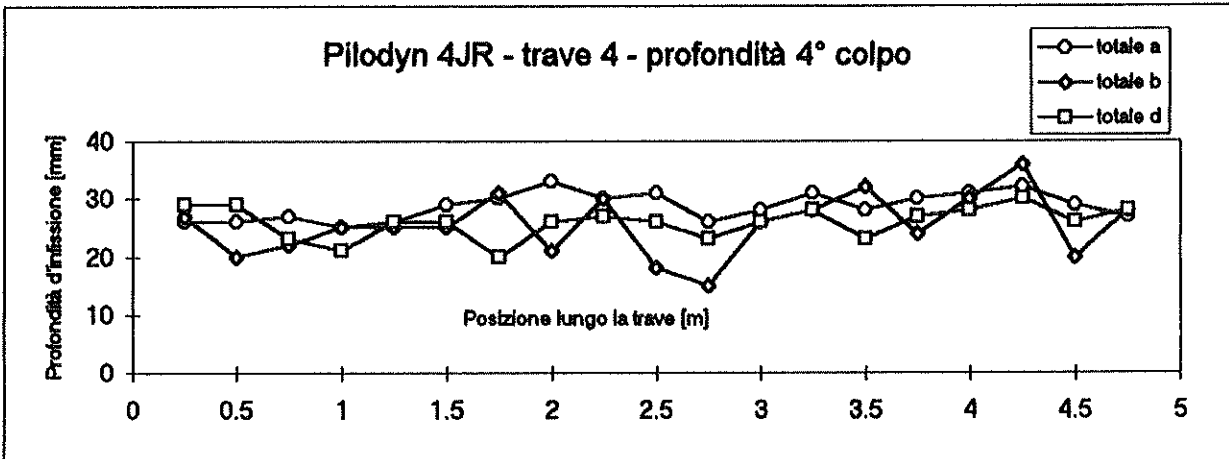
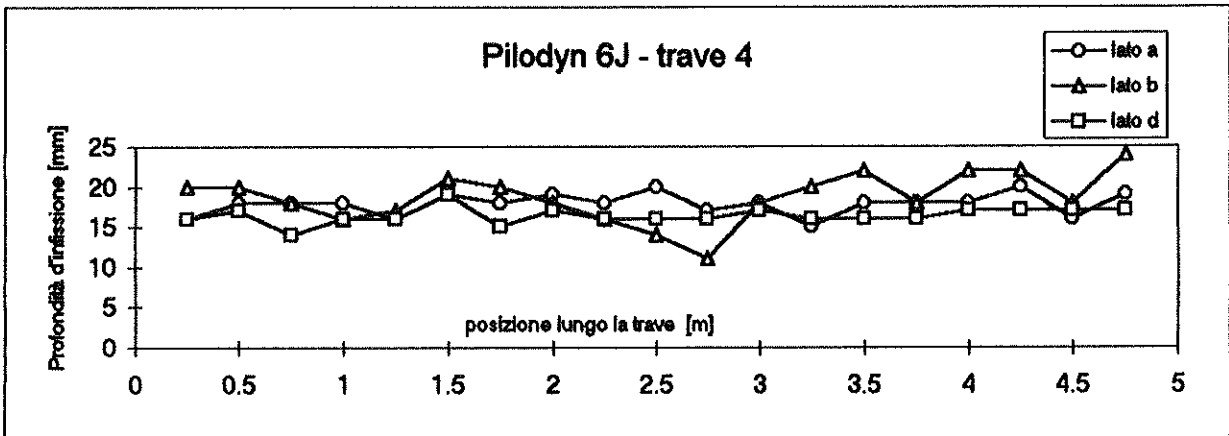
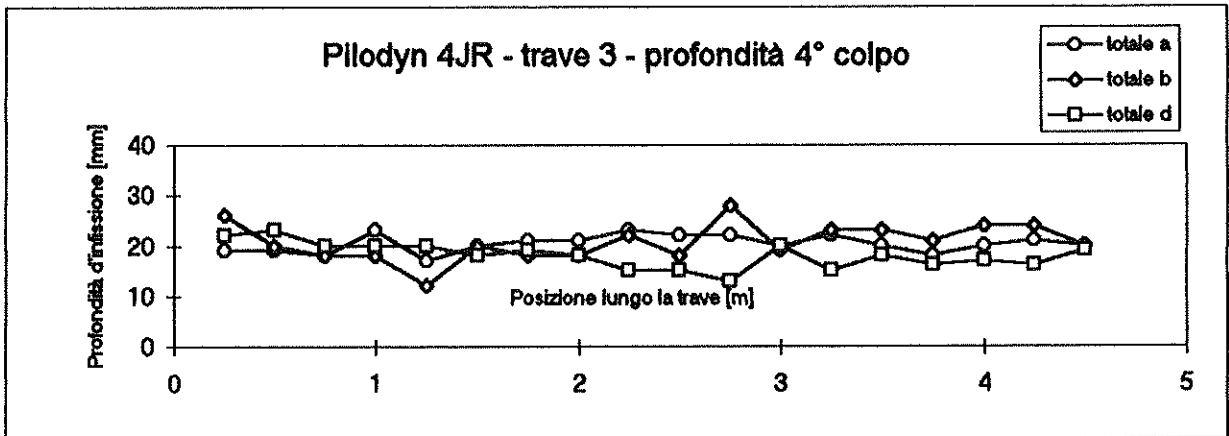
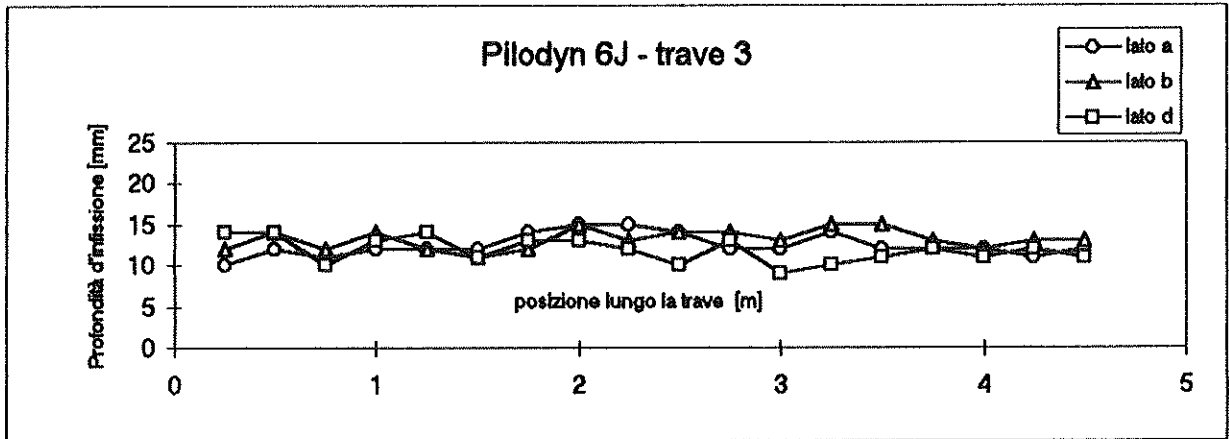
Prove non distruttive

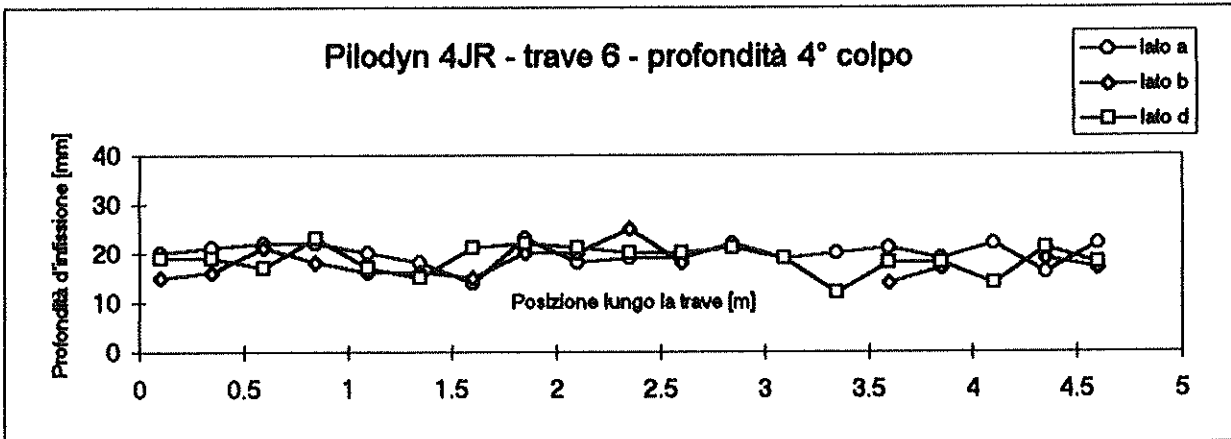
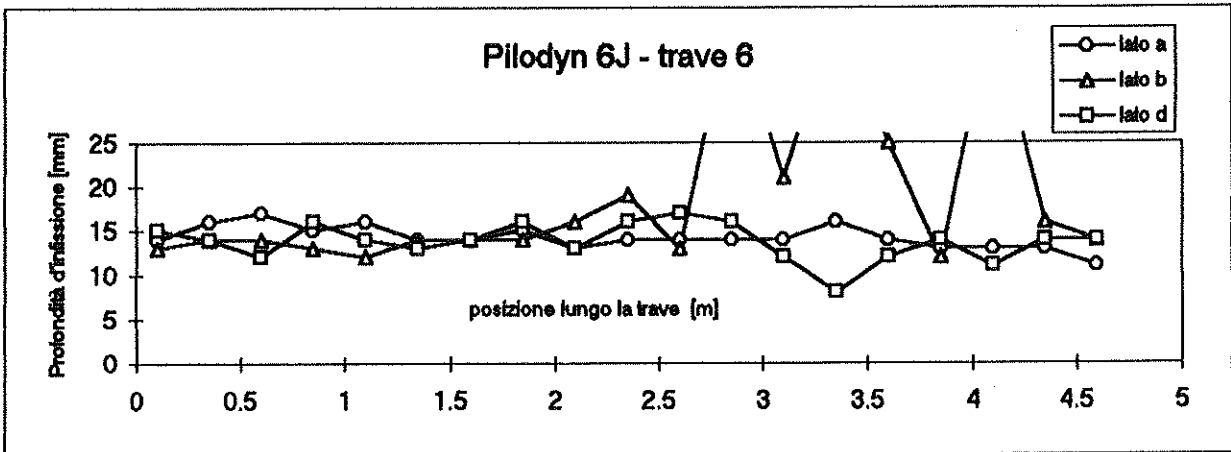
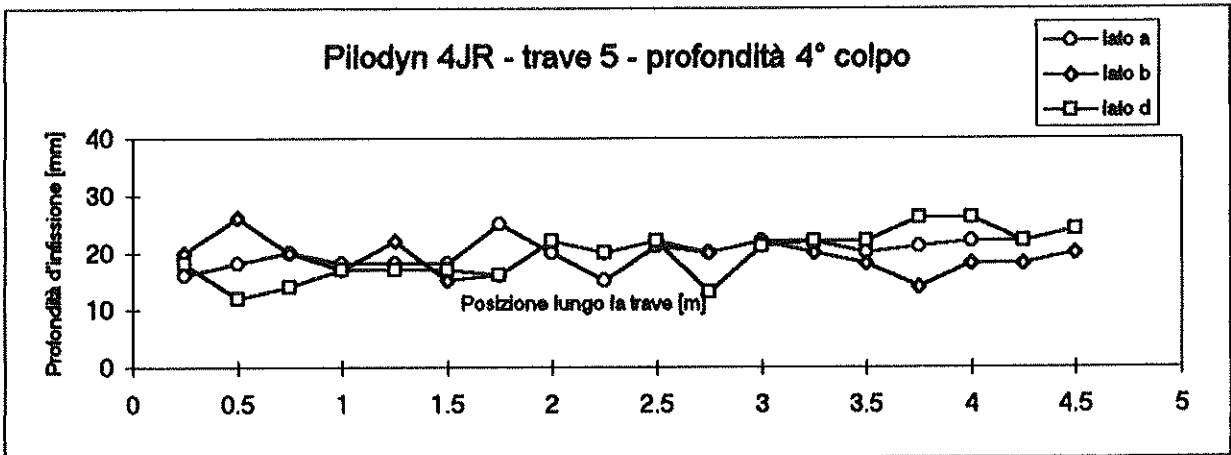
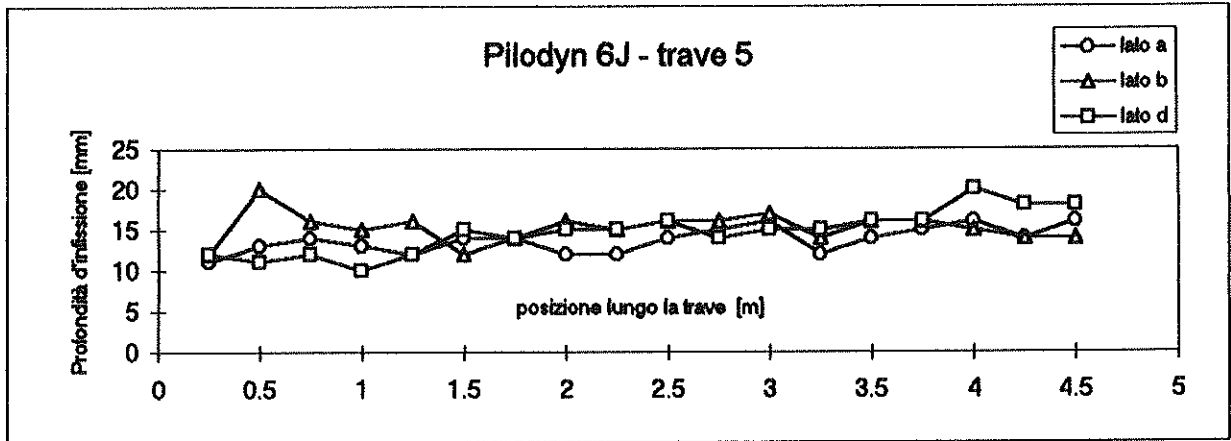
- dati ricavati per mezzo dei Pilodyn e relativi grafici
- velocità di propagazione degli ultrasuoni, moduli elastici relativi e grafici dell'attenuazione del segnale
- vibrazione libera, moduli elastici e grafici dello smorzamento dell'oscillazione

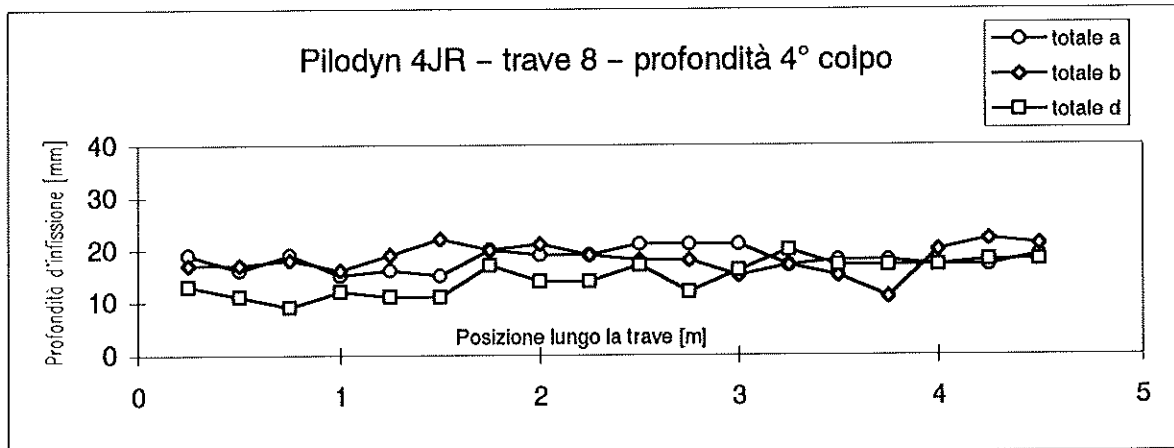
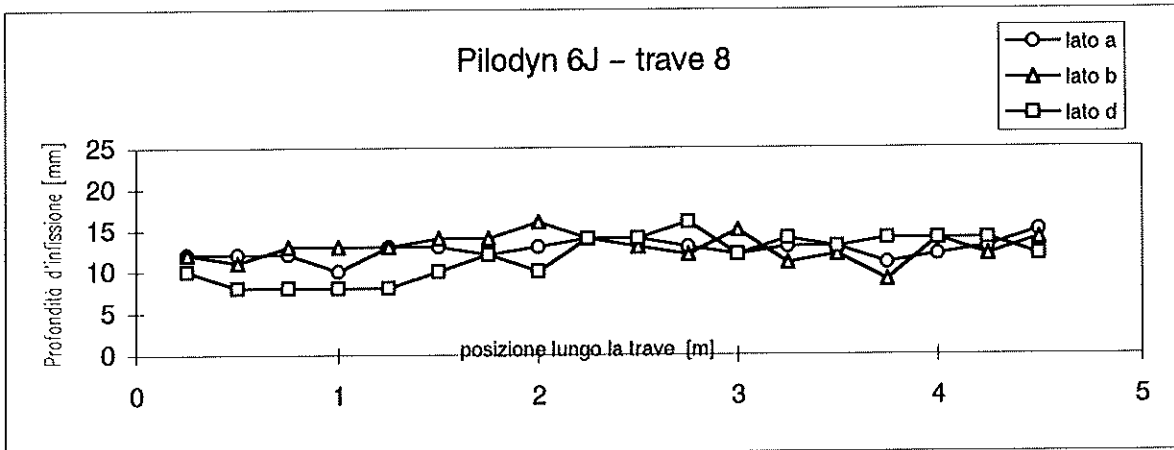
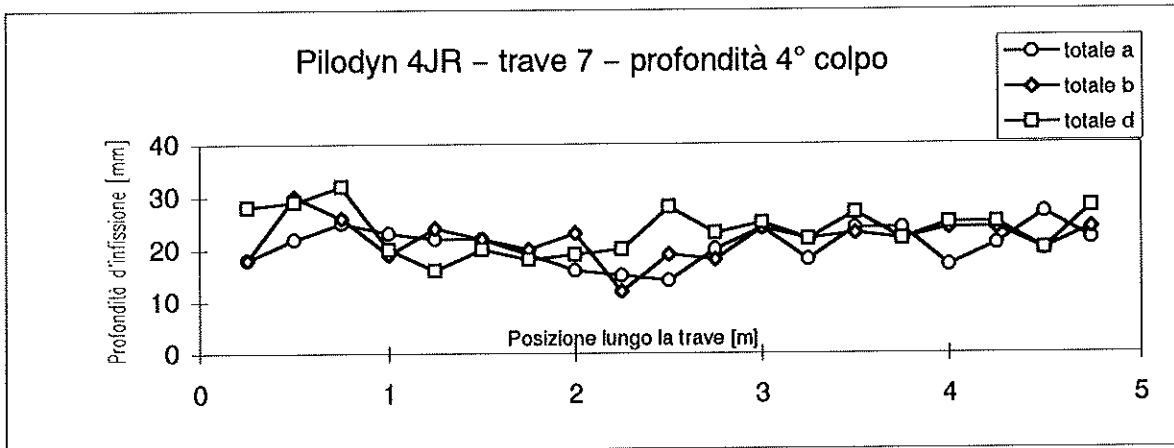
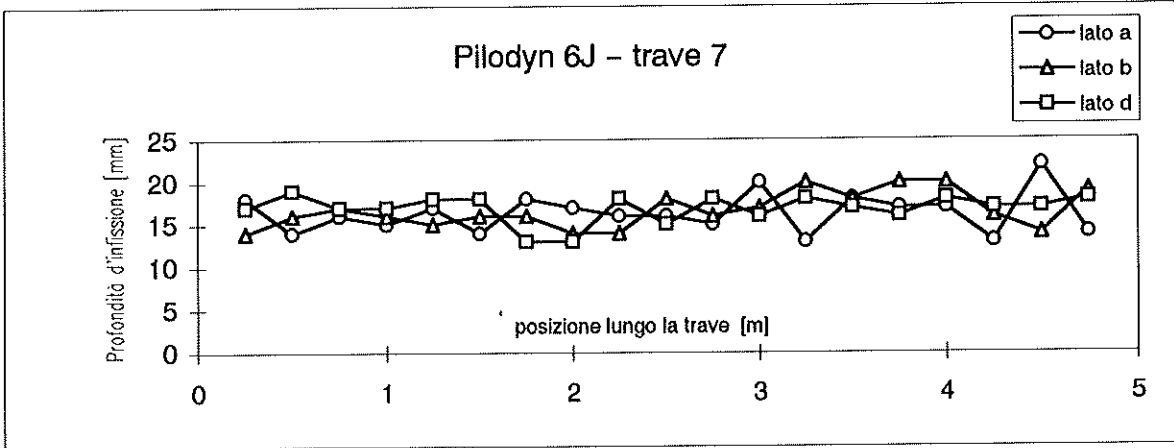
Prove con i Pilodyn									
	massa volumica kg/m ³	numero dei punti di prova	Pilodyn 6J		Pilodyn 4JR (valori medi)				
			media	C.V.	valori medi [mm]				C.V.
			mm	%	1°colpo	2°colpo	3°colpo	4°colpo	%
trave 1	480	51	16.0	21.3	7.6	12.8	18.3	24.1	23.6
trave 2	483	48	15.8	20.2	6.7	11.5	16.4	21.3	21.5
trave 3	516	54	12.5	11.7	6.4	10.7	15.0	19.7	15.3
trave 4	464	57	17.6	12.6	8.4	14.4	20.8	26.7	14.7
trave 5	487	54	14.5	14.4	7.2	11.4	15.4	19.7	16.6
trave 6	505	57	15.7	39.9	6.8	11.0	15.4	19.3	21.5
trave 7	464	57	16.6	12.1	7.5	12.3	17.1	22.0	18.4
trave 8	513	54	12.4	15.5	5.9	9.6	13.3	17.0	18.3
trave 9	498	57	13.4	15.5	7.2	10.7	14.4	17.9	16.7
trave 10	478	51	16.3	12.9	7.2	12.6	18.0	23.1	13.8
trave 11	469	54	16.1	15.8	7.7	12.5	17.6	23.5	22.4
trave 12	449	54	16.8	19.7	7.6	12.7	17.8	22.4	21.6

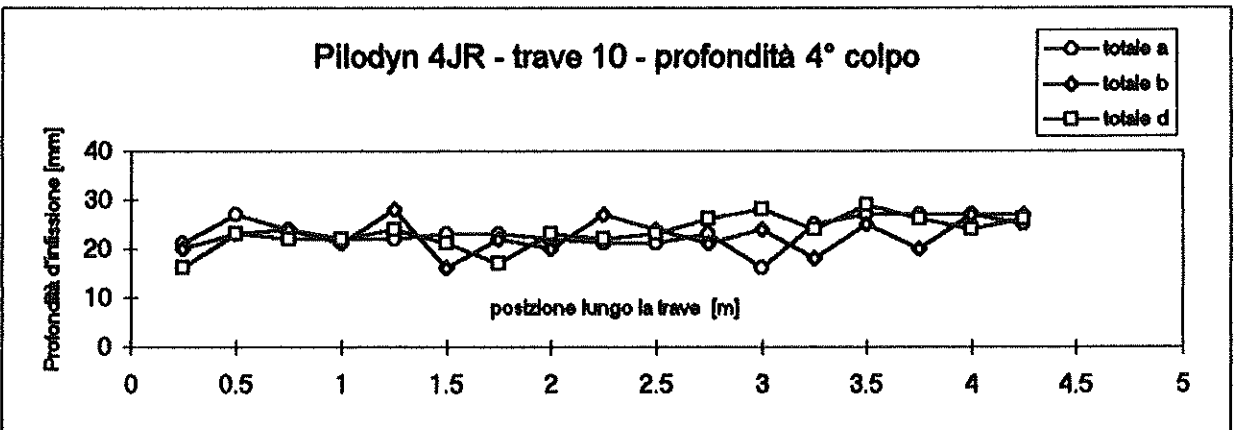
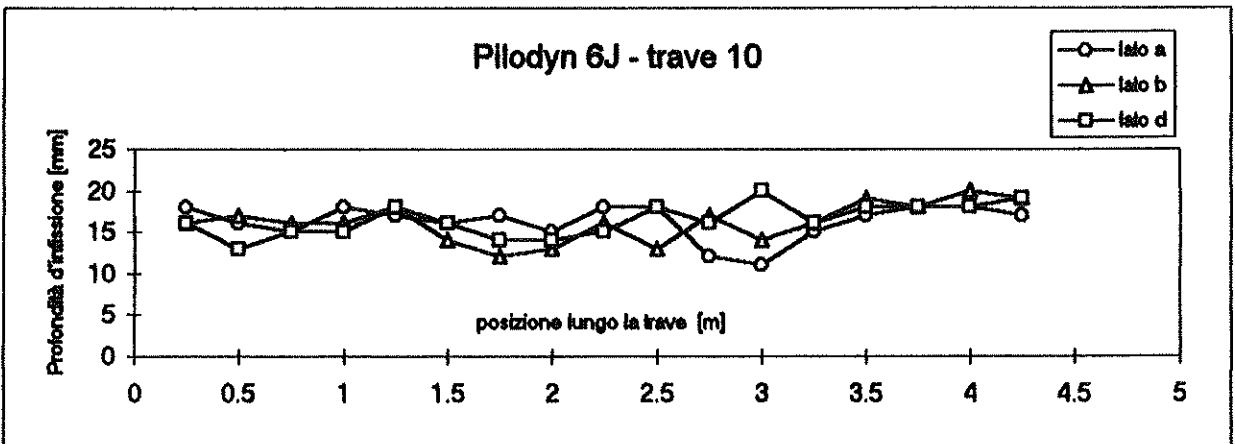
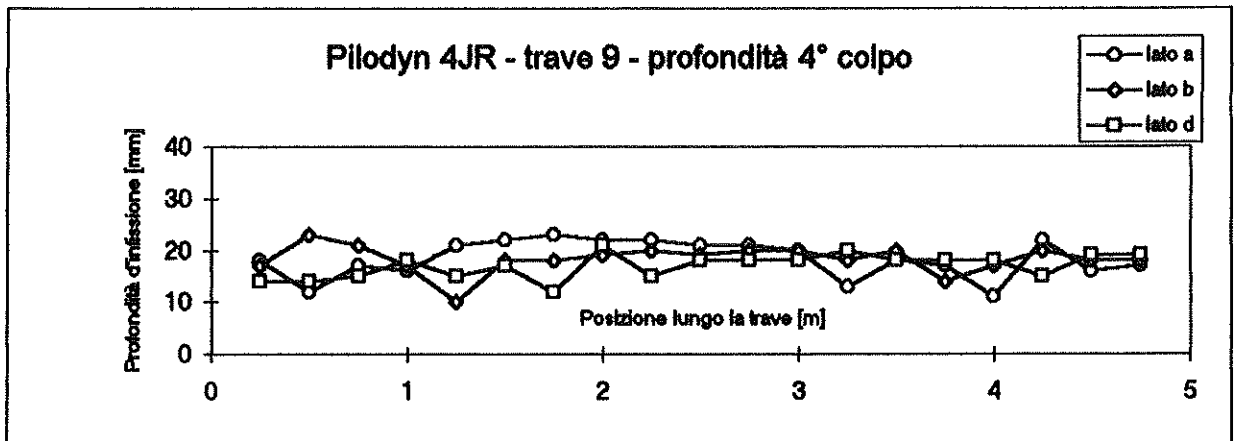
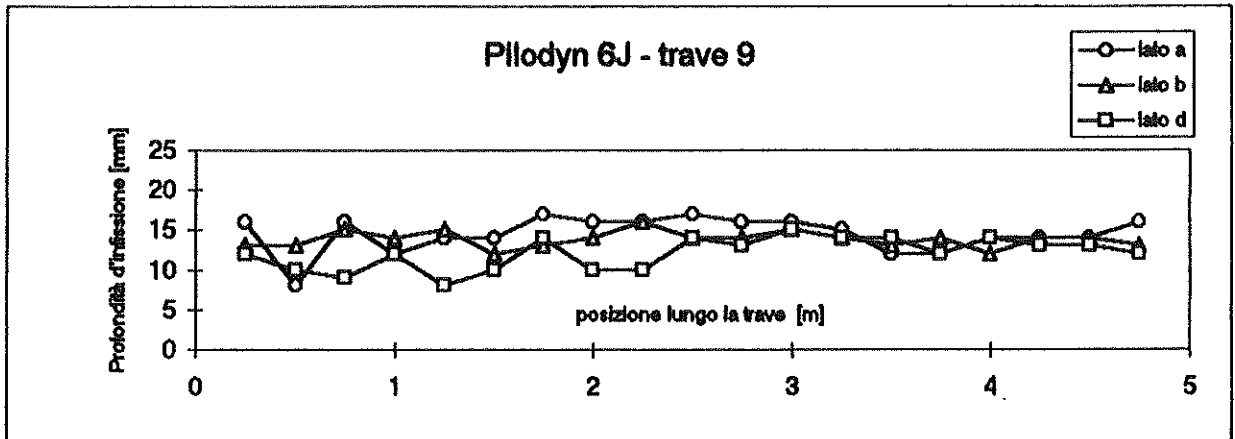
tabella 5 Risultati delle due prove di penetrazione dinamica con il Pilodyn 6J e il Pilodyn 4JR e valori della massa volumica determinati sulla trave intera. In grassetto sono riportati i valori massimi per ogni colonna, in corsivo i valori minimi

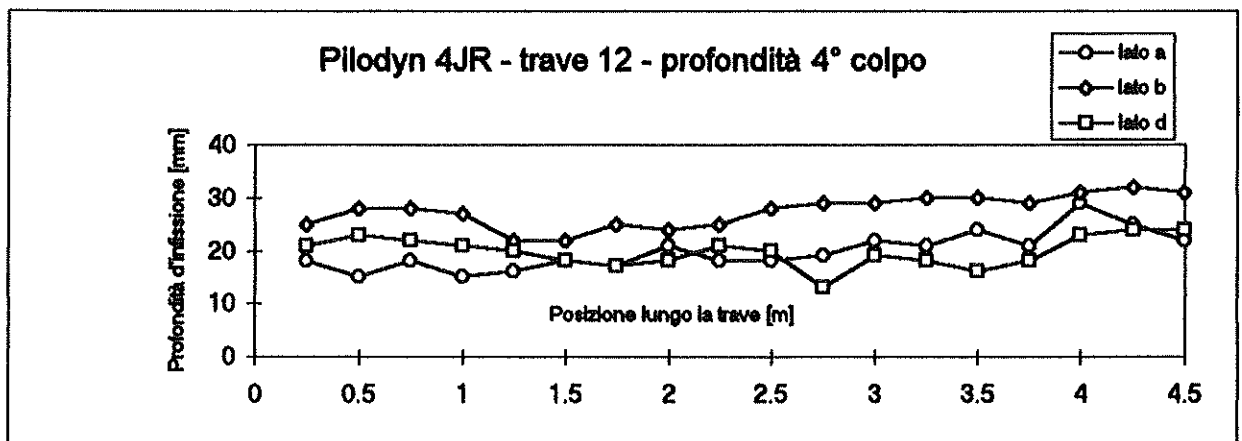
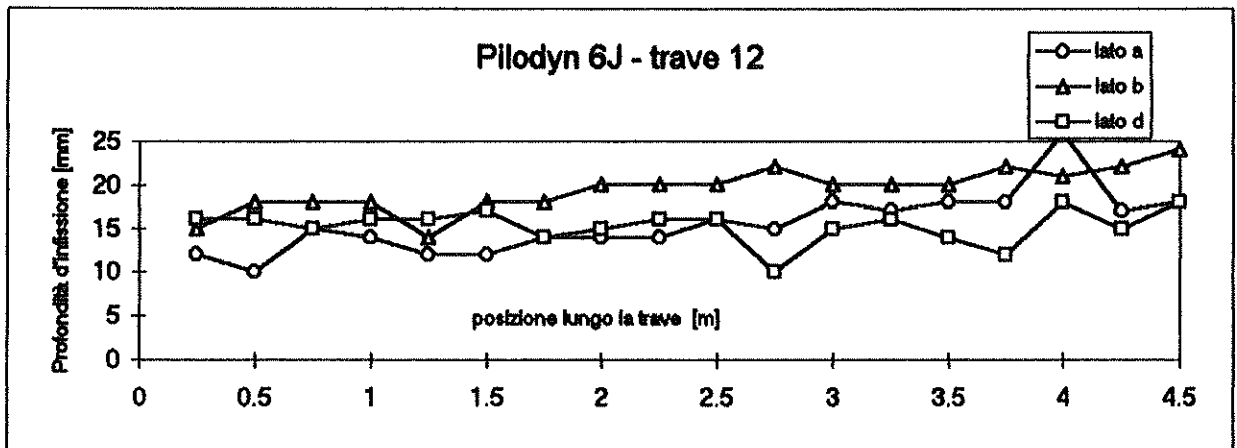
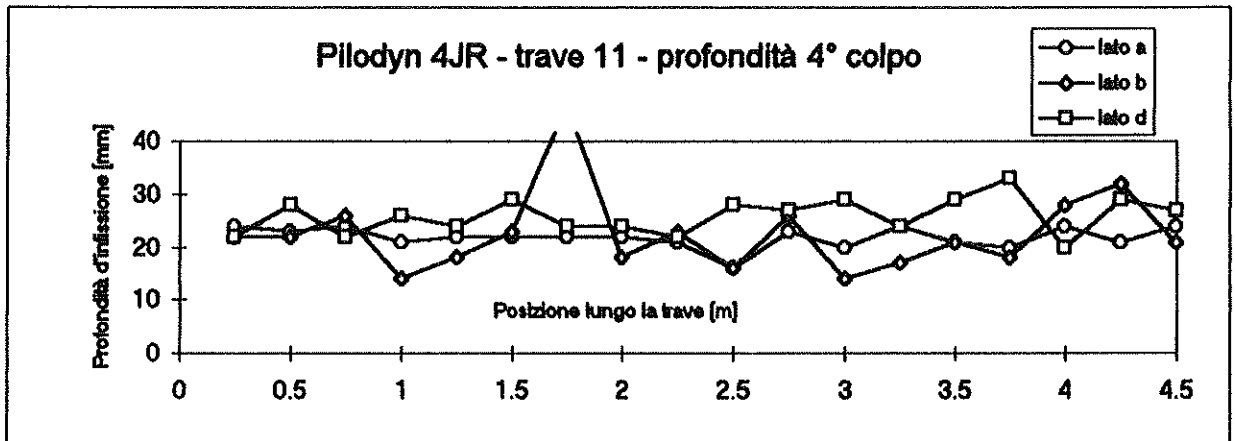
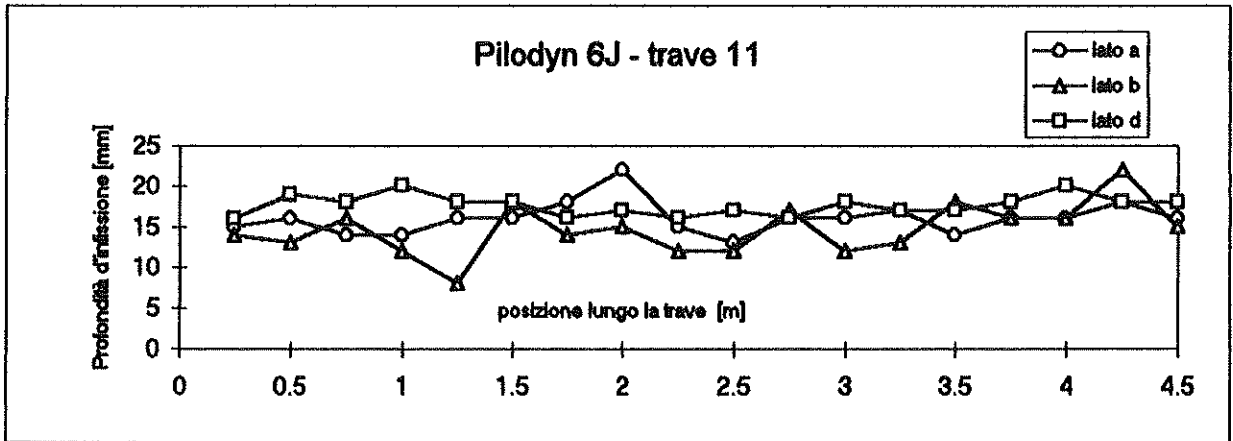










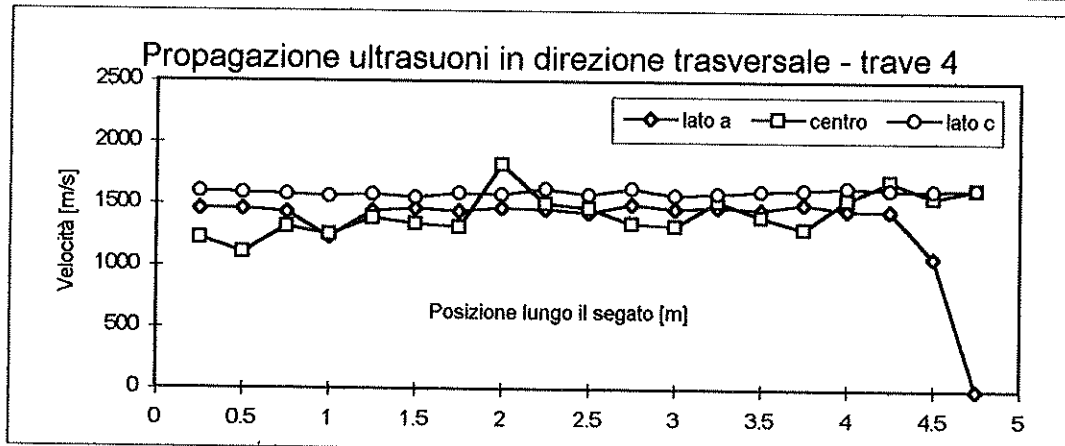
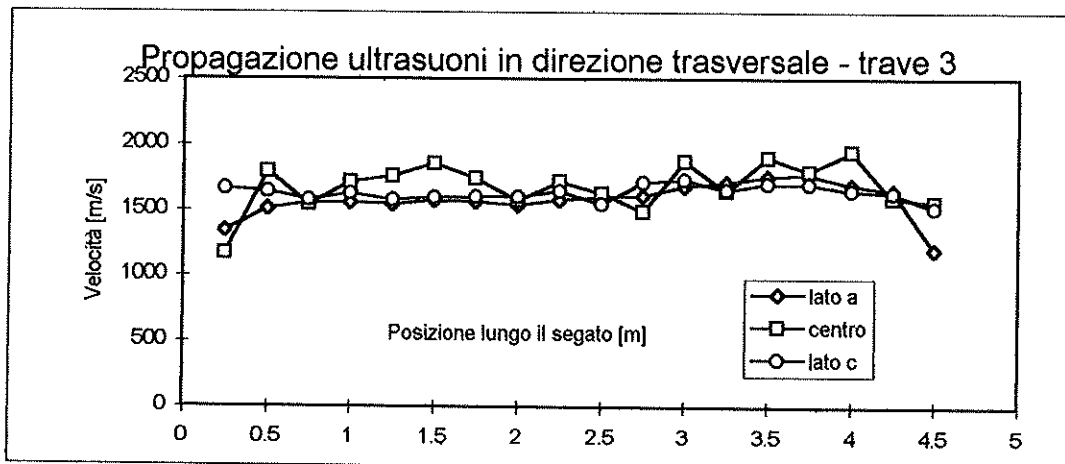
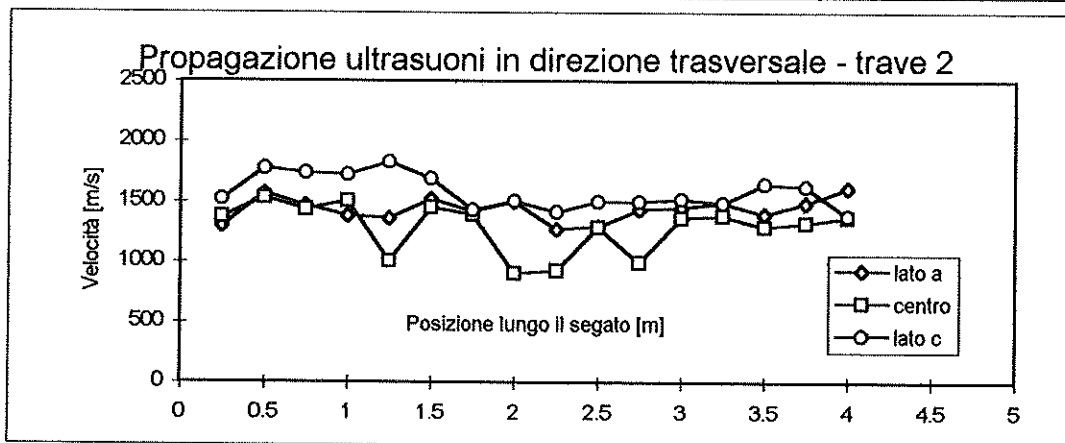
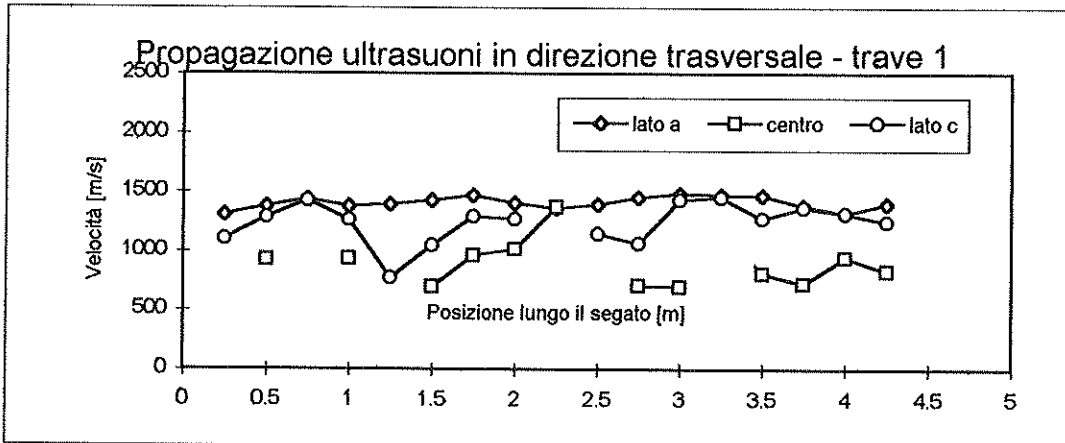


	massa volumica	Misure con gli ultrasuoni in direzione longitudinale					
		sonde parallele alla fibratura (valori medi)		sonde inclinate (valori medi)		attenuazione del segnale	
		velocità	$E_{us,0}$	velocità	$E_{us,45}$	acc. a 10 m dalla sonda emittente	distanza da sonda a cui $a=1 \text{ cm/sec}^2$
		[kg/m ³]	[m/sec]	[N/mm ²]	[m/sec]	[N/mm ²]	[cm/sec ²]
trave 1	480	5274	13341	5146	12701	0.080	2890
trave 2	483	5095	12279	5001	11829	0.069	2401
trave 3	516	5936	18194	6039	18829	0.548	6652
trave 4	464	5835	15782	5853	15880	0.924	9440
trave 5	487	5829	16534	5683	15720	0.398	5271
trave 6	505	5580	15722	4735	11319	0.273	4750
trave 7	464	5412	13592	5050	11833	<i>0.038</i>	<i>2697</i>
trave 8	513	5773	17107	5705	16708	0.423	5565
trave 9	498	5723	16322	5681	16083	0.066	2477
trave 10	478	5625	15118	5673	15378	0.339	5292
trave 11	469	<i>5039</i>	<i>11909</i>	<i>4377</i>	<i>8988</i>	0.104	3148
trave 12	449	5933	15799	5686	14510	0.131	3111

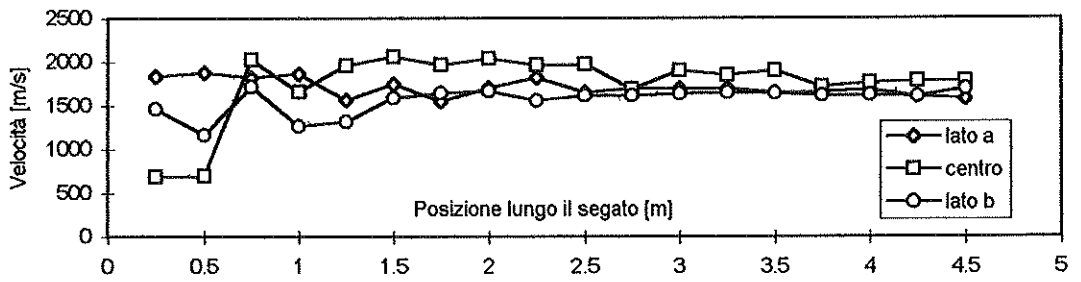
tabella 6a. Risultati delle misure effettuate con gli ultrasuoni in direzione longitudinale. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

	massa volumica	Misure con gli ultrasuoni in direzione trasversale					
		media	minimo	massimo	deviaz. standard	C.V.	numero di prove
		[kg/m ³]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
trave 1	480	1065	0	<i>1483</i>	460	43.16	51
trave 2	483	1433	904	1826	194	13.53	48
trave 3	516	1630	1166	1943	<i>141</i>	<i>8.65</i>	54
trave 4	464	1459	0	1823	243	16.65	57
trave 5	487	1670	684	2061	264	15.81	54
trave 6	505	1336	0	1935	577	43.17	57
trave 7	464	1699	592	1952	209	12.28	54
trave 8	513	1504	0	1904	374	24.86	54
trave 9	498	1486	929	2036	266	17.91	57
trave 10	478	1482	0	1918	477	32.22	51
trave 11	469	<i>768</i>	0	1619	661	85.99	54
trave 12	449	1506	0	1883	301	19.96	54

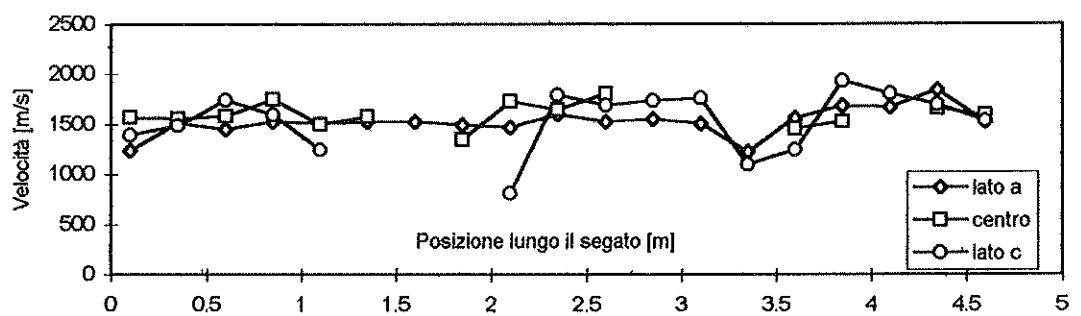
tabella 6b. Risultati delle misure effettuate con gli ultrasuoni in direzione trasversale. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi



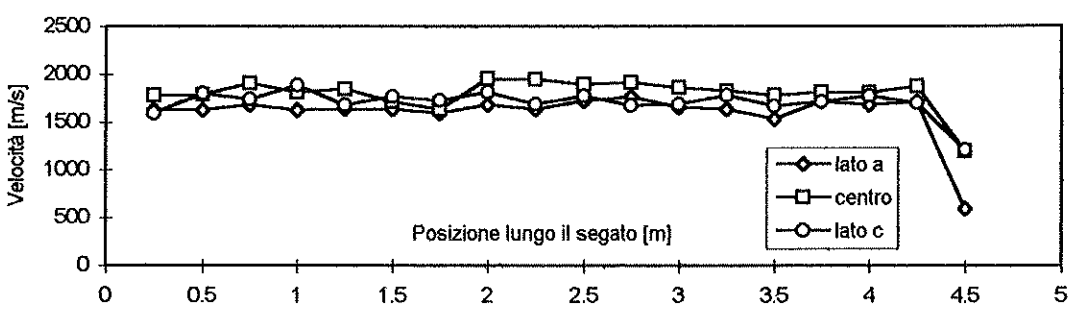
Propagazione ultrasuoni in direzione trasversale - trave 5



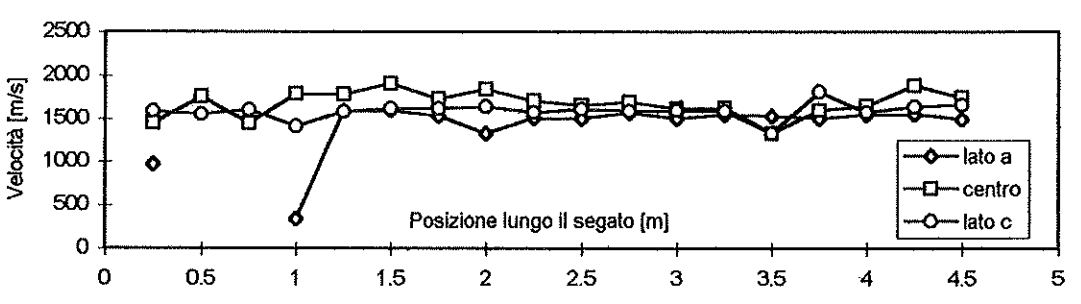
Propagazione ultrasuoni in direzione trasversale - trave 6



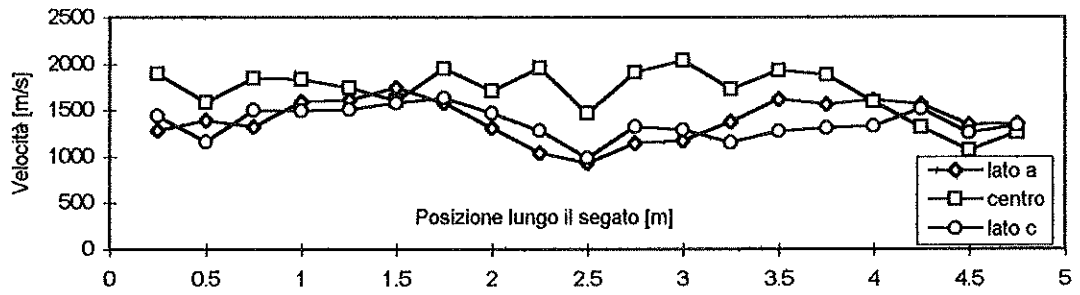
Propagazione ultrasuoni in direzione trasversale - trave 7



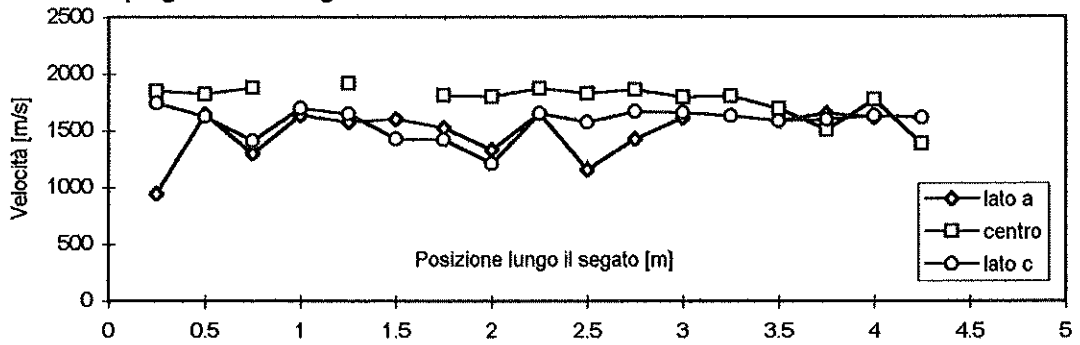
Propagazione ultrasuoni in direzione trasversale - trave 8



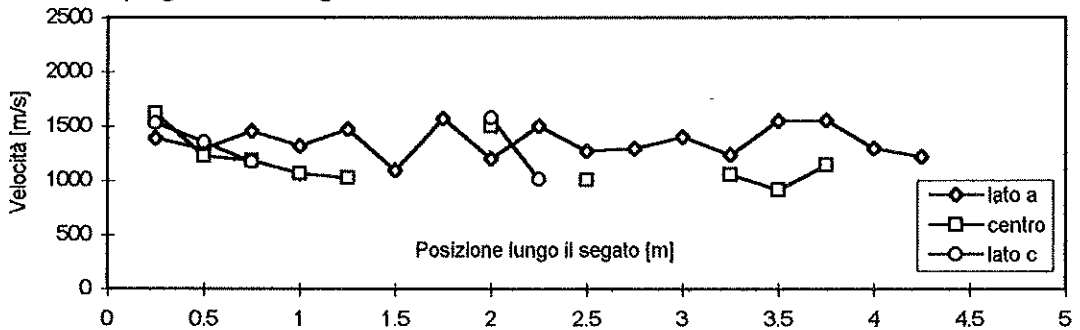
Propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale - trave 9



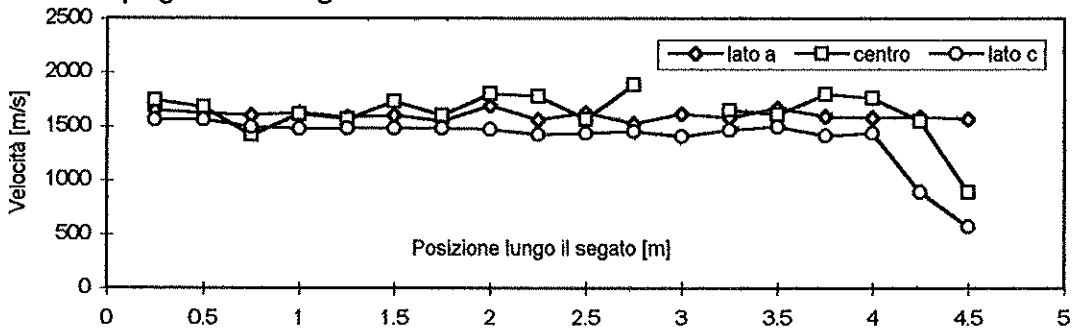
Propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale - trave 10



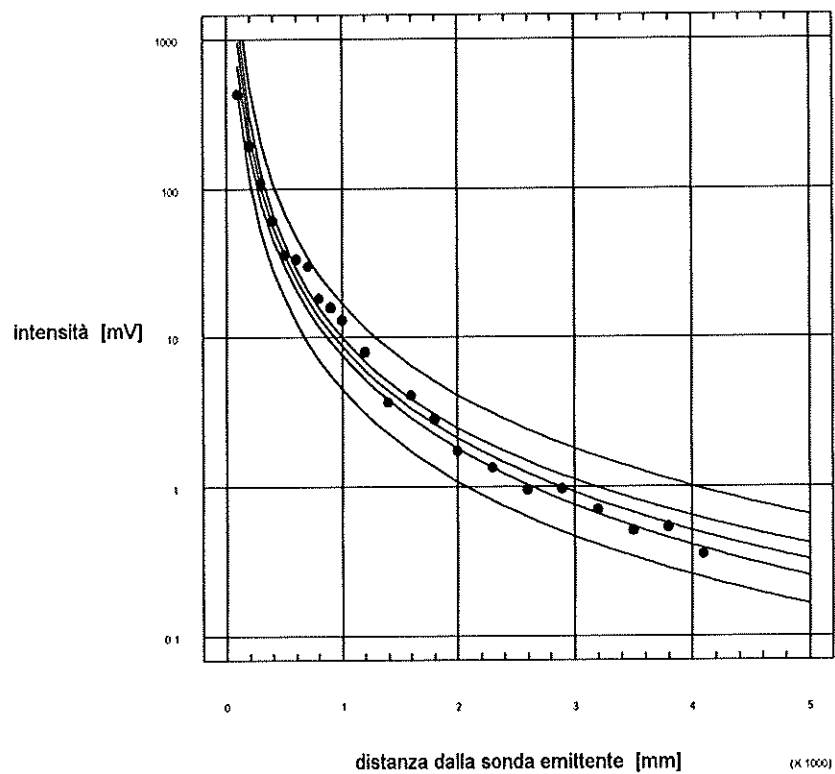
Propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale - trave 11



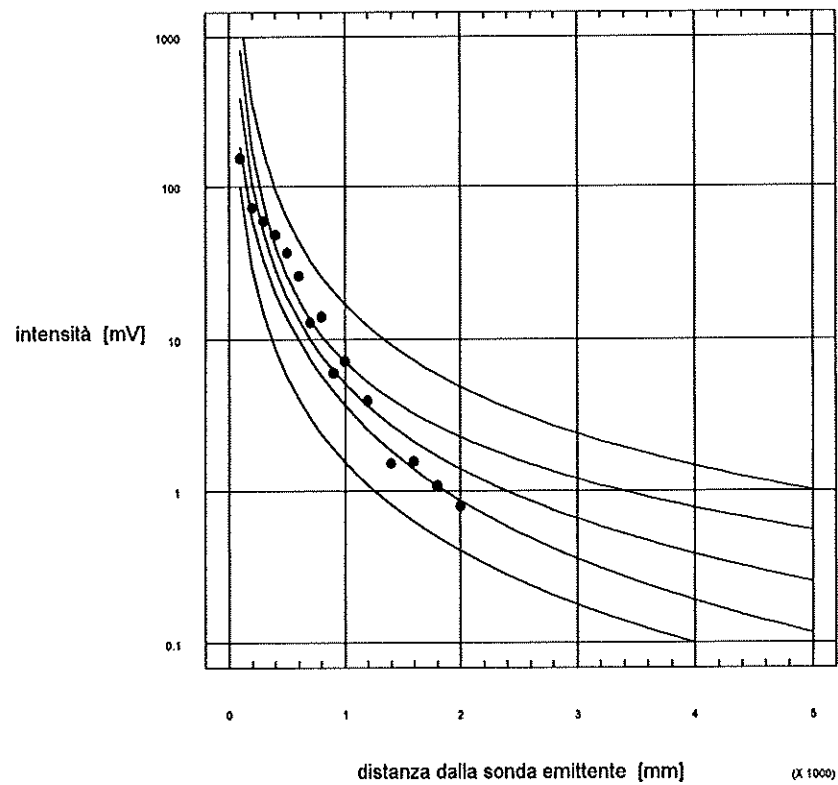
Propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale - trave 12



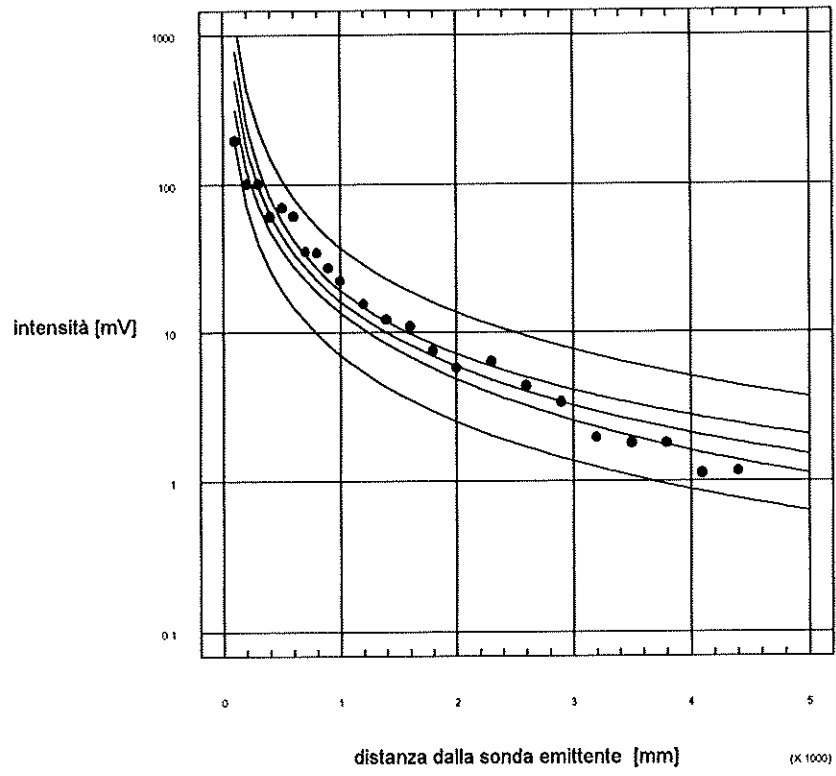
Attenuazione del segnale - trave 1



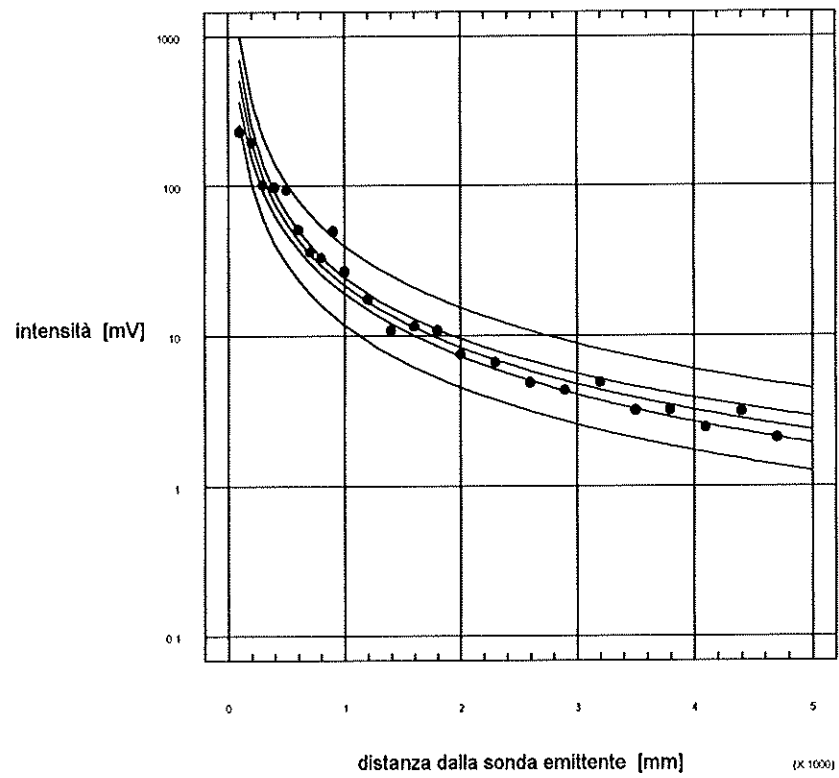
Attenuazione del segnale - trave 2



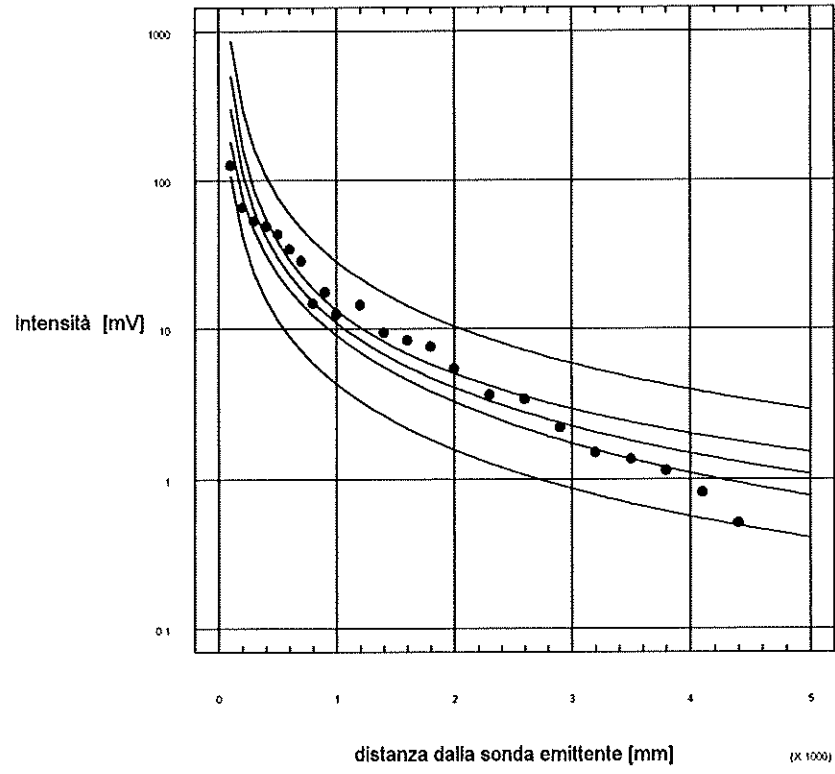
Attenuazione del segnale - trave 3



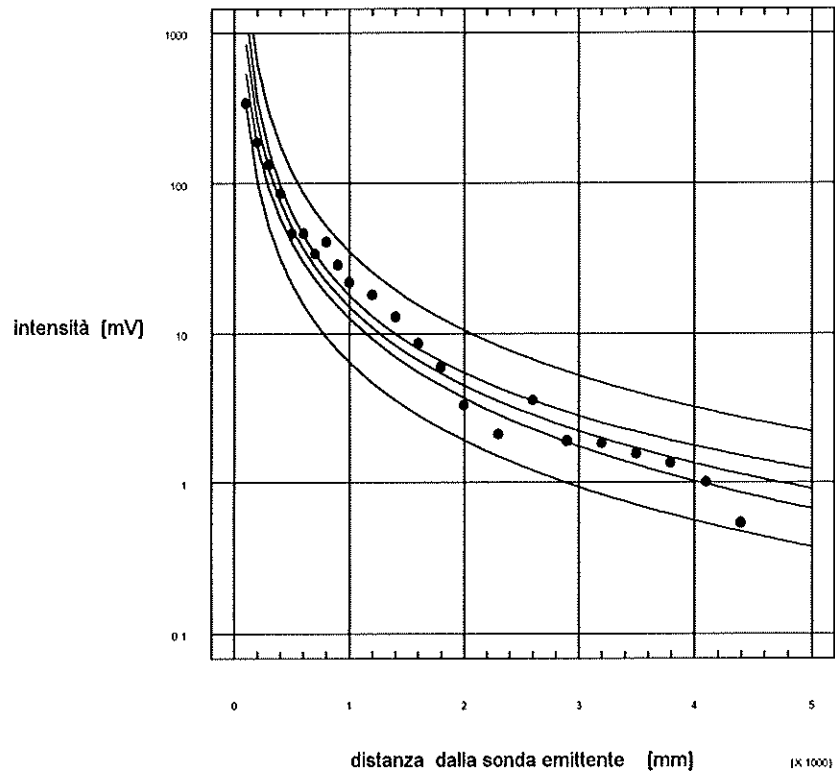
Attenuazione del segnale - trave 4



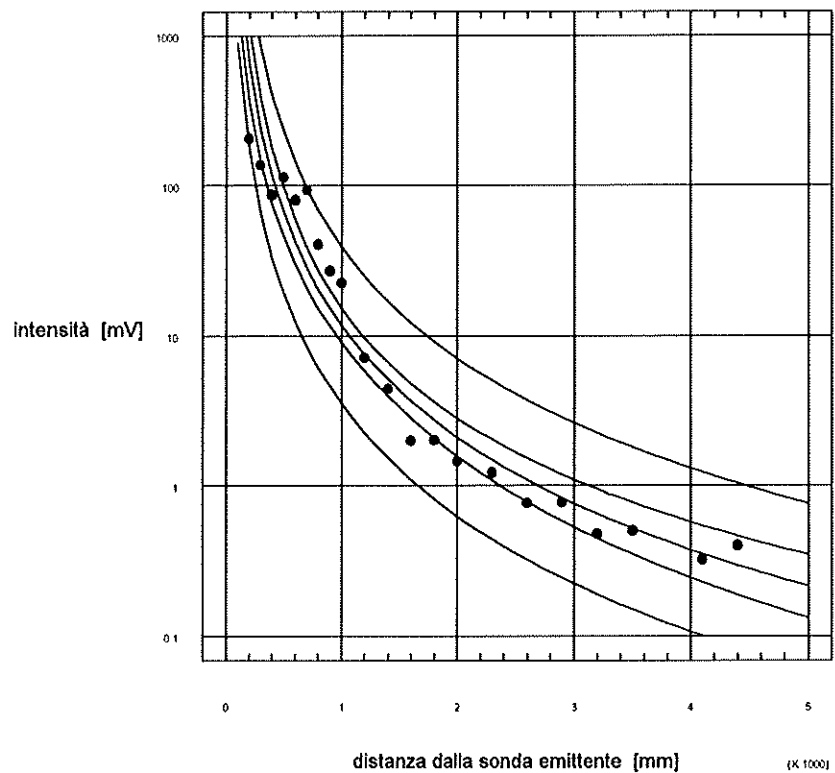
Attenuazione del segnale - trave 5



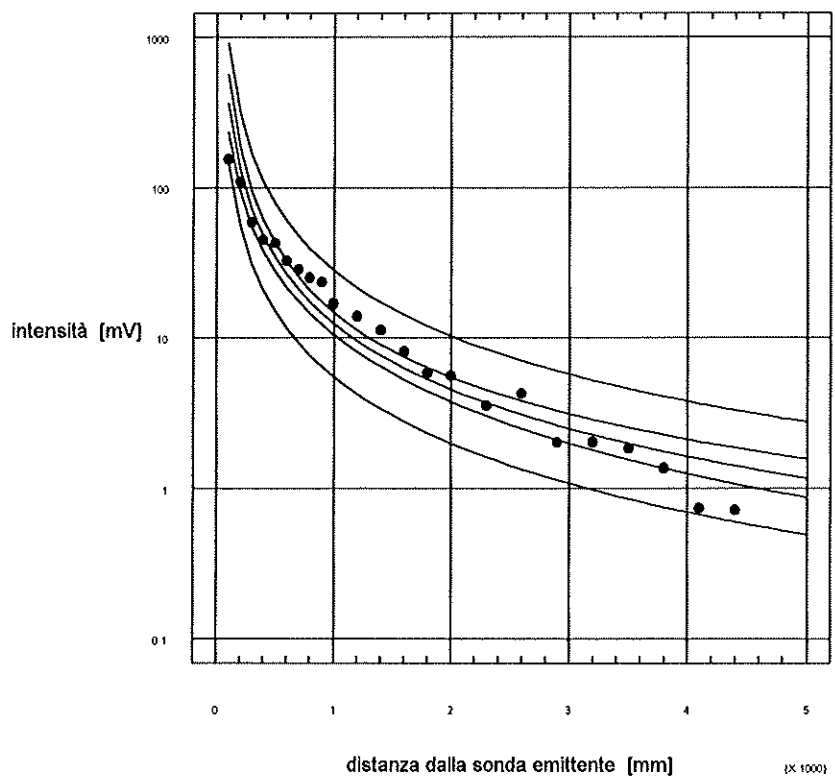
Attenuazione del segnale - trave 6



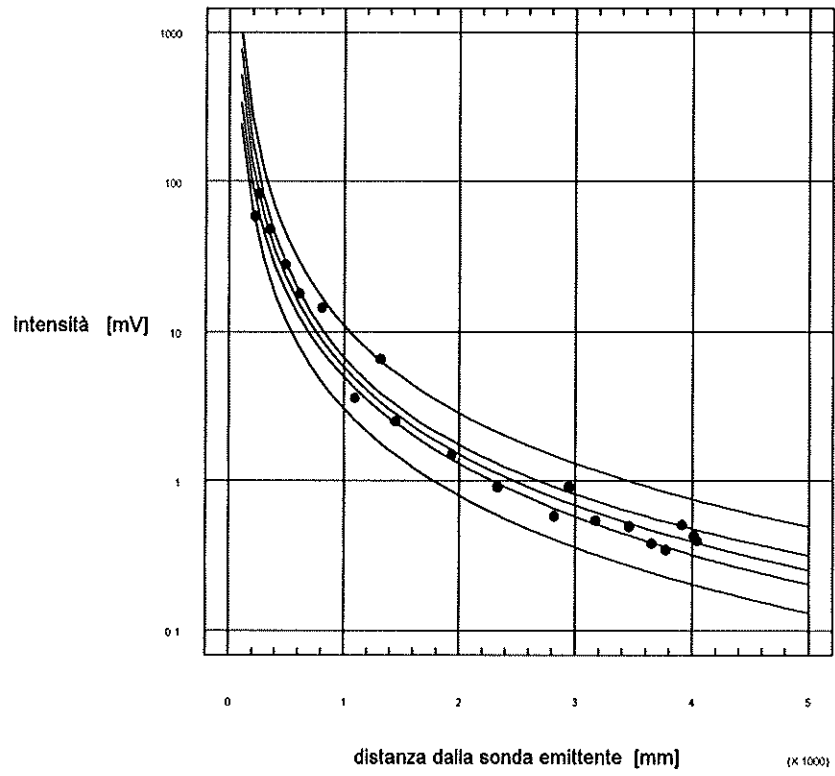
Attenuazione del segnale - trave 7



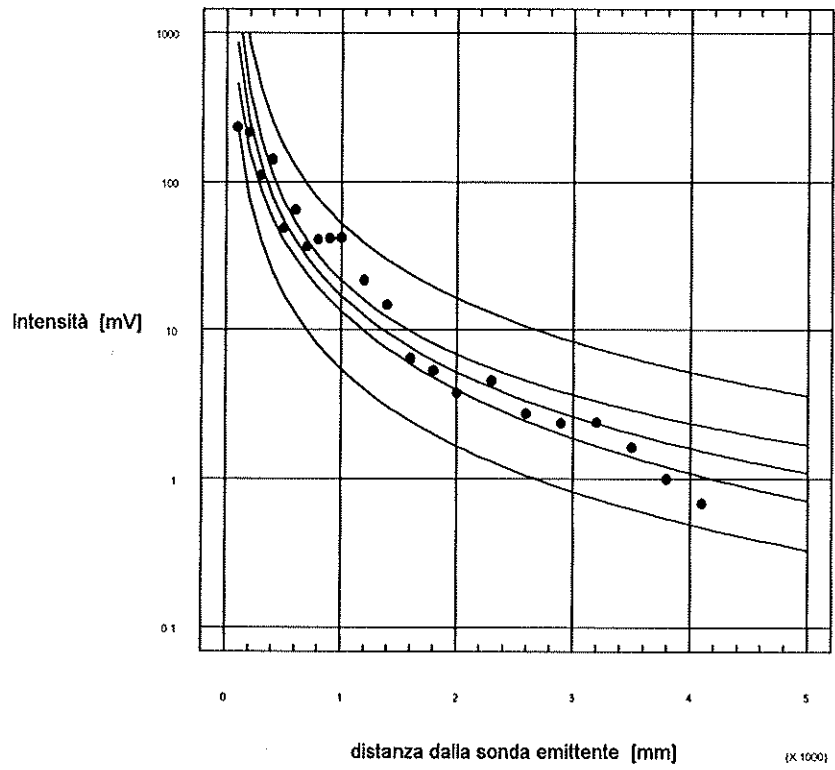
Attenuazione del segnale - trave 8



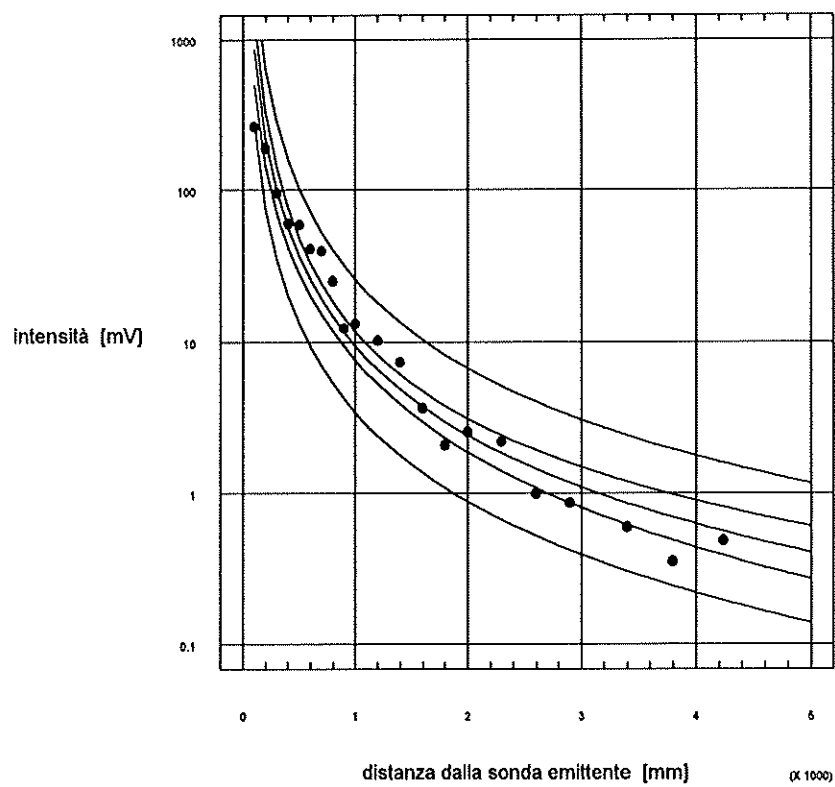
Attenuazione del segnale - trave 9



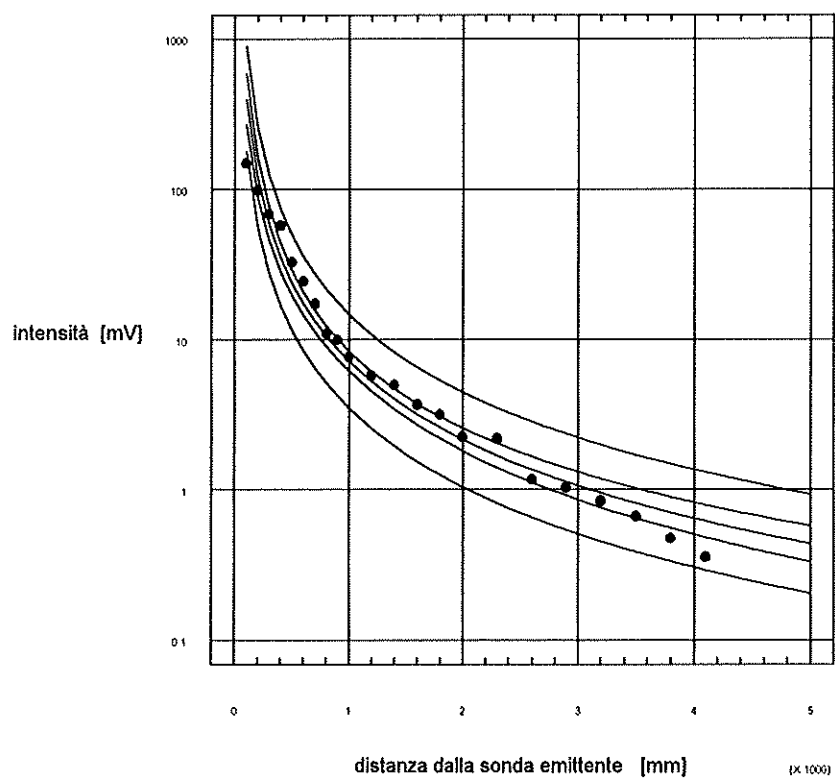
Attenuazione del segnale - trave 10



Attenuazione del segnale - trave 11



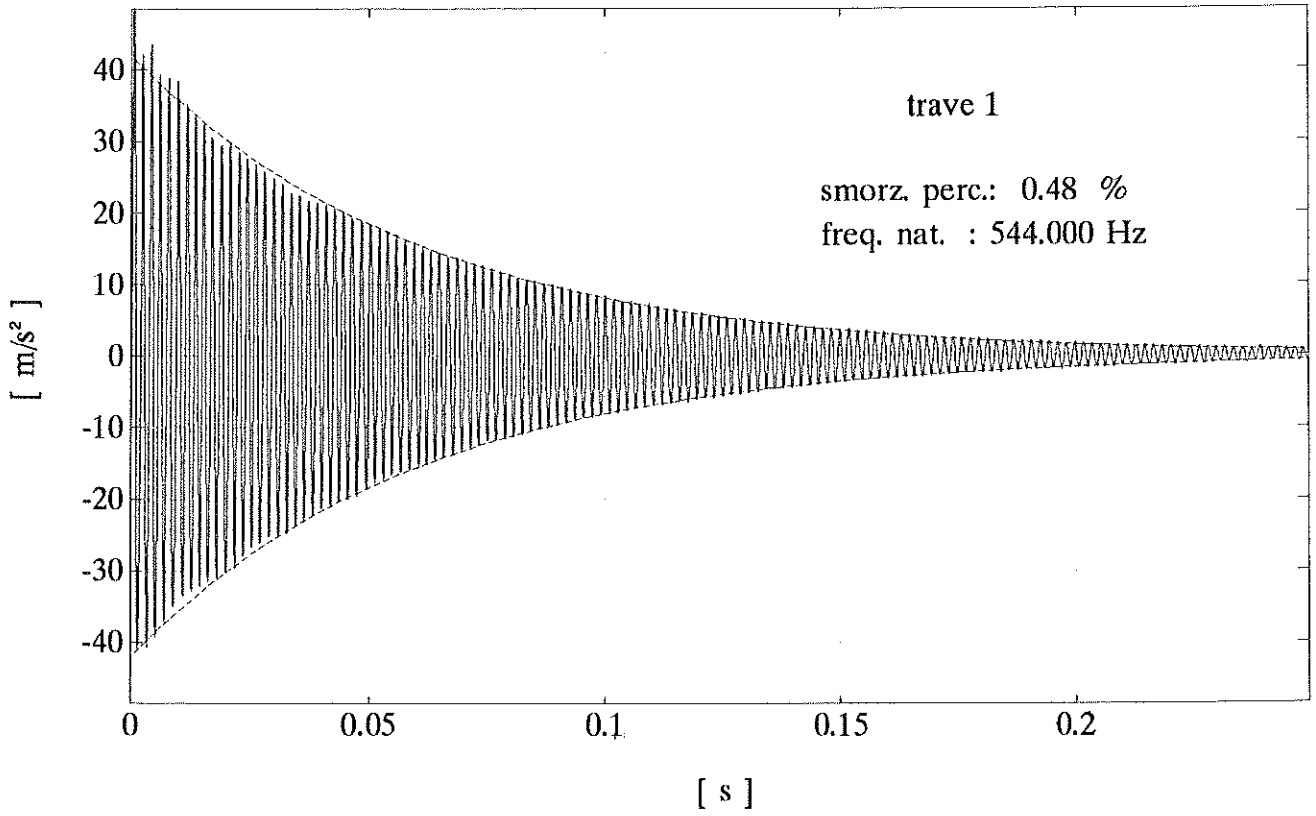
Attenuazione del segnale - trave 12



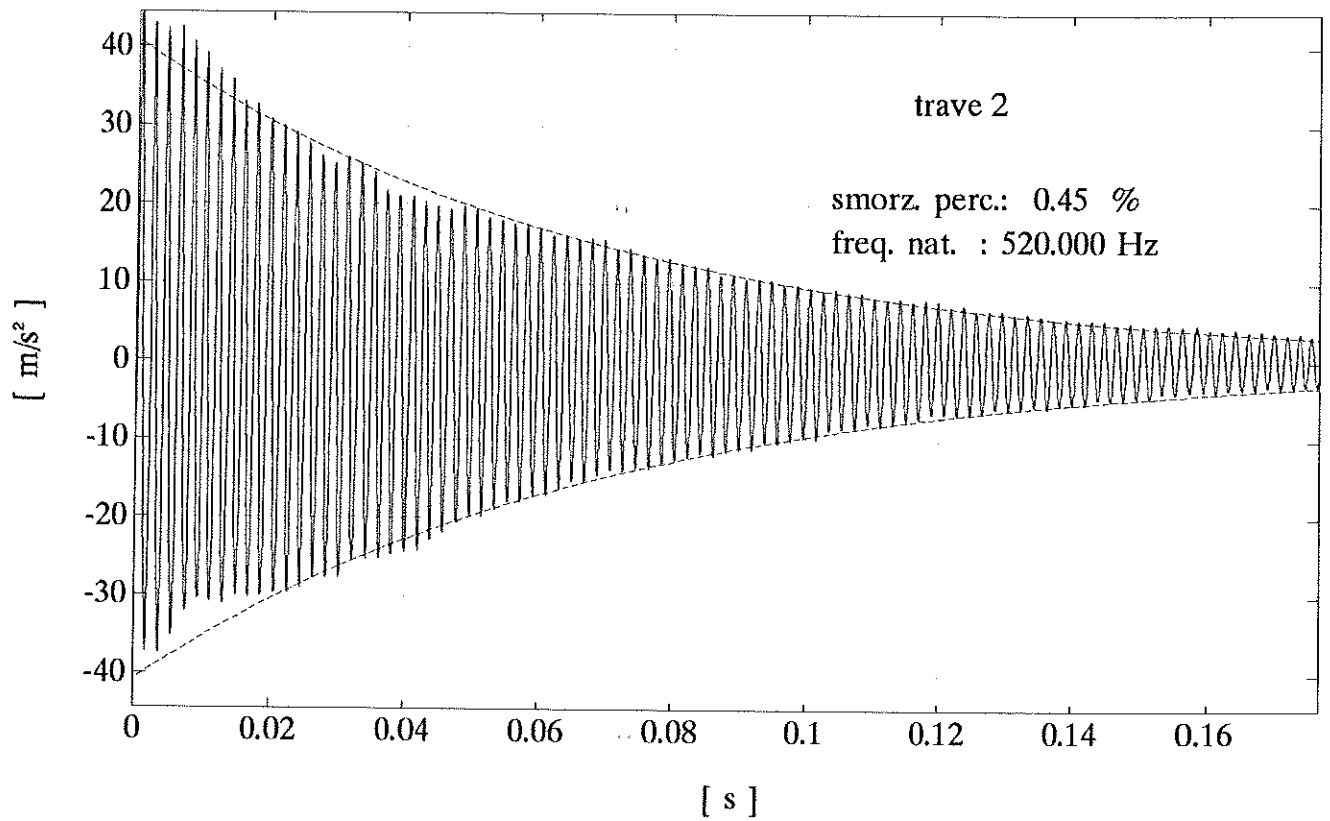
	massa volumica	Misure di vibrazione libera				
		frequenza	E_{fr}	E_{fr}	E_{fr}	smorzamento
		1° modo	1° modo	2° modo	3° modo	1° modo
	kg/m ³	Hz	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
trave 1	480	544	10425	10703	10524	0.480
trave 2	483	520	9266	8861	9675	0.455
trave 3	516	576	14578	14578	14599	0.740
trave 4	464	544	13286	13286	12960	0.495
trave 5	487	568	14051	13741	13517	0.430
trave 6	505	<i>512</i>	11826	11768	11865	0.680
trave 7	464	516	10087	9890	9760	0.420
trave 8	513	576	14488	14174	14070	0.450
trave 9	498	532	13082	13206	12184	0.390
trave 10	478	600	13220	13385	13073	0.500
trave 11	469	<i>512</i>	<i>8719</i>	<i>8719</i>	<i>9327</i>	3.210
trave 12	449	588	13001	13147	13339	<i>0.350</i>

tabella 7. Risultati delle misure di vibrazione libera. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi

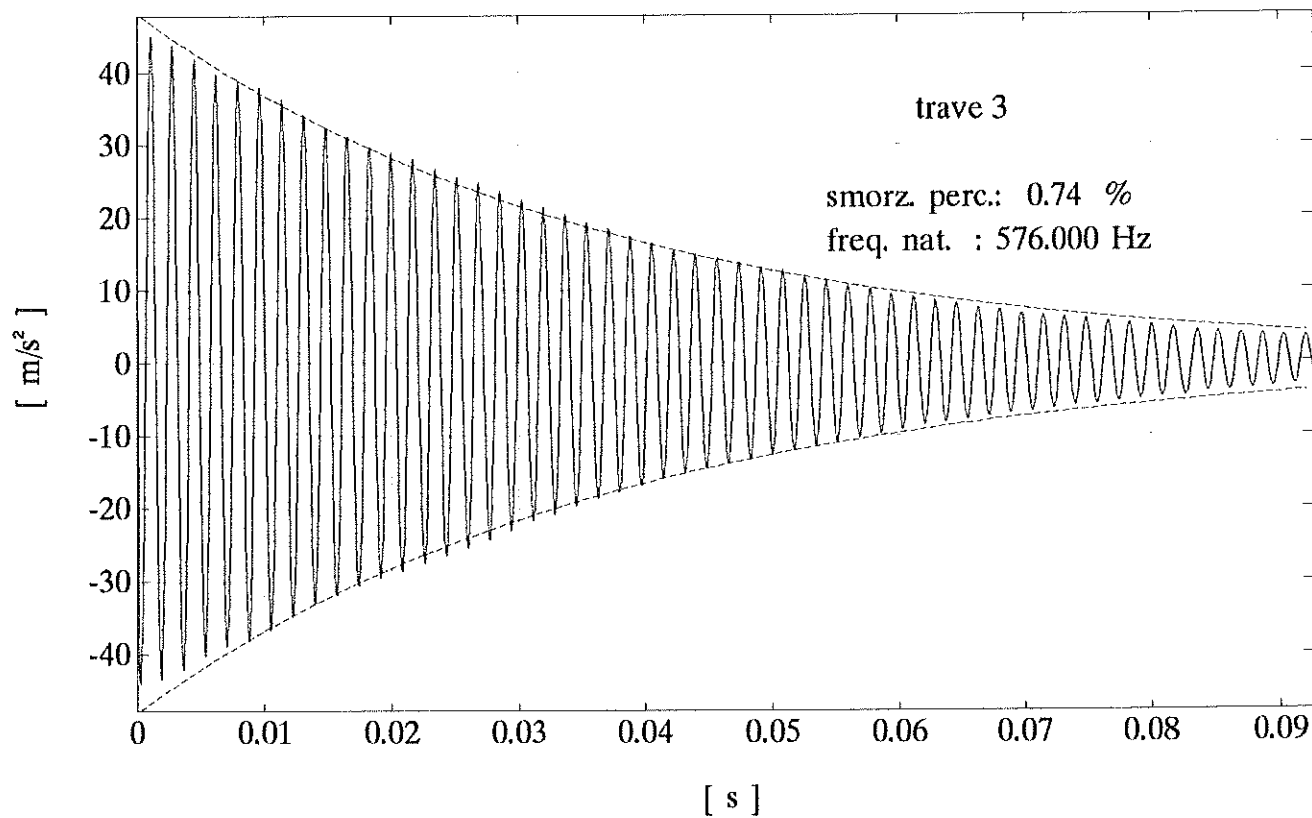
Oscillazioni libere



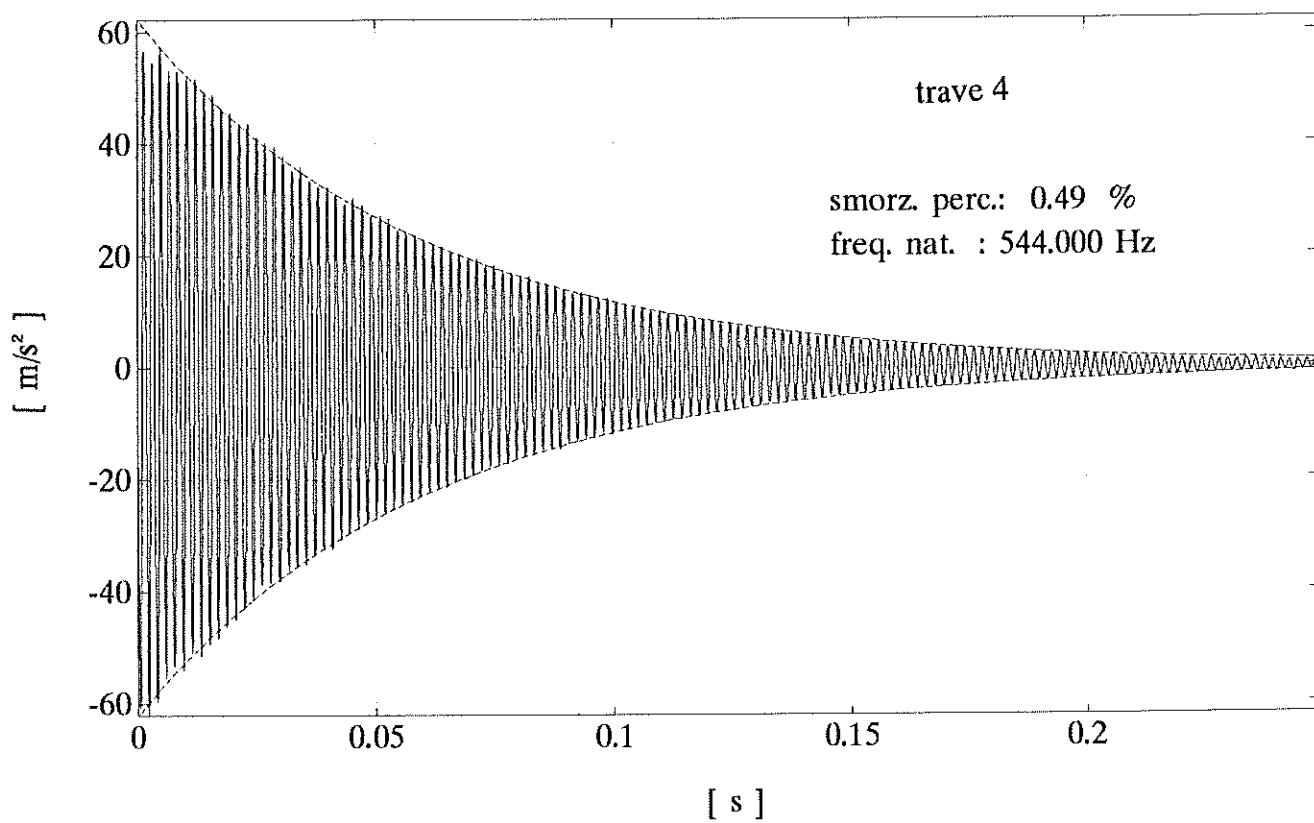
Oscillazioni libere



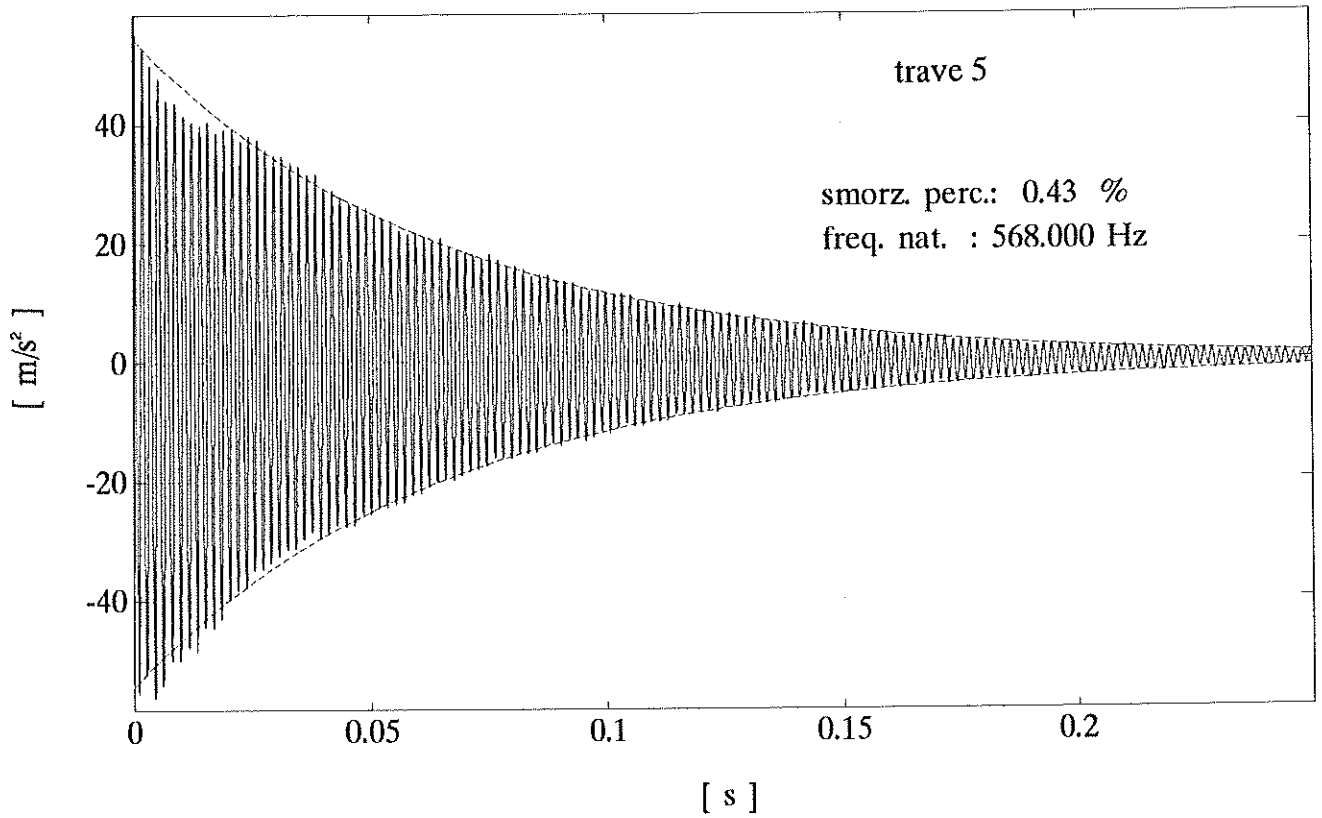
Oscillazioni libere



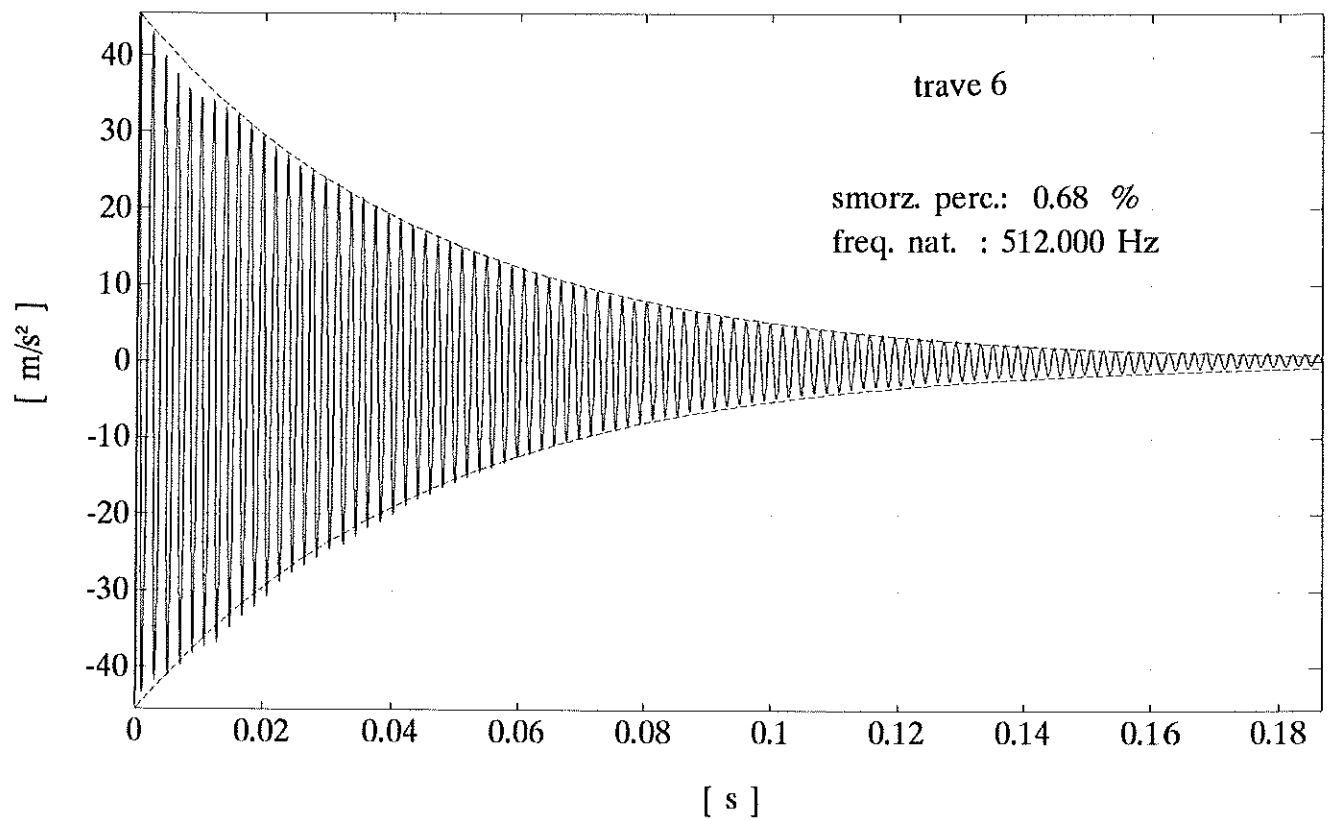
Oscillazioni libere



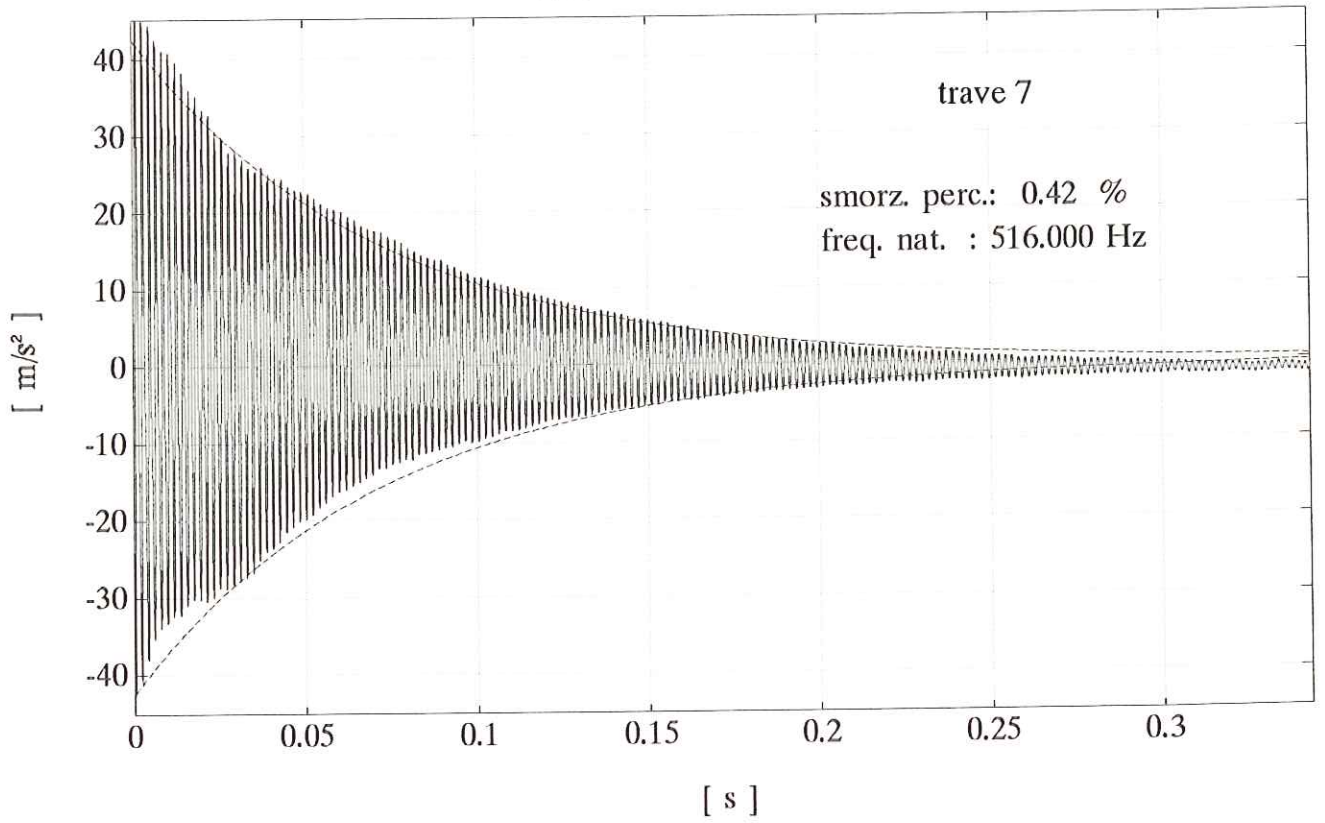
Oscillazioni libere



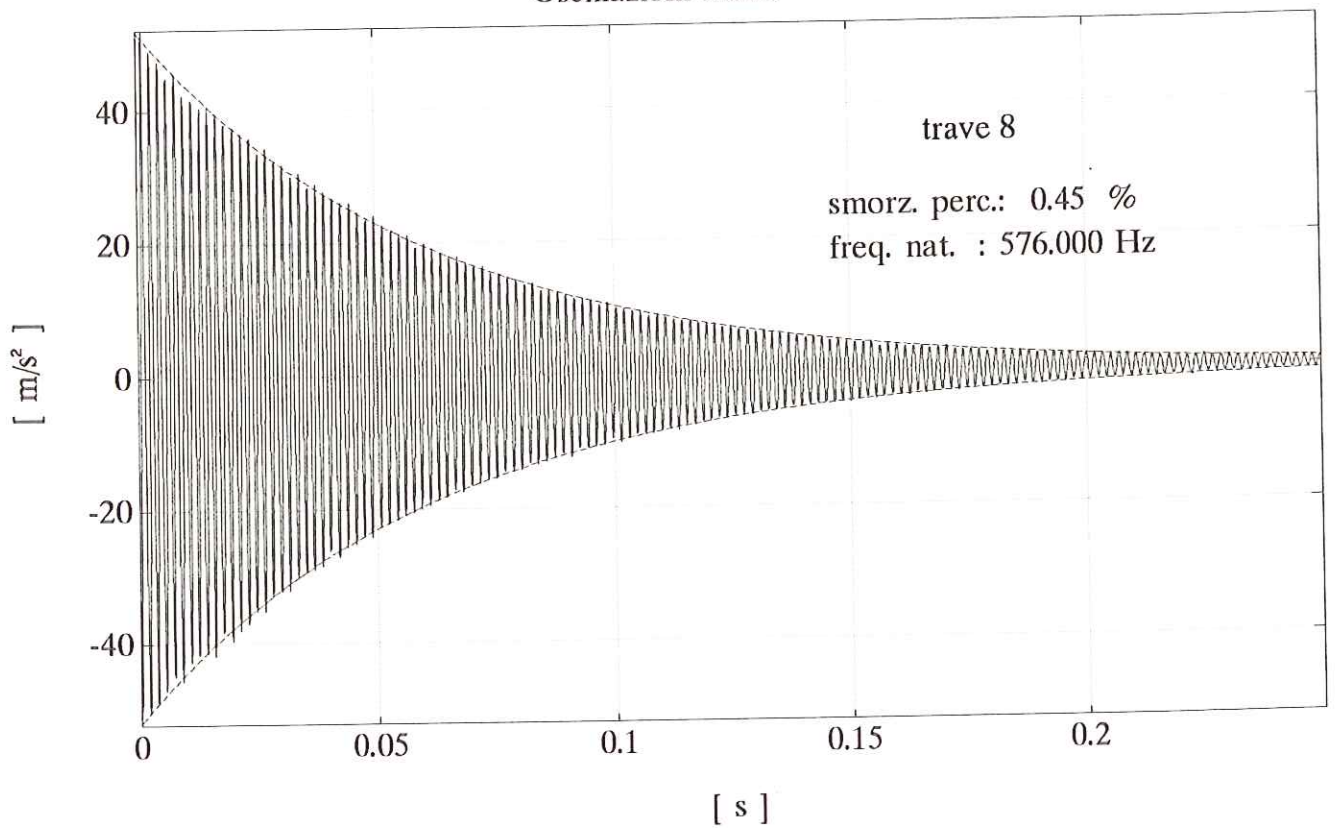
Oscillazioni libere



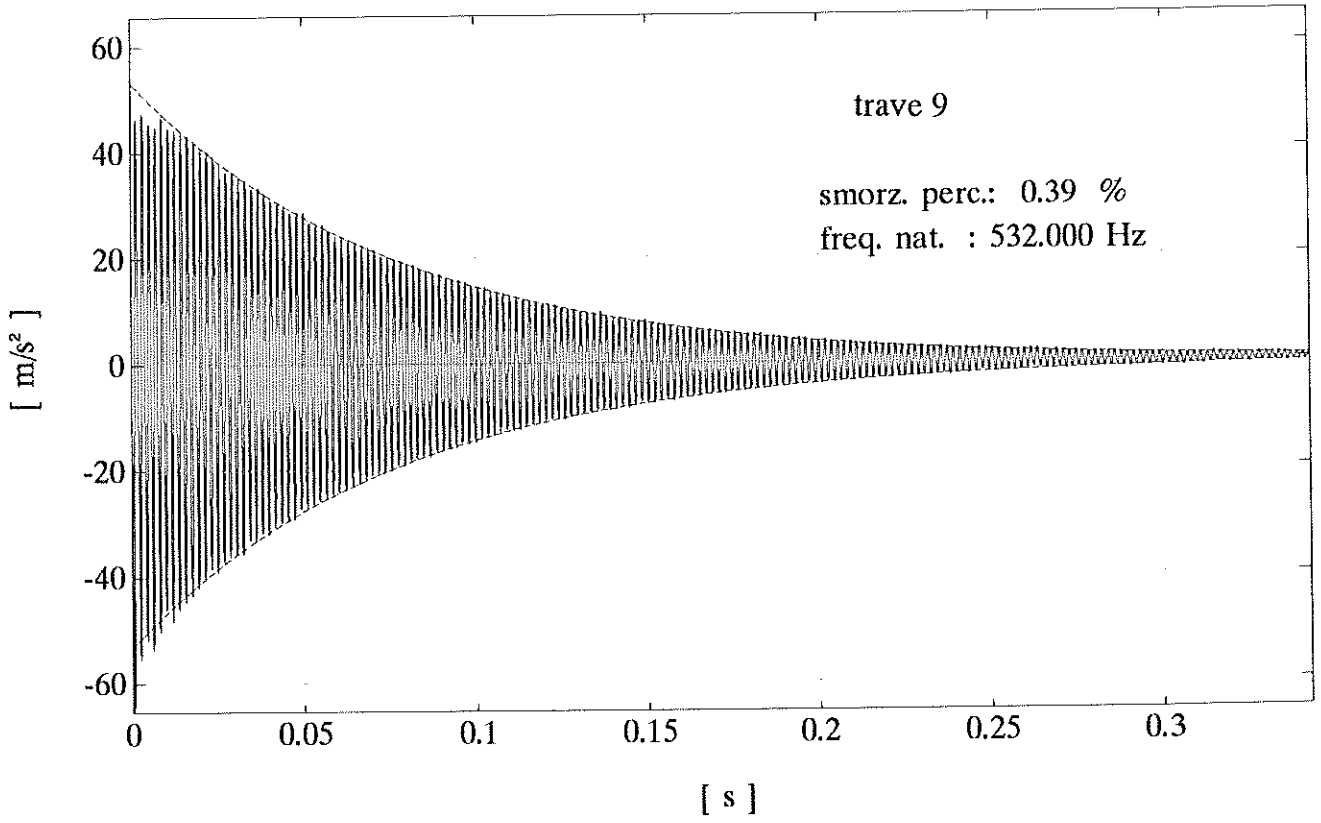
Oscillazioni libere



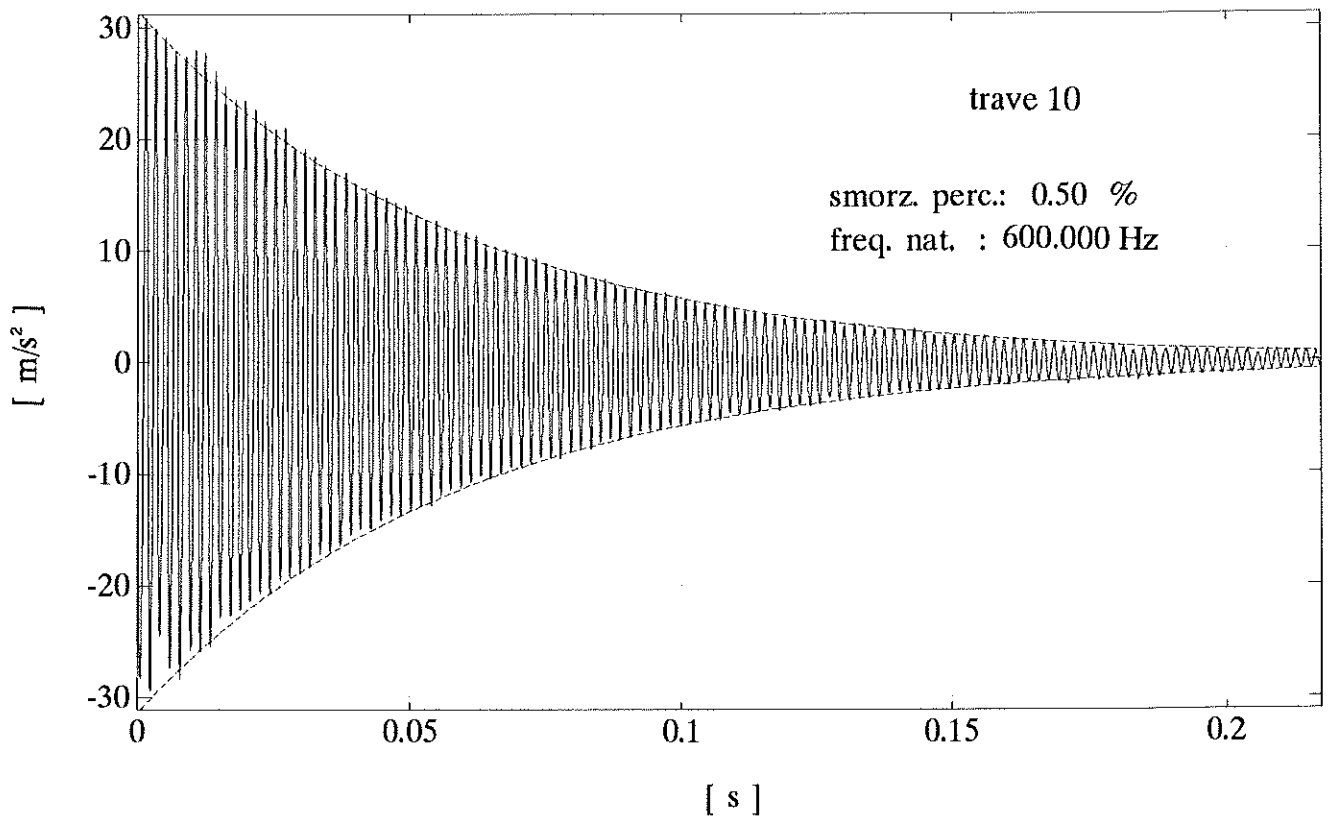
Oscillazioni libere



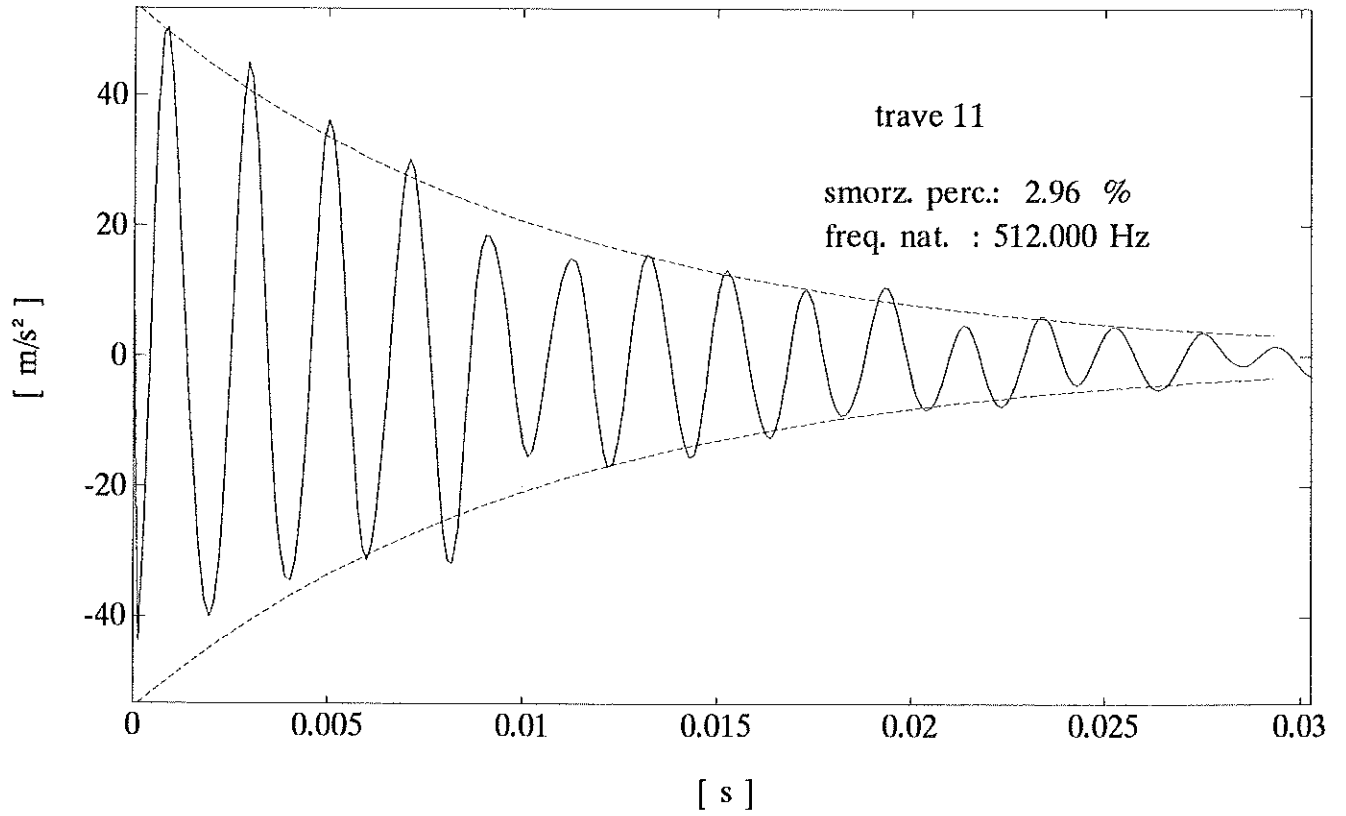
Oscillazioni libere



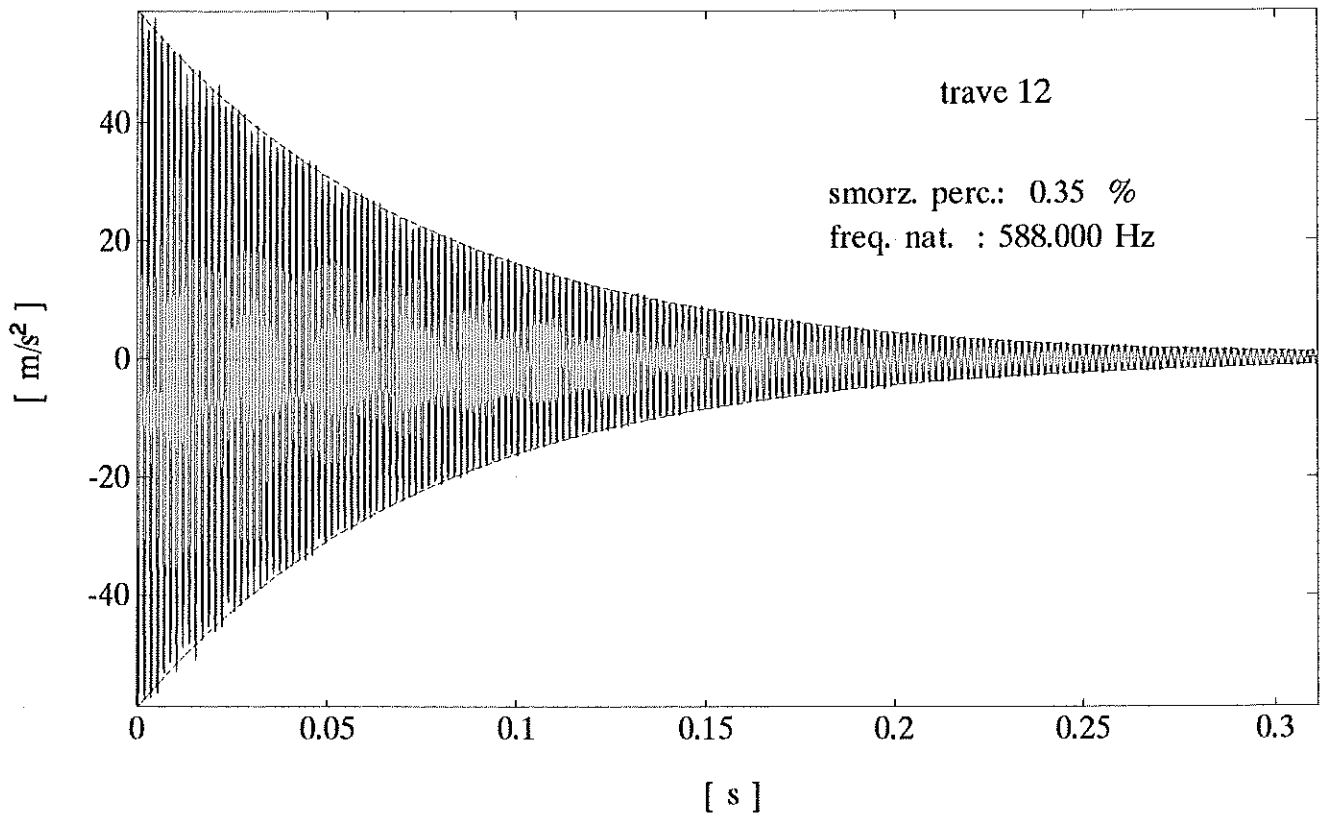
Oscillazioni libere



Oscillazioni libere



Oscillazioni libere



ALLEGATI – PARTE III

Moduli di elasticità per mezzo di prove statiche

- modulo elastico a flessione statica, carico unico centrale
- modulo elastico a flessione statica, carico ripartito su due punti
- modulo di taglio

Modulo elastico a carico unico centrale					
(freccia misurata sull'intradosso)					
Trave n.	E_{app}	$E_{app,m}$	$E_{app,M}$	$E_{app,1/2}$	$E_{app,c}$
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	7063	7635	6139	7528	7365
2	6820	7549	6322	6537	6570
3	10919	11652	10252	11165	10919
4	8929	9483	8534	9483	9183
5	10405	10763	9972	10760	10598
6	7990	8553	7445	7902	8179
7	7689	8463	7307	7527	7485
8	11192	11900	10259	11338	11129
9	9782	10151	9354	10082	9938
10	11313	12221	10515	11526	11311
11	<i>6014</i>	<i>6424</i>	<i>5724</i>	<i>5897</i>	<i>5915</i>
12	8705	9253	8187	8745	9008

tabella 8 – Valori del modulo elastico a flessione statica con carico unico centrale. La freccia utilizzata nella relazione è quella assoluta, misurata sull'intradosso a metà della lunghezza della trave

Modulo elastico a carico unico centrale					
(freccia misurata sull'intradosso)					
Trave n.	E_{app}^*	$E_{app,m}^*$	$E_{app,M}^*$	$E_{app,1/2}^*$	$E_{app,c}^*$
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	7173	7635	6152	7528	7365
2	<i>6820</i>	<i>7549</i>	6322	<i>6537</i>	<i>6570</i>
3	11162	11949	10341	11165	11414
4	9018	9483	8638	9483	9183
5	11009	13801	10055	10760	10598
6	10471	<i>(40210)</i>	7854	17645	14528
7	11642	16941	8915	10869	10649
8	12016	14278	10259	12440	12314
9	9782	10151	9354	10082	9938
10	12159	13740	10965	12206	12248
11	7809	9808	<i>5863</i>	7208	8081
12	8705	9253	8187	8745	9008

tabella 9 – Valori del modulo elastico a flessione statica con carico unico centrale. Il momento d'inerzia è stato calcolato escludendo le porzioni della trave degradate. La freccia è misurata come indicato sopra

N.B. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi. I valori di elasticità e resistenza sono stati ricavati utilizzando momenti d'inerzia e moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione: nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave; m: valore minimo; M: valore massimo; 1/2: valore in mezzzeria; C: valore medio del tratto centrale della trave; *: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Modulo elastico a flessione statica					
(carico unico centrale, freccia relativa misurata sull'asse neutro)					
Trave n.	E_{app,an}	E_{app,an,m}	E_{app,an,M}	E_{app,an,1/2}	E_{app,an,c}
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	7405	8005	6437	7893	7722
2	7257	8032	6726	6956	6990
3	14694	15680	13796	15026	14695
4	10249	10885	9796	10885	10541
5	9483	9809	9088	9807	9658
6	9158	9803	8533	9058	9375
7	6909	7604	6566	6763	6725
8	10541	11209	9663	10680	10482
9	9267	9617	8862	9552	9415
10	10866	11738	10099	11070	10863
11	<i>5072</i>	<i>5418</i>	<i>4828</i>	<i>4974</i>	<i>4989</i>
12	7522	7996	7075	7556	7784

tabella 10 – Valori del modulo elastico a flessione statica con carico unico centrale. La freccia utilizzata nella relazione è quella relativa, misurata lungo l'asse neutro

Modulo elastico a flessione statica					
(carico unico centrale, freccia relativa misurata sull'asse neutro)					
Trave n.	E_{app,an,*}	E_{app,an,m*}	E_{app,an,M*}	E_{app,an,1/2*}	E_{app,an,c*}
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	7521	8005	6451	7893	7722
2	7257	8032	6726	6956	6990
3	15022	16081	13916	15026	15360
4	10351	10885	9915	10885	10541
5	10033	12578	9164	9807	9658
6	12002	(46089)	9003	(20224)	16652
7	10461	15222	8010	9766	9569
8	11318	13449	9663	11718	11598
9	9267	9617	8862	9552	9415
10	11678	13197	10531	11723	11763
11	<i>6586</i>	<i>8273</i>	<i>4945</i>	<i>6079</i>	<i>6816</i>
12	7522	7996	7075	7556	7784

tabella 11 – Valori del modulo elastico a flessione statica con carico unico centrale. Il momento d'inerzia è stato calcolato escludendo le porzioni della trave degradate. La freccia è misurata come indicato sopra

N.B. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi. I valori di elasticità e resistenza sono stati ricavati utilizzando momenti d'inerzia e moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione: nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave; m: valore minimo; M: valore massimo; 1/2: valore in mezzzeria; C: valore medio del tratto centrale della trave; *: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata.

Modulo elastico a flessione statica					
(carico ripartito su due punti)					
Trave n.	E₀	E_{0,m}	E_{0,M}	E_{0,1/2}	E_{0,c}
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	8689	9393	7554	9261	9061
2	8273	9157	7668	7929	7969
3	18266	19492	17150	18679	18267
4	13048	13858	12472	13858	13420
5	12906	13350	12369	13347	13145
6	10355	11084	9648	10241	10599
7	8102	8918	7700	7932	7887
8	14013	14900	12846	14197	13934
9	11747	12191	11234	12108	11935
10	12243	13226	11379	12473	12240
11	7104	7588	6761	6966	6987
12	11630	12363	10939	11684	12036

tabella 12 – Valori del modulo elastico a flessione statica con carico ripartito su due punti

Modulo elastico a flessione statica					
(carico ripartito su due punti)					
Trave n.	E₀*	E_{0,m}*	E_{0,M}*	E_{0,1/2}*	E_{0,c}*
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	8825	9393	7569	9261	9061
2	8273	9157	7668	7929	7969
3	18674	19990	17299	18679	19094
4	13179	13858	12623	13858	13420
5	13655	17118	12472	13347	13145
6	13569	(52110)	10179	(22866)	18828
7	12268	17851	9394	11453	11221
8	15045	17878	12846	15576	15418
9	11747	12191	11234	12108	11935
10	13159	14870	11866	13209	13254
11	9224	11586	6926	8515	9546
12	11630	12363	10939	11684	12036

tabella 13 – Valori del modulo elastico a flessione statica con carico ripartito su due punti. Il momento d'inerzia è stato calcolato escludendo le porzioni della trave degradate

N.B. Per ogni colonna in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo i valori minimi. I valori di elasticità e resistenza sono stati ricavati utilizzando momenti d'inerzia e moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione: nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave; m: valore minimo; M: valore massimo; 1/2: valore in mezzzeria; C: valore medio del tratto centrale della trave; *: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata.

Modulo di taglio			
Trave n.	G $G = \frac{(1,2 \cdot h^2)}{\left[l^2 \cdot \left(\frac{1}{E_{app}} - \frac{1}{E_0} \right) \right]}$	G $G = \frac{(1,2 \cdot h^2)}{\left[l^2 \cdot \left(\frac{1}{E_{app,an}} - \frac{1}{E_0} \right) \right]}$	(G) $\left(G = \frac{(1,2 \cdot h^2)}{\left[l \cdot l_1 \cdot \left(\frac{1}{E_{app,an}} - \frac{1}{E_0} \right) \right]} \right)$
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	366	486	1944
2	373	568	2270
3	215	596	2503
4	254	429	1890
5	384	255	1124
6	225	511	2247
7	1137	354	1557
8	411	315	1322
9	457	343	1510
10	1256	814	3420
11	274	<i>(124)</i>	522
12	230	142	595

Tabella 14 – Valori del modulo di taglio (calcolati sia con E_{app} che con $E_{app,an}$). Per colonne sono indicati in grassetto i valori massimi ed in corsivo quelli minimi. Alcuni risultati appaiono dubbi (vedi par. 5.3.3)

Allegati – parte IV

Resistenza nella prova di flessione

- grafici carico-deformazione
- descrizione delle modalità di rottura (*)
- carichi massimi
- Modulo di Rottura (MoR)
- sollecitazioni di taglio

*Durante la prova per la determinazione del modulo di rottura alla flessione statica (MoR) sono state annotate le modalità di rottura delle travi con associati i valori salienti, in rapporto all'andamento del diagramma carico-deformazione. Il tipo di rottura è stato ritenuto importante per le informazioni ritraibili sulle caratteristiche del materiale, sulla influenza della difettosità e del degradamento. Inoltre i punti in cui sono avvenuti i cedimenti hanno consentito di risalire ai valori delle tensioni di rottura raggiunte dal legno, sia per la flessione che per il taglio.

N.B.

MoR = modulo di resistenza a flessione calcolato sulla trave intera

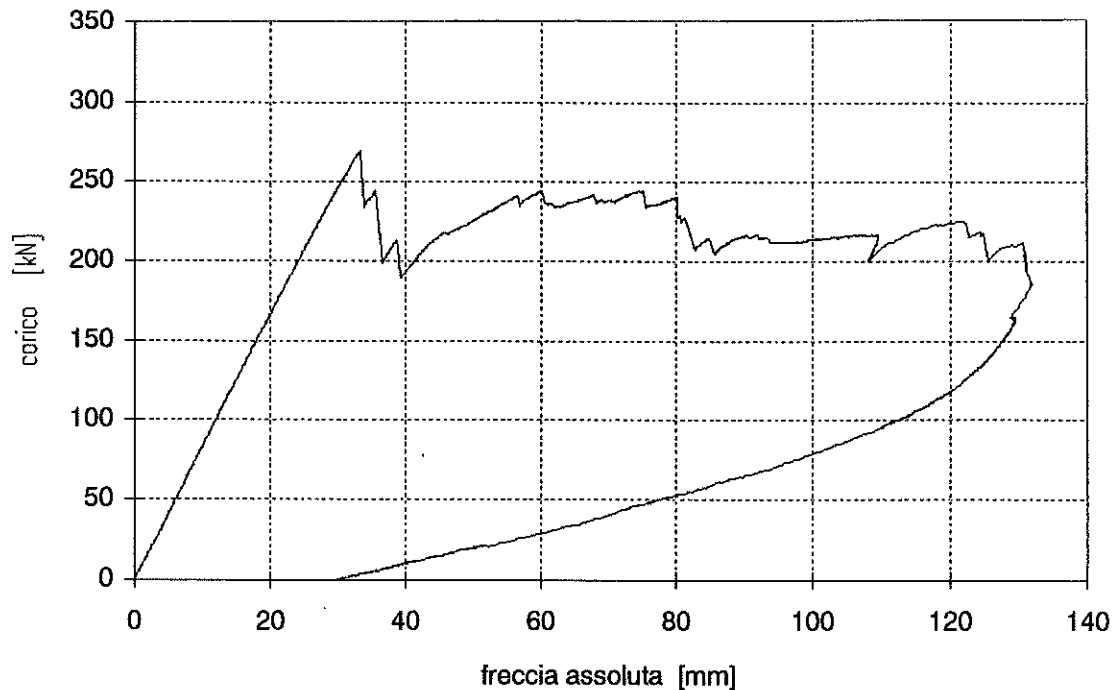
MoR(P)_{max} = modulo di resistenza a flessione calcolato sulla trave parzializzata, valore massimo tra le due parti di trave

MoR(P)_{medio} = modulo di resistenza a flessione calcolato sulla trave parzializzata, valore medio tra le due parti di trave

τ (sez.intera) = sollecitazione tangenziale calcolata sull'intera sezione

τ (sez.netta) = sollecitazione tangenziale calcolata escludendo le fessurazioni da ritiro, ipotizzando materiale omogeneo e simmetria della sezione

grafico carico-deformazione - trave 1



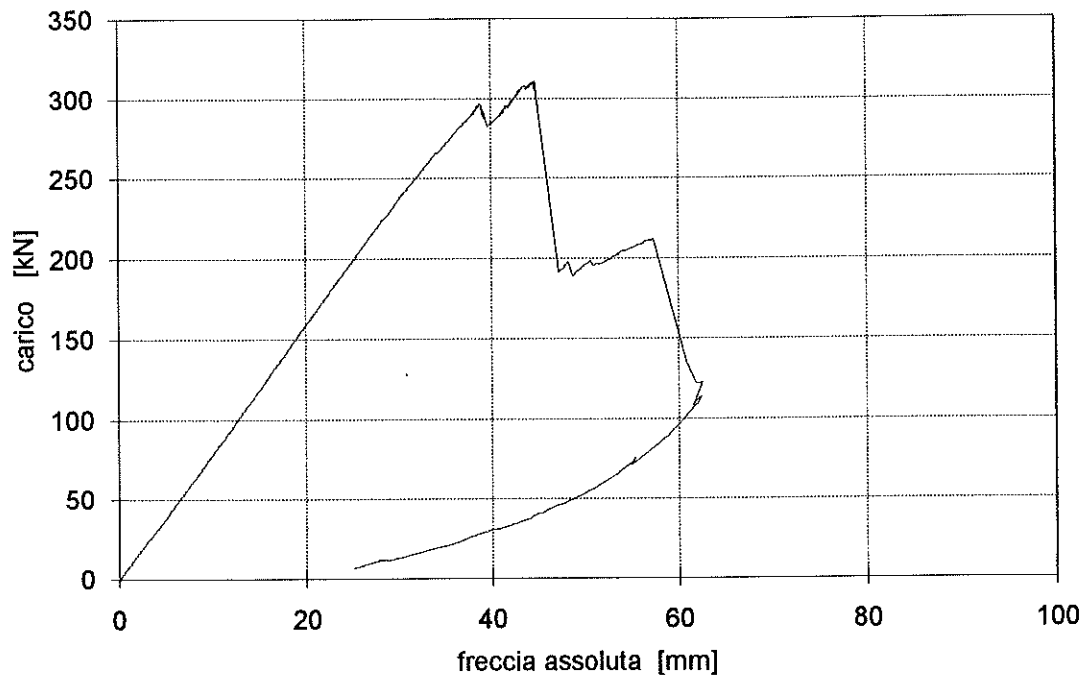
Trave 1

La trave 1, dopo un lungo tratto rettilineo sulla curva carico-deformazione, che ha mostrato la notevole estensione del campo elastico, ha subito una rottura per taglio. Essa è avvenuta presso l'asse neutro, in corrispondenza delle due fessurazioni da ritiro e della parte inferiore della cipollatura, estesa per tutta la lunghezza del provino. La trave ha continuato a reggere alla ripresa del carico, con ininterrotti scorrimenti tra la parte inferiore e superiore, e conseguenti allungamenti dello spacco per il taglio, sino al raggiungimento del 90% del valore massimo. Un ulteriore cedimento per flessione è avvenuto sul lembo teso della porzione di trave inferiore. Il provino ha retto altri aumenti di carico e si è rotto definitivamente all'85% del valore del carico massimo raggiunto. Il cedimento finale è avvenuto sulle parti tese delle due "semitravi".

Le superfici di rottura si sono presentate molto frastagliate ed estese nella direzione longitudinale. Le lesioni per il taglio hanno seguito fedelmente le fessurazioni da ritiro e, presso la mezzeria, hanno deviato verso l'estradosso a causa della deviazione della fibratura. Per questa inclinazione rispetto all'asse longitudinale del segato le separazioni che in testata erano principalmente dovute al taglio, hanno scaricato anche una parte delle tensioni, accumulate per la flessione dalla parte di trave superiore.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
269.31 (valore massimo)	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro e cipollatura	MoR = 25.04 τ (sez.intera) = 1.60 τ (sez.netta) = 2.81
240.47	rottura a flessione su trave parzializzata fibratura deviata, limite di resistenza a trazione	MoR (P) _{massimo} = 54.88 MoR (P) _{medio} = 41.24

Grafico carico-deformazione - trave 2



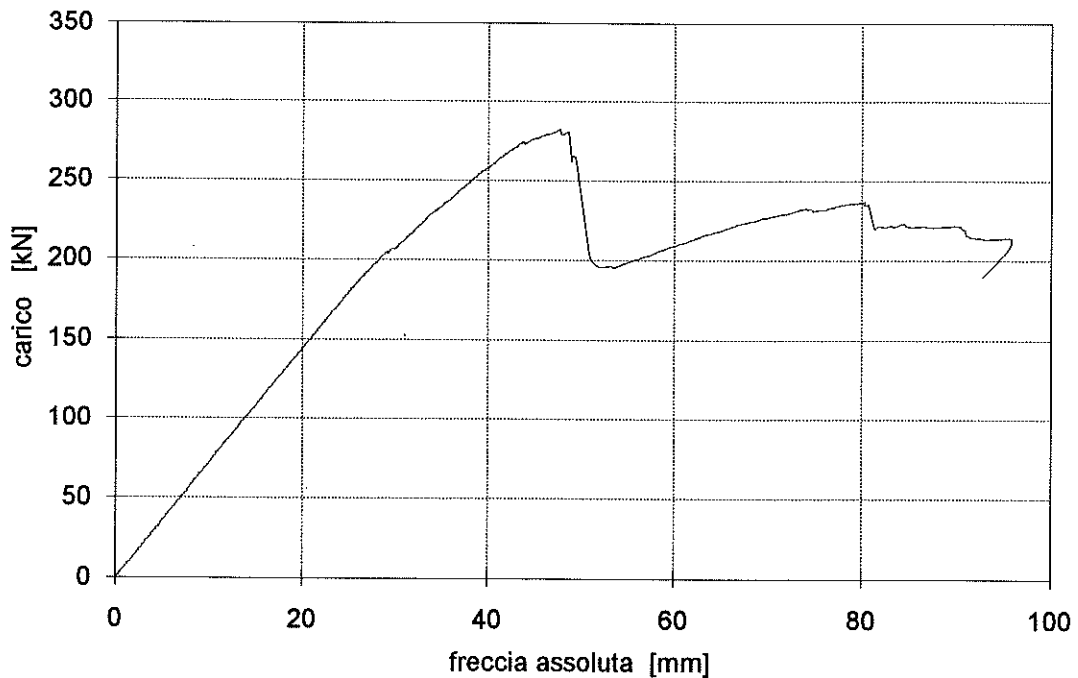
Trave 2

La trave 2 ha avuto un comportamento in parte simile alla 1. Al lungo tratto rettilineo nella curva carico-deformazione è seguita la rottura per scorrimento longitudinale che ha sfruttato il tratto inferiore della cipollatura e una grossa fessurazione da ritiro già presenti. Alla diminuzione di carico la trave non è stata in grado di reagire cedendo per flessione su entrambe le parti di trave, ad un carico uguale al 69% di quello massimo.

La superficie di separazione per il taglio, sulla faccia B, è stata interrotta dai nodi sotto il primo appoggio, mentre sulla faccia D ha potuto proseguire sino alla mezzeria. La seconda rottura, per flessione è avvenuta 20 cm all'esterno del terzo medio, quindi fuori dal tratto con il massimo momento flettente.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
309.86 <small>(valore massimo)</small>	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro e cipollatura	MoR = 28.04 τ (sez.intera) = 1.85 τ (sez.netta) = 3.36
214.36	rottura a flessione su trave parzializzata limite di resistenza a trazione	MoR (P) _{massimo} = 42.73 MoR (P) _{medio} = 38.32

Grafico carico-deformazione - trave 3



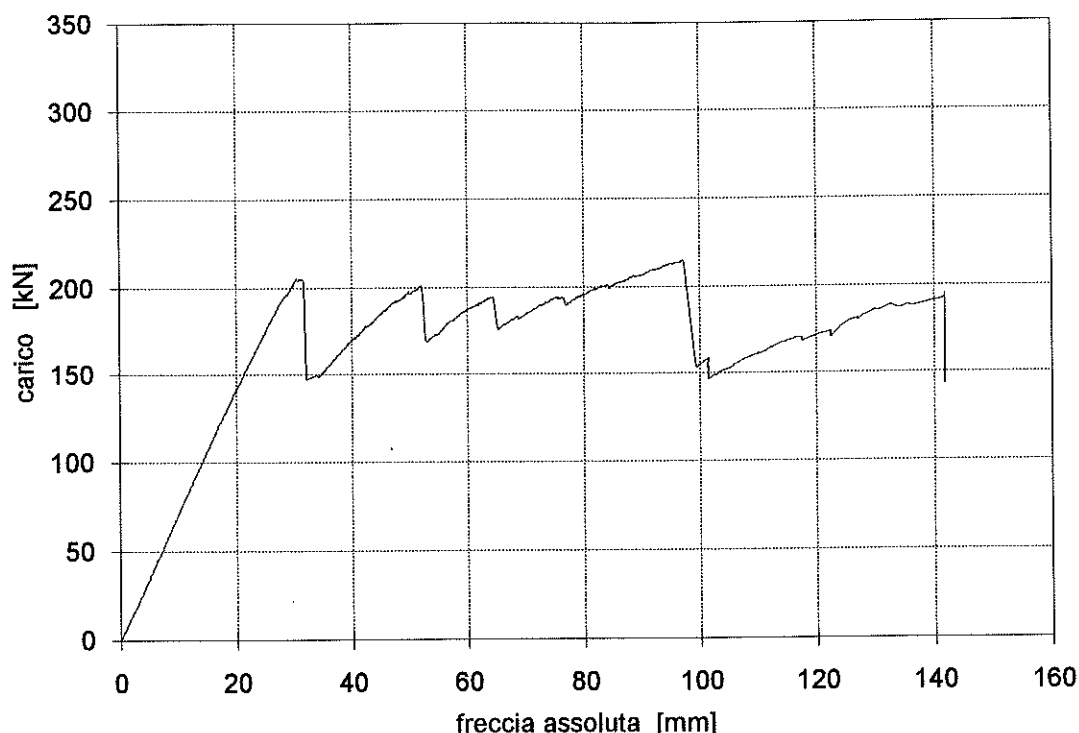
Trave 3

Prima di arrivare alla rottura nella trave 3 si è avuto un tratto in cui si è verificato uno scorrimento tra la parte tesa e quella compressa, visibile solo sulle fessurazioni già presenti e non sulle testate, ma rivelato dalla distribuzione delle emissioni acustiche lungo il provino. Questo comportamento è sfociato nella rottura quasi simultanea per taglio e per flessione. Probabilmente al cedimento per taglio ha fatto seguito una immediata rottura del lembo teso. La prova è stata portata avanti sino a raggiungere l'85% del carico massimo sopportato, a cui è seguita la rottura definitiva. Gli ultimi cedimenti si sono verificati anche nelle zone sottoposte a compressione.

Le fenditure si sono sviluppate prevalentemente in direzione longitudinale, a partire dagli spigoli, seguendo la deviazione locale della fibratura.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
282.46 (valore massimo)	rottura per taglio e istantaneamente rottura a flessione per fessurazioni da ritiro e deviazione della fibratura	MoR = 39.55 τ (sez.intera) = 2.22 τ (sez.netta) = 7.51 MoR (P) _{massimo} = 86.23 MoR (P) _{medio} = 80.56

Grafico carico-deformazione - trave 4



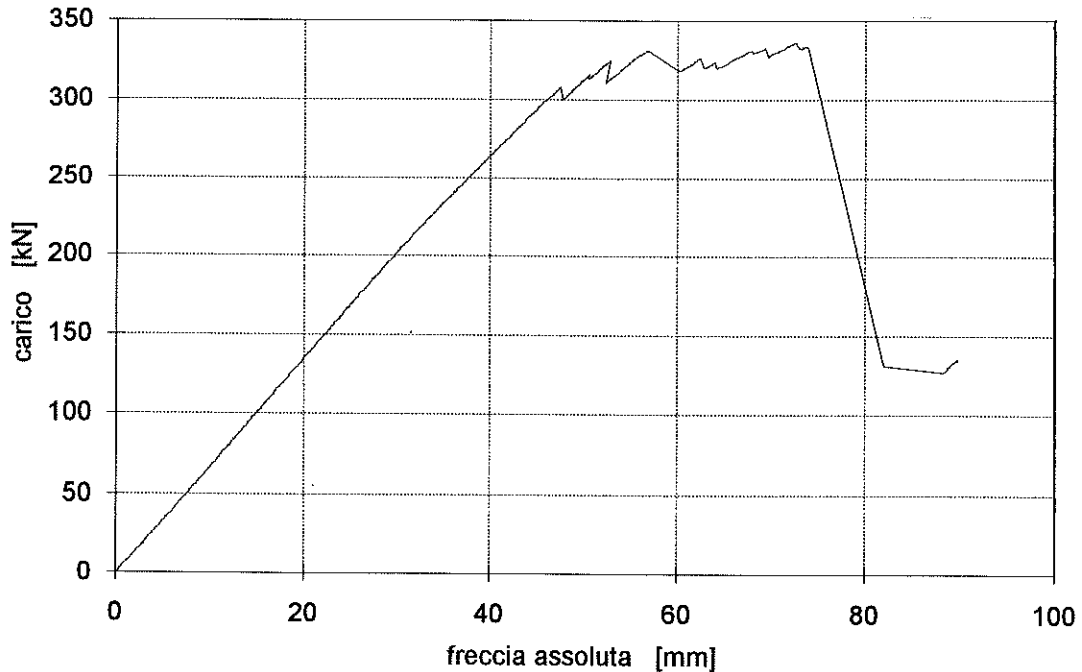
Trave 4

La prima rottura è avvenuta per taglio sulle due fessurazioni da ritiro sul lato B e D e sulla cipollatura. Circa allo stesso carico si sono verificati altri due cedimenti sulle fenditure già presenti. Nella prosecuzione della prova le due porzioni di trave hanno recuperato tutto il carico perduto, e quindi hanno subito qualche cedimento a flessione. Ma raggiunto il valore massimo, si è tornati ad un'ulteriore rottura per taglio, originatasi sulla testata opposta a quella precedente. Lo schianto a flessione è arrivato solo dopo, sulle due porzioni di trave ormai divise per tutta la lunghezza del segato, ad un carico uguale al 90% del carico massimo raggiunto in precedenza.

La fenditura, a causa degli sforzi di taglio, seguendo tutte le fessurazioni presenti in prossimità dell'asse neutro, ha unito le due testate. Le rotture per flessione hanno riguardato tutte e due le parti di trave: la "mezza" trave inferiore (dalla parte dell'intradosso) ha subito delle plasticizzazioni delle zone compresse e delle lievi rotture sulla faccia A; nella "mezza" trave superiore si è verificato il cedimento della zona tesa dalla parte del lato B.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
214.98 (valore massimo)	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro e cipollatura	MoR = 25.75 τ (sez.intera) = 1.43 τ (sez.netta) = 3.43
193.75	rottura a flessione su trave parzializzata plasticizzazione delle zone compresse e limite di resistenza a trazione	MoR (P) massimo = 55.50 MoR (P) medio = 45.50

Grafico carico-deformazione - trave 5



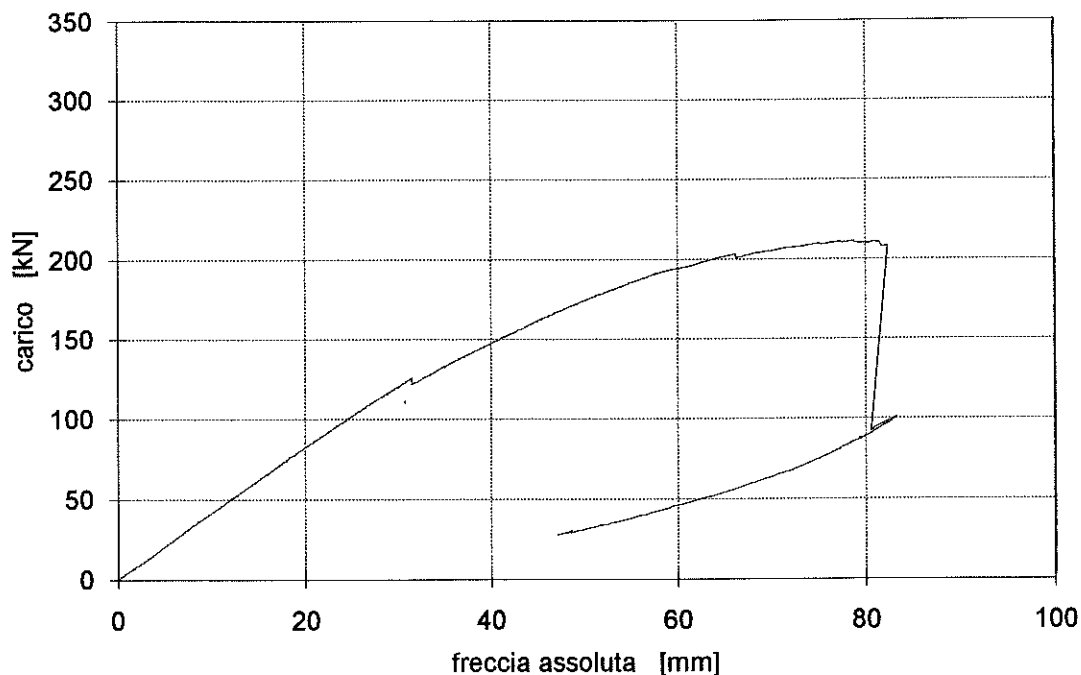
Trave 5

Il grafico carico-deformazione ha mostrato un lungo tratto di campo elastico a cui sono seguiti alcuni schianti in corrispondenza degli spigoli sottoposti a trazione e di un nodo posto sull'intradosso teso. In questo tratto, che si potrebbe identificare con quello a comportamento plastico di altri materiali, tutti i primi sei cedimenti sono stati recuperati sino ad arrivare al carico massimo sul quale è avvenuta una ulteriore apertura delle fessurazioni sulla faccia A (intradosso). A seguito di questa perdita di carico è sopraggiunta una rottura, ad un valore più basso, per scorrimento longitudinale delle fibre, lungo una profonda fessurazione da ritiro presente sul lato D. Le cipollature non hanno influito sulle modalità di rottura.

La maggior parte degli schianti si sono sovrapposti lungo l'intradosso dando origine ad una rete di fratture molto estese.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
336.23 <small>(valore massimo)</small>	rottura a flessione per deviazione della fibratura e resistenza a trazione	MoR = 44.81
333.46	rottura a taglio sulla trave già rotta in corrispondenza di fessurazioni da ritiro	τ (sez.intera) = 2.36 τ (sez.netta) = 6.42

Grafico carico-deformazione - trave 6



Trave 6

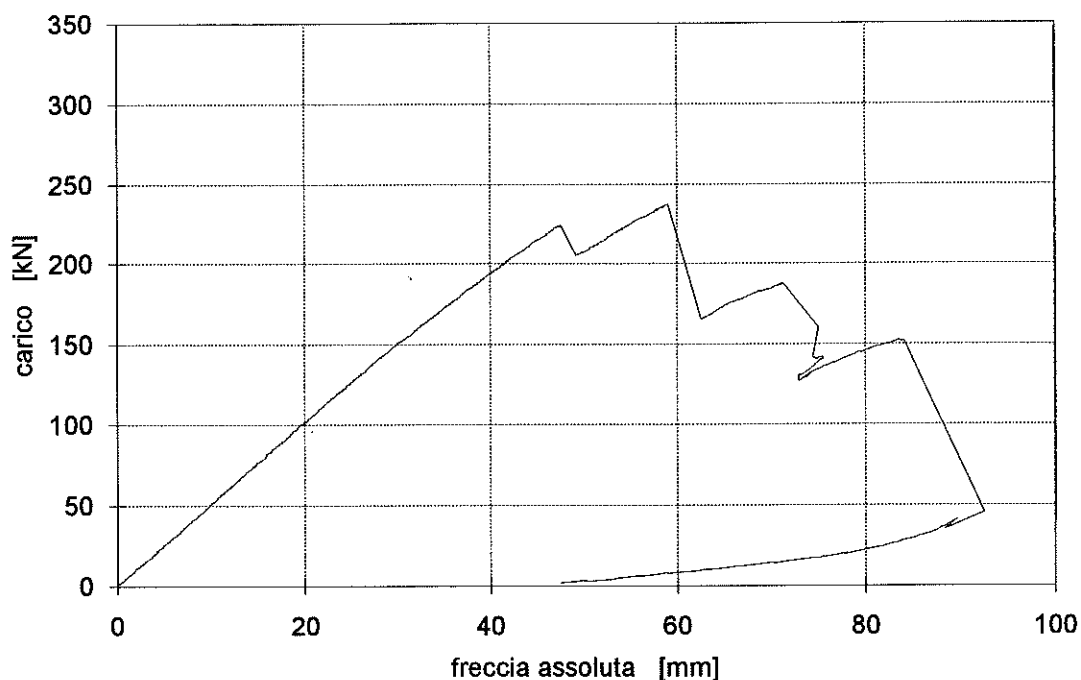
La trave ha ceduto lentamente per il superamento della resistenza a compressione nel tratto in cui era presente del marciume. Questo tipo di cedimento ha condotto ad un tipo di grafico carico-deformazione in cui si è passati lentamente dal campo elastico a quello plastico. La deformazione a compressione ha proseguito nello stesso punto, abbassando l'asse neutro sino al momento in cui i due spigoli del lembo teso, dove era presente del callo cicatriziale, sono saltati per il superamento della resistenza a trazione. Poco dopo ad un carico leggermente più alto la trave si è rotta contemporaneamente a trazione e a compressione.

La trave ha mostrato una scarsa fragilità, sottolineata dalla presenza di un ampio tratto di campo plastico nel diagramma carico-deformazione, a cui è seguita la rottura.

Le superfici di rottura sono apparse poco compenetrante; sulla zona vicina all'estradosso si sono evidenziati ampi tratti di legno che ha ceduto a compressione.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
211.24 (valore massimo)	rottura a flessione per carie del legno nella parte sottoposta a compressione, callo cicatriziale in quella tesa	MoR = 33.87 τ (sez.intera) = 1.68 τ (sez.netta) = 2.27

Grafico carico-deformazione - trave 7



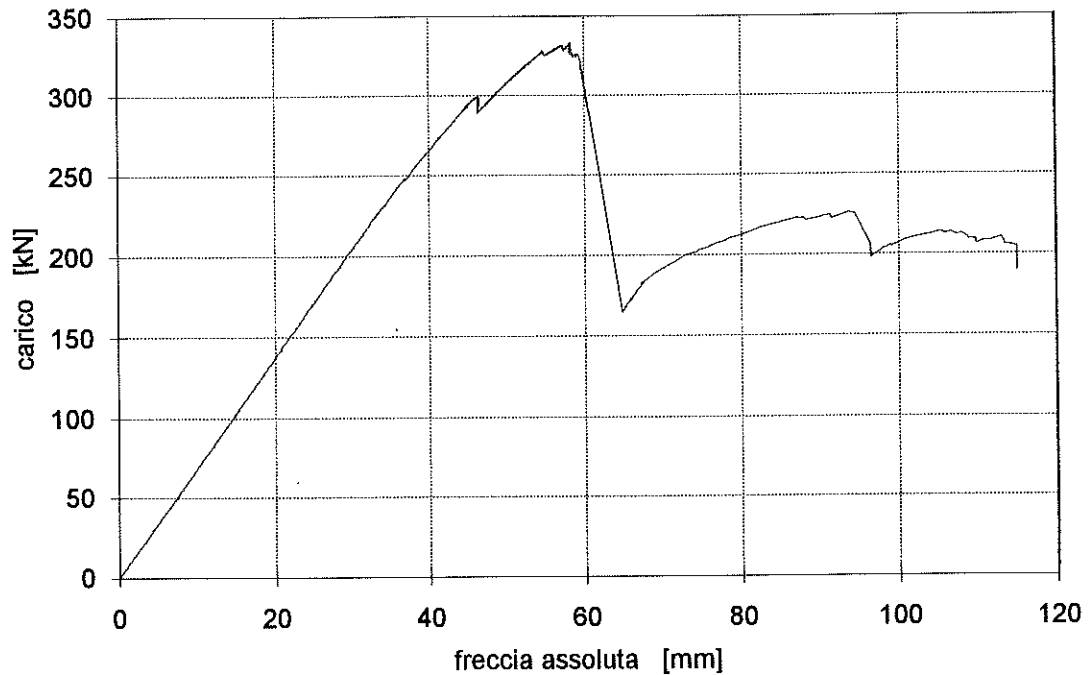
Trave 7

Il provino numero 7 ha avuto un comportamento nettamente fragile. Al limite superiore del campo elastico è incorso nella prima rottura, a causa di un grosso nodo sullo spigolo A-B. In seguito ad un modesto aumento di carico si è rotto definitivamente sullo spigolo opposto a quello in cui era presente il nodo, in corrispondenza di carie diffusa. Lo schianto ha proseguito pressoché verticalmente sulla sezione in prossimità della mezzeria.

Le superfici di rottura sono risultate poco estese, poco compenstrate e si sono propagate più verticalmente che orizzontalmente. Tutto ciò ha indicato una chiara fragilità del materiale.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
237.51 (valore massimo)	rottura a flessione per gruppo di nodi e carie del legno	MoR = 30.88 τ (sez.intera) = 1.72 τ (sez.netta) = 4.73

Grafico carico-deformazione - trave 8



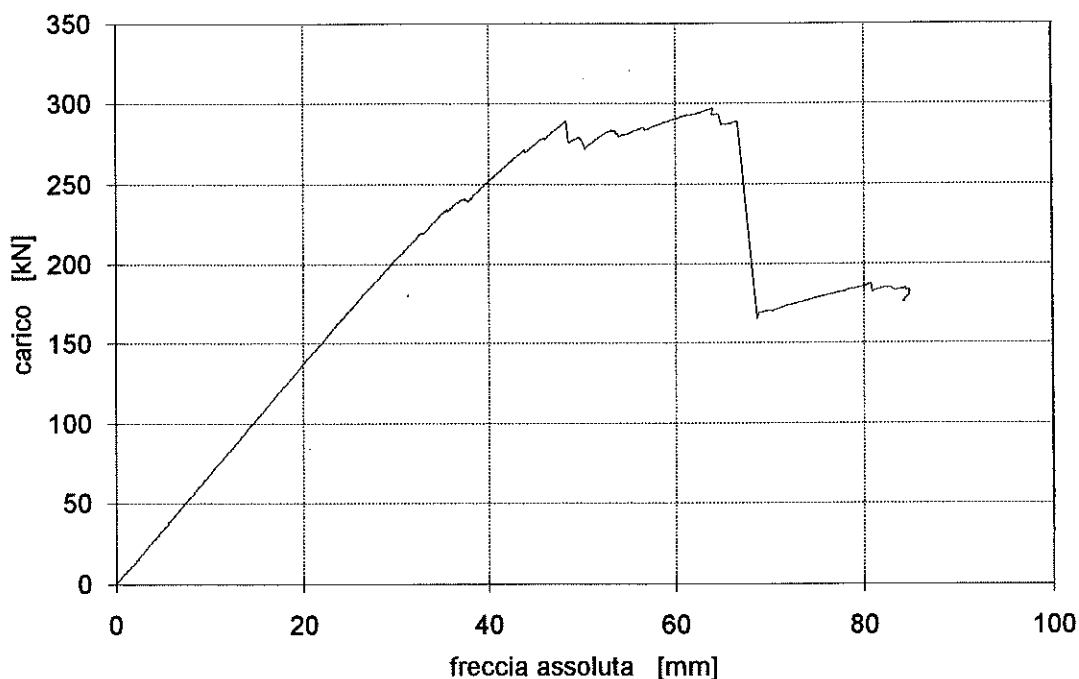
Trave 8

Il tratto di campo elastico è risultato molto lungo e si è concluso alla rottura di una parte delle fibre tese sullo spigolo A-D. All'aumento del carico si è verificata la rottura per taglio. Anche in questo caso, per tutta la sua lunghezza, ha seguito la fessurazione sul lato D, profonda sino al midollo. La trave non è riuscita a far fronte alle ulteriori riprese di carico e si è rotta ancora per taglio. L'attesa rottura per flessione non è avvenuta.

A parte una fessurazione apertasi a partire dallo spigolo A-D, le uniche superfici di rottura sono risultate molto nette e hanno seguito la posizione teorica dell'asse neutro del segato.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
328.54 (valore massimo)	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro	MoR = 46.97 τ (sez.intera) = 2.63 τ (sez.netta) = 7.81
225.88	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro	MoR (P)massimo = 99.51 MoR (P)medio = 69.12

Grafico carico-deformazione - trave 9



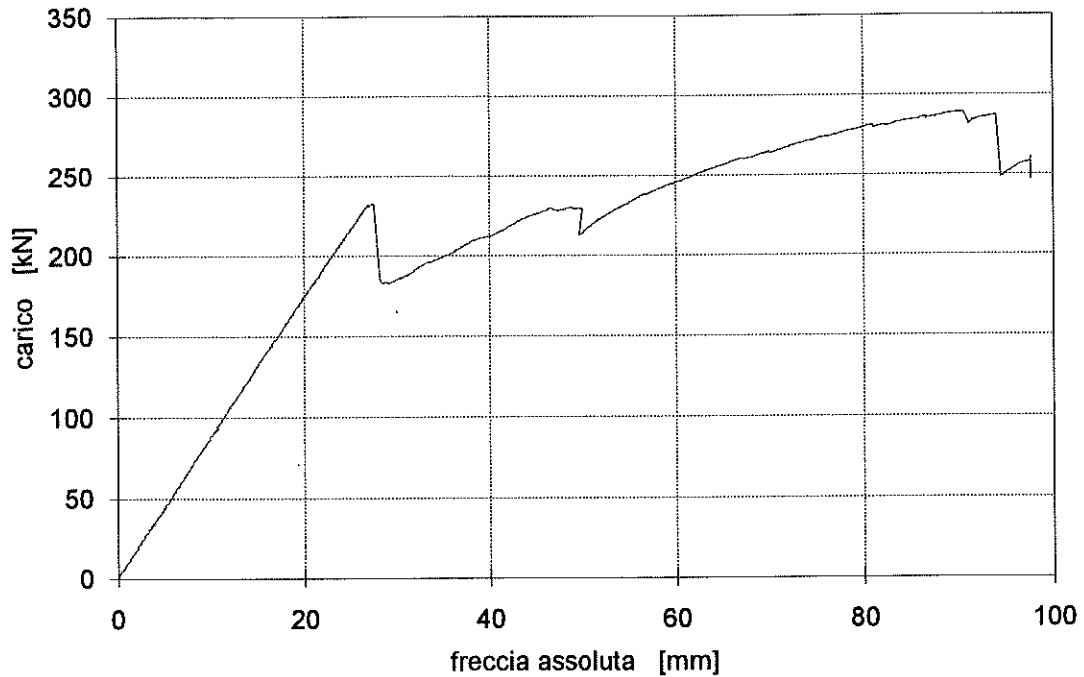
Trave 9

Anche questa trave è giunta a rottura annunciando la fine del campo elastico con numerose emissioni acustiche e lievi collassi. Sulla zona tesa, in corrispondenza dei due grossi nodi sugli spigoli A-B e A-D, si sono succeduti diversi cedimenti. Il più importante è avvenuto simultaneamente su tutti e due e sull'intradosso. A un carico lievemente più basso ciò che rimaneva della trave ha subito una rottura per taglio che ne ha coinvolto i due terzi della lunghezza.

Le superfici di divisione, decorrenti per lunghi tratti longitudinali, sono risultate molto frastagliate, in particolare sulla faccia A. Inoltre in molti punti sono state deviate dai nodi e dalle fessurazioni preesistenti.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
297.01 <small>(valore massimo)</small>	rottura a flessione per nodi e limite di resistenza a trazione	MoR = 38.46
288.74	rottura per taglio in corrispondenza delle fessurazioni da ritiro	τ (sez.intera) = 2.05 τ (sez.netta) = 3.98

Grafico carico-deformazione - trave 10



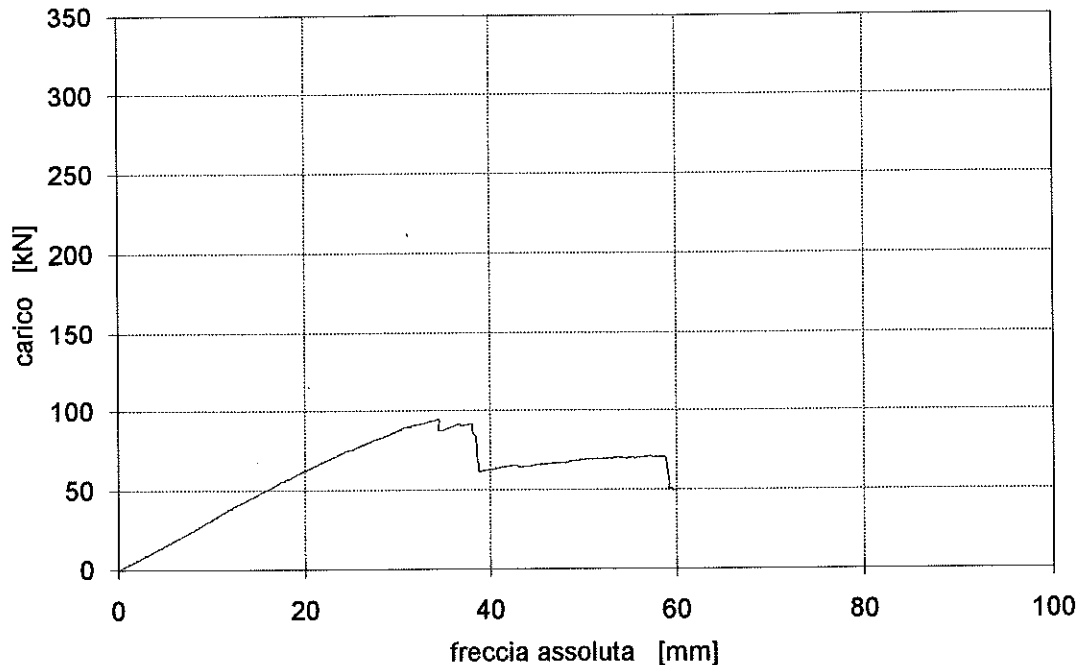
Trave 10

Quando la trave era ancora in campo elastico è avvenuta la rottura per taglio a causa della presenza di due grosse fessurazioni presso l'asse neutro, praticamente contrapposte, che hanno ridotto fortemente la sezione resistente a questo sforzo. Alla prosecuzione della prova le due parti di trave, ormai separate per oltre metà lunghezza, hanno retto un carico uguale al 125% del carico di rottura a taglio. Lo schianto è avvenuto sul lembo teso della porzione inferiore di trave, in prossimità della mezzeria.

La superficie di separazione dovuta al taglio è risultata netta e coincidente con le due fessurazioni da ritiro, quella per la flessione si è concentrata sul lembo teso della trave inferiore.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
232.63	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro	τ (sez.intera) = 1.40 τ (sez.netta) = 5.26
289.35 (valore massimo)	rottura a flessione su trave parzializzata plasticizzazione delle zone compresse e limite di resistenza a trazione	MoR = 29.39 MoR (P) _{massimo} = 61.65 MoR (P) _{medio} = 56.62

Grafico carico-deformazione - trave 11



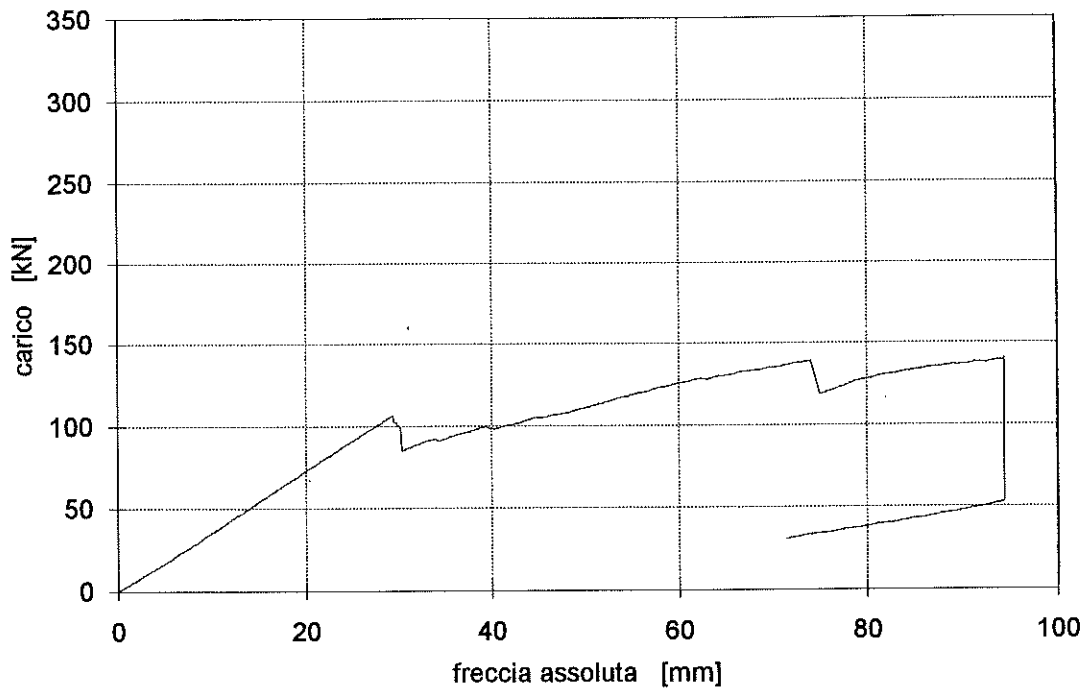
Trave 11

Il provino numero 11 ha dimostrato una scarsissima resistenza: il campo elastico è risultato molto ristretto, ma comunque, prima della rottura, si è avuta una variazione della pendenza della curva carico-deformazione che, assieme a diffuse emissioni acustiche, ha annunciato l'inizio del campo con le deformazioni più che proporzionali. Al primo schianto non è seguita una ripresa del carico. La rottura è avvenuta a partire da un spigolo sulla zona tesa (A-B) obliquamente sulla faccia A. Contemporaneamente sugli altri lati si sono aperte diverse fessurazioni longitudinali dovute principalmente agli sforzi di taglio.

La presenza di diffuso degradamento e di uno spacco sullo spigolo A-B, precedente alla prova di carico, ha provocato questo tipo di comportamento nettamente fragile.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
94.35 (valore massimo)	rottura a flessione per carie del legno e deviazione della fibratura	MoR = 15.32 τ (sez.intera) = 0.80 τ (sez.netta) = 2.08

Grafico carico-deformazione - trave 12



Trave 12

La trave 12, la più piccola del campione, ha subito una rottura per taglio quando ancora era in pieno campo elastico. Il sopraggiungere della rottura è stato preannunciato dai numerosi scricchiolii diffusi lungo tutto il segato. Dopo una ripresa del carico si è giunti alla rottura della porzione di trave dalla parte dell'intradosso, sullo spigolo A-D, ad un carico superiore di un terzo a quello della rottura per taglio. Il cedimento definitivo è avvenuto sullo stesso punto ed allo stesso carico dell'ultimo.

La superficie di rottura per taglio è netta e segue precisamente due fessurazioni da ritiro presenti sui lati D e B. La rottura del lembo teso ha messo in luce delle fibre molto compenstrate.

carico [kN]	tipo e cause di rottura	tensioni [N/mm ²]
103.12	rottura per taglio in corrispondenza di fessurazioni da ritiro	τ (sez.intera) = 1.16 τ (sez.netta) = 2.43
140.73 (valore massimo)	rottura a flessione su trave parzializzata limite di resistenza a trazione	MoR = 30.06 MoR (P) massimo = 64.41 MoR (P) medio = 58.34

	carico (massimo)	Sollecitazione di flessione			Sollecitazione di taglio	
		trave intera	trave parzializzata		sezione intera	sezione ridotta
		MoR	MoR max	MoR medio		
		kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
trave 1	269.31	25.0	54.9	41.2	1.60	2.81
trave 2	309.86	28.0	42.7	38.3	1.85	3.36
trave 3	282.46	39.6	86.2	80.6	2.22	7.51
trave 4	214.98	25.8	55.5	45.5	1.43	3.43
trave 5	336.23	44.8	(44.8)	(44.8)	2.36	6.42
trave 6	211.14	33.9	(33.9)	(33.9)	1.68	2.27
trave 7	237.51	30.9	(30.9)	(30.9)	(1.72)	(4.73)
trave 8	328.54	47.0	99.5	69.1	2.63	7.81
trave 9	297.01	38.5	(38.5)	(38.5)	2.05	3.98
trave 10	289.35	29.4	61.7	56.6	1.40	5.26
trave 11	<i>94.35</i>	<i>15.3</i>	<i>(15.3)</i>	<i>(15.3)</i>	<i>(0.80)</i>	<i>(2.08)</i>
trave 12	140.73	30.1	66.4	58.3	1.16	2.43
media		32.36	52.53	46.08	1.74	4.34

tabella 15 – Moduli di rottura calcolati sulle travi intere e sulle travi parzializzate; valori di resistenza a taglio calcolati considerando le sezioni intere e corrette per le fessurazioni. Per ogni colonna, in grassetto sono riportati i valori massimi, in corsivo quelli minimi. Tra parentesi sono indicati i valori di tensione massima raggiunti per la sollecitazione di taglio, senza giungere alla rottura

ALLEGATI – PARTE V

Elaborazioni statistiche

- tabelle dei coefficienti di correlazione
- tabelle e grafici relativi alle regressioni semplici
- tabelle e grafici relativi alle regressioni multiple

Correlazioni										
Resistenza – Elasticità										
(prove di flessione statica)										
	E_0	$E_{0,m}$	$E_{0,M}$	$E_{0,1/2}$	$E_{0,C}$	E_{0*}	$E_{0,m*}$	$E_{0,M*}$	$E_{0,1/2*}$	$E_{0,C*}$
MoR	0.65	0.64	0.65	0.63	0.64	0.66	n.s.	0.66	n.s.	n.s.
MoR_m	0.64	0.63	0.63	0.61	0.62	0.66	n.s.	0.65	n.s.	n.s.
MoR_M	0.65	0.64	0.65	0.63	0.64	0.67	n.s.	0.67	n.s.	n.s.
MoR_{1/2}	0.68	0.66	0.67	0.66	0.6	0.68	n.s.	0.68	n.s.	n.s.
MoR_C	0.66	0.65	0.66	0.65	0.65	0.67	n.s.	0.67	n.s.	n.s.
MoR*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.65	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.78	0.65
MoR*_M	n.s.	n.s.	0.60	n.s.	n.s.	0.67	n.s.	0.63	n.s.	n.s.
MoR*_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.61	0.72	n.s.	0.78	0.72
MoR*_C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.65	0.65	n.s.	0.74	0.71
MoR(P)_{max}	<i>0.84</i>	<i>0.85</i>	<i>0.81</i>	<i>0.82</i>	<i>0.82</i>	0.77	n.s.	<i>0.80</i>	n.s.	0.60
MoR(P)_{1/2}	<i>0.87</i>	<i>0.88</i>	<i>0.84</i>	<i>0.86</i>	<i>0.86</i>	0.73	n.s.	<i>0.82</i>	n.s.	n.s.
MoR(P)_{medio}	<i>0.89</i>	<i>0.90</i>	<i>0.86</i>	<i>0.87</i>	<i>0.88</i>	0.76	n.s.	<i>0.84</i>	n.s.	n.s.

Tabella 16 – Correlazioni tra resistenza ed modulo elastico a flessione statica, carico ripartito su due punti. I valori di r compresi tra 0.8 e 0.89 (*abbastanza significativi*) sono indicati in corsivo, se maggiori o uguali a 0.9 (*molto significativi*) in grassetto; n.s.: dato *non significativo*

I valori di elasticità e resistenza sono stati ricavati utilizzando momenti d'inerzia e moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione: nessun segno al piede; valore medio di I sull'intera trave,
m: valore minimo,
M: valore massimo,
1/2: valore in mezzera
C: valore medio del tratto centrale della trave.,
*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.4.1) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:
(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,
(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,
(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Correlazioni

Resistenza a flessione – Moduli elastici con metodi ultrasonici (in direzione longitudinale)

	$E_{us45, medio}$	$E_{us45, min}$	$E_{us45, medmin}$	$E_{us0, medio}$	$E_{us0, min}$	$E_{us0, medmin}$
MoR	0.69	0.67	0.67	0.78	<i>0.88</i>	<i>0.83</i>
MoR_m	0.68	0.66	0.67	0.76	<i>0.87</i>	<i>0.81</i>
MoR_M	0.69	0.67	0.68	0.78	<i>0.89</i>	<i>0.84</i>
MoR_{1/2}	0.72	0.70	0.70	<i>0.80</i>	0.90	<i>0.85</i>
MoR_C	0.70	0.68	0.68	<i>0.80</i>	<i>0.89</i>	<i>0.85</i>
MoR*	n.s.	n.s.	n.s.	0.65	0.76	0.70
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_M	0.63	0.63	0.63	0.74	<i>0.86</i>	<i>0.80</i>
MoR*_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	0.63	0.67	0.63
MoR*_C	n.s.	n.s.	n.s.	0.66	0.71	0.67
MoR(P)_{max}	<i>0.81</i>	0.71	0.73	0.76	0.70	0.74
MoR(P)_{1/2}	<i>0.86</i>	0.78	<i>0.80</i>	0.76	0.71	0.72
MoR(P)_{medio}	<i>0.87</i>	0.78	<i>0.80</i>	0.79	0.73	0.76

Tabella 17 – Correlazioni tra resistenza e moduli elastici determinati per mezzo degli ultrasuoni. I valori di r compresi tra 0.8 e 0.89 (*abbastanza significativi*) sono indicati in corsivo, se maggiori o uguali a 0.9 (*molto significativi*) in grassetto; n.s.: *non significativo*

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:

nessun segno al piede; valore medio di I sull'intera trave,

m: valore minimo,

M: valore massimo,

1/2: valore in mezzera

C: valore medio del tratto centrale della trave.,

*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:

(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,

(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,

(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Per i moduli elastici riportati gli indici sono i seguenti:

45: trasduttori a 45° rispetto alla direzione della fibratura,

0: trasduttori allineati alla direzione della fibratura,

medio: valore medio,

min: valore min,

medmin: valore medio tra i più bassi individuati.

Correlazioni												
Resistenza a flessione – velocità di propagazione degli ultrasuoni (in direzione longitudinale)												
	V ₄₅ medio	V ₄₅ min	V ₄₅ max	V ₄₅ ² medio	V ₄₅ ² min	V ₄₅ ² max	V ₀ medio	V ₀ min	V ₀ max	V ₀ ² medio	V ₀ ² min	V ₀ ² max
MoR	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.64	0.78	n.s.	0.63	0.78	n.s.
MoR_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.62	0.77	n.s.	0.61	0.77	n.s.
MoR_M	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.65	<i>0.80</i>	n.s.	0.64	<i>0.80</i>	n.s.
MoR_{1/2}	0.62	0.62	n.s.	0.61	0.6	n.s.	0.66	<i>0.80</i>	n.s.	0.66	<i>0.80</i>	n.s.
MoR_C	0.61	0.60	n.s.	0.6	n.s.	n.s.	0.66	<i>0.80</i>	n.s.	0.66	<i>0.80</i>	n.s.
MoR*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.6	n.s.	n.s.	0.67	n.s.	n.s.	0.66	n.s.
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.63	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_M	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.61	n.s.	0.61	0.78	n.s.	0.6	0.78	n.s.
MoR*_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.60	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{max}	0.73	0.63	0.66	0.65	0.67	0.66	0.66	0.62	0.63	0.62	0.63	0.63
MoR(P)_{1/2}	<i>0.83</i>	0.74	0.66	0.74	0.67	0.74	0.73	0.69	0.65	0.69	0.65	0.65
MoR(P)_{medio}	<i>0.83</i>	0.73	0.68	0.84	0.74	0.69	0.75	0.70	0.67	0.75	0.70	0.68

Tabella 18 – Correlazioni tra resistenza a flessione statica e velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione longitudinale. I valori compresi tra 0.8 e 0.89 (*abbastanza significativi*) sono indicati in corsivo; n.s.: dati *non significativi*

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:

nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave,

m: valore minimo,

M: valore massimo,

1/2: valore in mezz'era

C: valore medio del tratto centrale della trave.,

*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:

(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,

(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,

(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Per la velocità degli ultrasuoni gli indici sono i seguenti:

45: trasduttori a 45° rispetto alla direzione della fibratura,

0: trasduttori allineati alla direzione della fibratura,

medio: valore medio,

min: valore minimo,

max: valore massimo.

Correlazioni					
Resistenza a flessione – velocità di propagazione degli ultrasuoni (in direzione trasversale)					
	V_{max}	V_{min}	V_{medio (1)}	V_{medio (2)}	range (M-m)
MoR	0.73	n.s.	0.66	0.73	0.69
MoR_m	n.s.	n.s.	0.68	0.75	0.70
MoR_M	0.77	n.s.	0.69	0.75	0.69
MoR_{1/2}	0.72	n.s.	0.64	0.72	0.67
MoR_C	0.73	n.s.	0.65	0.72	0.69
MoR*	0.75	n.s.	0.76	0.73	0.77
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_M	0.79	n.s.	0.76	0.79	0.73
MoR*_{1/2}	0.67	n.s.	0.65	n.s.	0.66
MoR*_C	0.70	n.s.	0.68	0.60	0.70
MoR(P)_{max}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{medio}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Tabella 19 – Correlazioni tra resistenza a flessione e velocità di propagazione degli ultrasuoni in direzione trasversale. n.s.: valori *non significativi*

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:

nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave,

m: valore minimo,

M: valore massimo,

1/2: valore in mezzera

C: valore medio del tratto centrale della trave.,

*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:

(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,

(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,

(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Per la velocità degli ultrasuoni gli indici sono i seguenti:

medio (1): valore medio da cui sono stati esclusi i valori nulli,

medio (2): valore medio in cui i dati nulli sono stati considerati

min - (m): valore minimo,

max - (M): valore massimo.

Correlazioni				
Resistenza a flessione – Moduli elastici con metodi vibratorii				
	E_{fr} (1° modo)	E_{fr} (2° modo)	E_{fr} (3° modo)	frequenza (1° modo)
MoR	0.74	0.69	0.67	n.s.
MoR_m	0.72	0.67	0.66	n.s.
MoR_M	0.74	0.69	0.67	n.s.
MoR_{1/2}	0.77	0.72	0.70	n.s.
MoR_C	0.76	0.71	0.70	n.s.
MoR*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_M	0.69	0.63	0.60	n.s.
MoR*_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{max}	0.79	0.77	0.82	0.74
MoR(P)_{1/2}	0.80	0.81	0.85	0.86
MoR(P)_{medio}	0.82	0.82	0.87	0.84

Tabella 20 – Correlazioni tra resistenza a flessione e modulo elastico a vibrazione libera in direzione longitudinale. I valori compresi tra 0.8 e 0.89 (*abbastanza significativi*) sono indicati in corsivo

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:

nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave,

m: valore minimo,

M: valore massimo,

1/2: valore in mezzera

C: valore medio del tratto centrale della trave.,

*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:

(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,

(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,

(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Correlazioni									
Resistenza a flessione - Profondità di infissione Pilodyn (Pilodyn 4JR e 6J)									
	4JR media 1°colpo	4JR media 2°colpo	4JR media 3°colpo	4JR media 4°colpo	4JR minimo 4°colpo	4JR massimo 4°colpo	6J media	6J minimo	6J massimo
MoR	-0.68	-0.76	-0.77	-0.81	-0.68	-0.81	-0.76	n.s.	n.s.
MoR_m	-0.70	-0.76	-0.77	-0.81	-0.68	-0.82	-0.75	n.s.	n.s.
MoR_M	-0.66	-0.75	-0.76	-0.81	-0.66	-0.81	-0.75	n.s.	n.s.
MoR_{1/2}	-0.66	-0.73	-0.75	-0.79	-0.67	-0.82	-0.77	n.s.	n.s.
MoR_C	-0.66	-0.74	-0.76	-0.80	-0.68	-0.81	-0.76	n.s.	n.s.
MoR*	-0.64	-0.74	-0.75	-0.79	-0.67	-0.65	-0.64	n.s.	n.s.
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_M	-0.63	-0.73	-0.75	-0.79	-0.65	-0.79	-0.70	n.s.	n.s.
MoR*_{1/2}	-0.63	-0.71	-0.72	-0.77	-0.62	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_C	-0.67	-0.75	-0.76	-0.81	-0.65	-0.48	-0.61	n.s.	n.s.
MoR(P)_{max}	-0.64	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0.65	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{medio}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0.63	n.s.	n.s.	n.s.

Tabella 21 - Correlazioni tra resistenza a flessione e profondità di infissione dello spillo dei Pilodyn 4JR (a ripetizione) e 6J (a colpo singolo). I valori compresi tra 0.8 e 0.89 (*abbastanza significativi*) sono indicati in corsivo; n.s.: dati *non significativi*

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:
nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave,
m: valore minimo,
M: valore massimo,
1/2: valore in mezzeria
C: valore medio del tratto centrale della trave.,
*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:
(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,
(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,
(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Correlazioni

Resistenza a flessione – Modulo elastico a flessione statica (carico unico centrale)

	$E_{app,an}$	$E_{app,an,m}$	$E_{app,an,M}$	$E_{app,an,1/2}$	$E_{app,an,c}$
MoR	0.61	n.s.	0.61	n.s.	0.60
MoR_m	0.61	n.s.	0.61	n.s.	n.s.
MoR_M	0.61	n.s.	0.62	n.s.	n.s.
MoR_{1/2}	0.63	0.61	0.63	0.62	0.62
MoR_C	0.62	n.s.	0.62	0.60	0.61
MoR*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_m	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_M	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_{1/2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR*_C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MoR(P)_{max}	0.79	0.79	0.77	0.83	0.78
MoR(P)_{1/2}	0.83	0.84	0.81	0.81	0.83
MoR(P)_{medio}	0.84	0.84	0.82	0.84	0.84

Tabella 22 – Correlazioni tra resistenza a flessione e Modulo di elasticità a flessione statica, con carico unico centrale e freccia di inflessione relativa misurata sull'asse neutro ($E_{app,an}$). I valori compresi tra 0.8 e 0.89 (abbastanza significativi) sono indicati in corsivo

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:

nessun segno al piede; valore medio di I sull'intera trave,

m: valore minimo,

M: valore massimo,

1/2: valore in mezzera

C: valore medio del tratto centrale della trave.,

*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:

(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,

(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,

(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Correlazioni

Moduli elastici statici – dinamici

(flessione statica)

(ultrasuoni e vibrazioni)

	V_{45} medio	V_0 medio	E_{us45} , medio	E_{us0} , medio	E_{fr} (1° modo)
E_m	<i>0.85</i>	0.85	0.93	0.92	0.91
$E_{m,m}$	<i>0.85</i>	0.83	0.92	0.91	0.90
$E_{m,M}$	<i>0.85</i>	0.86	0.93	0.93	0.91
$E_{m,1/2}$	<i>0.87</i>	0.85	0.94	0.92	0.92
$E_{m,c}$	<i>0.86</i>	0.87	0.93	0.93	0.93
E_{app}	<i>0.84</i>	0.80	<i>0.89</i>	<i>0.86</i>	0.93
$E_{app,m}$	<i>0.83</i>	0.78	<i>0.88</i>	<i>0.83</i>	0.91
$E_{app,M}$	<i>0.84</i>	0.82	<i>0.88</i>	<i>0.86</i>	0.93
$E_{app,1/2}$	<i>0.87</i>	0.82	0.91	<i>0.86</i>	0.94
$E_{app,c}$	<i>0.86</i>	0.84	0.90	<i>0.88</i>	0.95
$E_{app,an}$	0.77	0.62	<i>0.87</i>	<i>0.85</i>	<i>0.83</i>
$E_{app,an,m}$	0.75	0.61	<i>0.85</i>	<i>0.82</i>	<i>0.80</i>
$E_{app,an,M}$	0.78	0.62	<i>0.88</i>	<i>0.86</i>	<i>0.84</i>
$E_{app,an,1/2}$	<i>0.80</i>	0.65	<i>0.89</i>	<i>0.85</i>	<i>0.84</i>
$E_{app,an,c}$	0.78	0.63	<i>0.88</i>	<i>0.86</i>	<i>0.84</i>

Tabella 23 – Correlazioni tra resistenza a flessione e Modulo di elasticità a flessione statica, configurazione della prova a carico unico centrale, freccia di inflessione relativa misurata sull'asse neutro. I valori compresi tra 0.8 e 0.89 (*abbastanza significativi*) sono indicati in corsivo, quelli maggiori o uguali a 0.9 (*molto significativi*) in grassetto

I valori di resistenza (MoR) sono stati ricavati utilizzando moduli di resistenza calcolati con dimensioni di sezione diverse per posizione o per elaborazione:

nessun segno al piede: valore medio di I sull'intera trave,

m: valore minimo,

M: valore massimo,

1/2: valore in mezzera

C: valore medio del tratto centrale della trave.,

*: valore calcolato come indicato sopra ma su sezioni da cui è stata defalcata la porzione degradata,

Per il valore di resistenza a flessione nelle travi parzializzate (vedi par. 4.3.3.2) il MoR è stato calcolato con le seguenti 3 schematizzazioni:

(P)_{max}: MoR della parte di trave che si è veramente rotta,

(P)_{medio}: media tra i MoR delle due parti,

(P)_{1/2}: MoR medio, supponendo una divisione precisa sull'asse neutro della trave parzializzata.

Per la velocità degli ultrasuoni gli indici sono i seguenti:

45: 45; trasduttori a 45° rispetto alla direzione della fibratura,

0: trasduttori allineati alla direzione della fibratura,

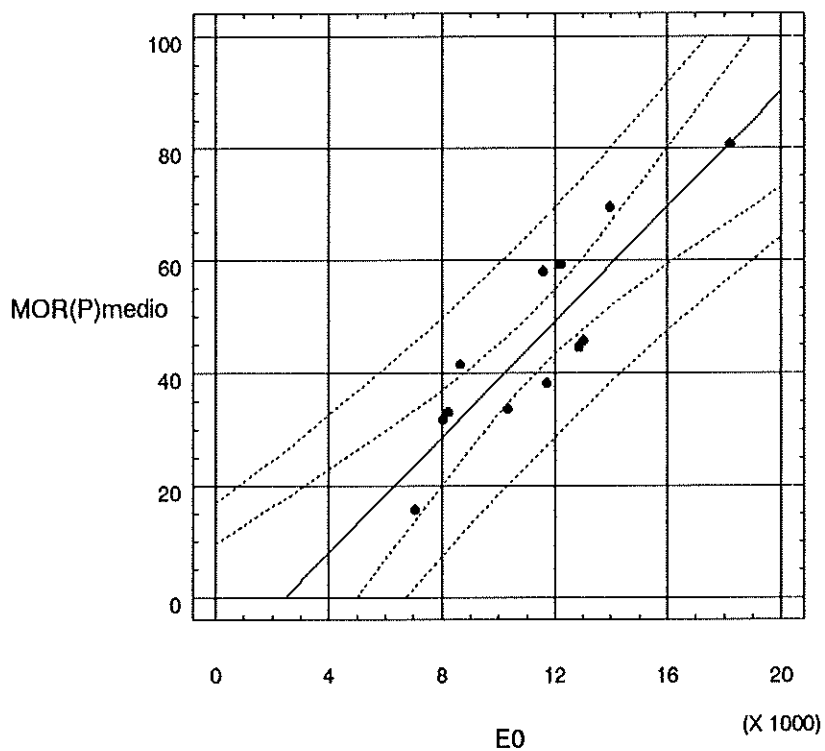
1° modo: primo modo di vibrare del provino.

Regressioni lineari				
Y	X	regressione	R ² [%]	grafico n.
MoR(P) _{medio}	E ₀	$y=5,132 \cdot 10^{-3} x - 12,59$	78,7	1
MoR(P) _{medio}	E _{0c}	$y=4,993 \cdot 10^{-3} x - 11,46$	77,4	2
MoR(P) _{medio}	E _{0m}	$y=5,021 \cdot 10^{-3} x - 15,15$	81,3	3
MoR(P) _{medio}	E _{app.an}	$y=6,121 \cdot 10^{-3} x - 9,567$	70,6	5
MoR(P) _{medio}	E _{app.an,m}	$y=5,842 \cdot 10^{-3} x - 10,64$	71,1	6
MoR(P) _{medio}	vl _{45,medio} ²	$y=2,831 \cdot 10^{-6} x - 37,04$	69,7	7
MoR(P) _{medio}	E _{us,medio}	$y=5,603 \cdot 10^{-3} x - 33,53$	75,9	8
MoR(P) _{medio}	E _{fr(1)}	$y=7,228 \cdot 10^{-3} x - 42,21$	67,4	9
MoR(P) _{medio}	E _{fr(3)}	$y=8,562 \cdot 10^{-3} x - 57,64$	75,3	10
MoR(P) _{1/2}	vl _{45,medio}	$y=2,950 \cdot 10^{-2} x - 112,5$	69,4	11
MoR(P) _{1/2}	vl _{45,medio} ²	$y=2,829 \cdot 10^{-6} x - 36,38$	69,9	12
MoR(P) _{1/2}	E _{us,0,min}	$y=3,990 \cdot 10^{-3} x - 21,73$	80,1	13
MoR(P) _{max}	E _{app,m}	$y=1,085 \cdot 10^{-2} x - 55,11$	70,7	14
MoR	vt _{medio}	$y=2,472 \cdot 10^{-6} x - 2,852$	53,3	15
MoR	M.V.	$y=3,030 \cdot 10^{-1} x - 110,9$	57,4	16
MoR	P4JR _(4°)	$y=2,587 x + 87,52$	65,6	17
MoR _{1/2}	fr (1)	$y=4,908 \cdot 10^{-1} x - 223,1$	73,6	18
E ₀	E _{us,45}	$y=1,034 x - 3271$	86,5	19
E ₀	E _{us,0}	$y=1,477 x - 11002$	85,4	20
E ₀	E _{fr(1)}	$y=1,390 x - 5548$	83,5	22
E ₀	E _{fr(3)}	$y=1,589 x - 7823$	86,9	21

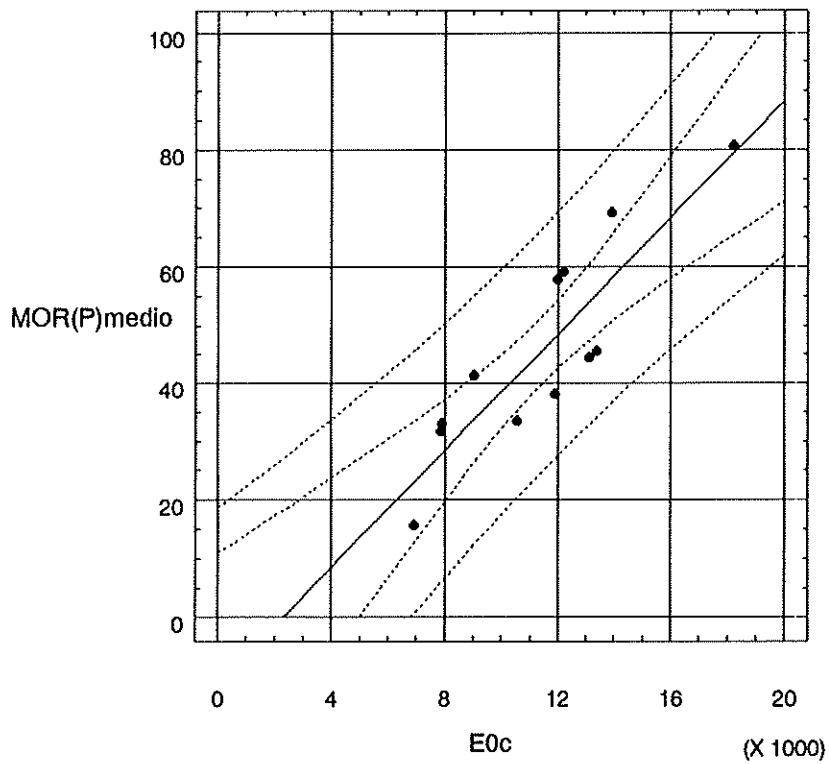
tabella 24 – Tra tutte le regressioni semplici ottenute sono riportate quelle con i migliori coefficienti di determinazione. I relativi grafici numerati sono riportati nelle pagine seguenti

grafici 1 e 2

Regressione MOR(P)medio su E0

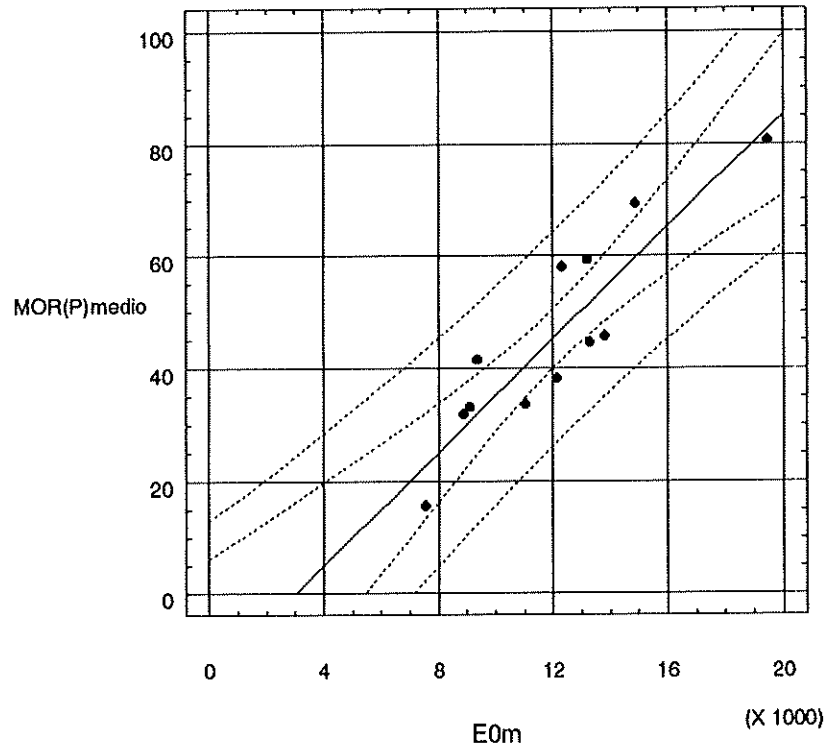


Regressione lineare MOR(P)medio su E0c

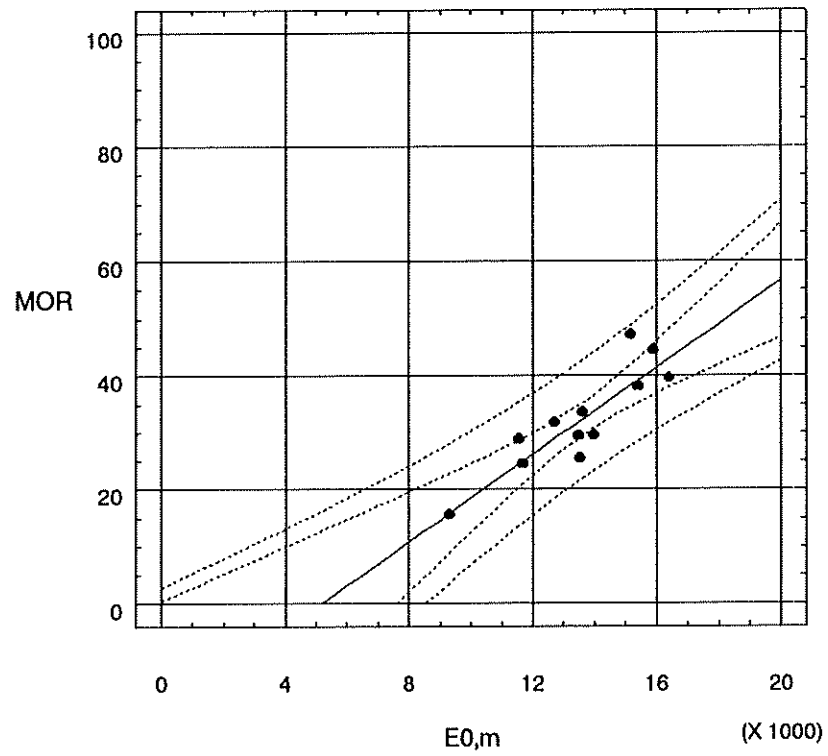


grafici 3 e 4

Regressione MOR(P)medio su E0m

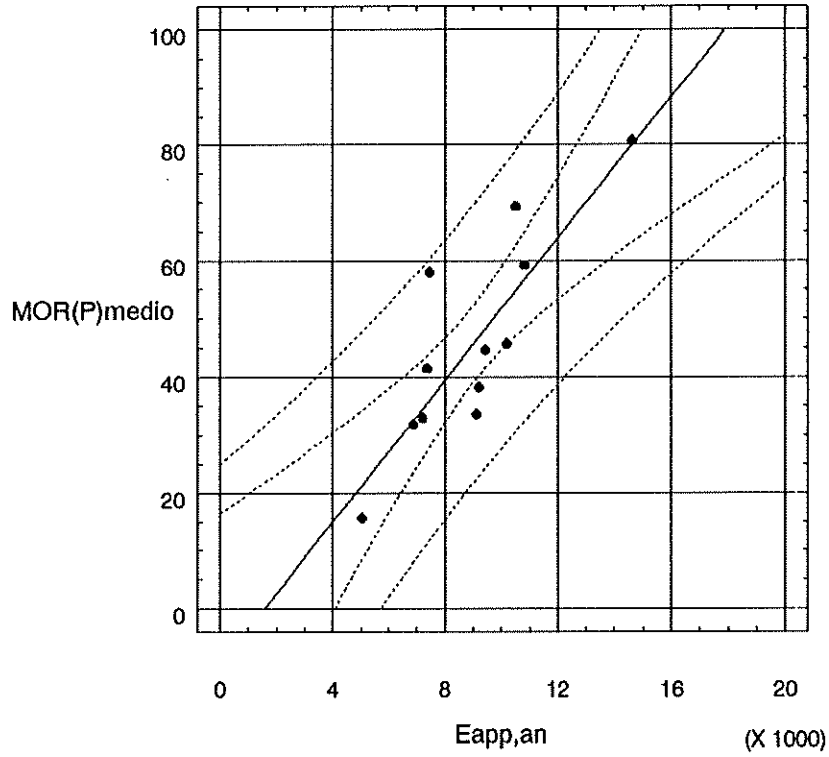


Regressione MOR Eus,0°,m

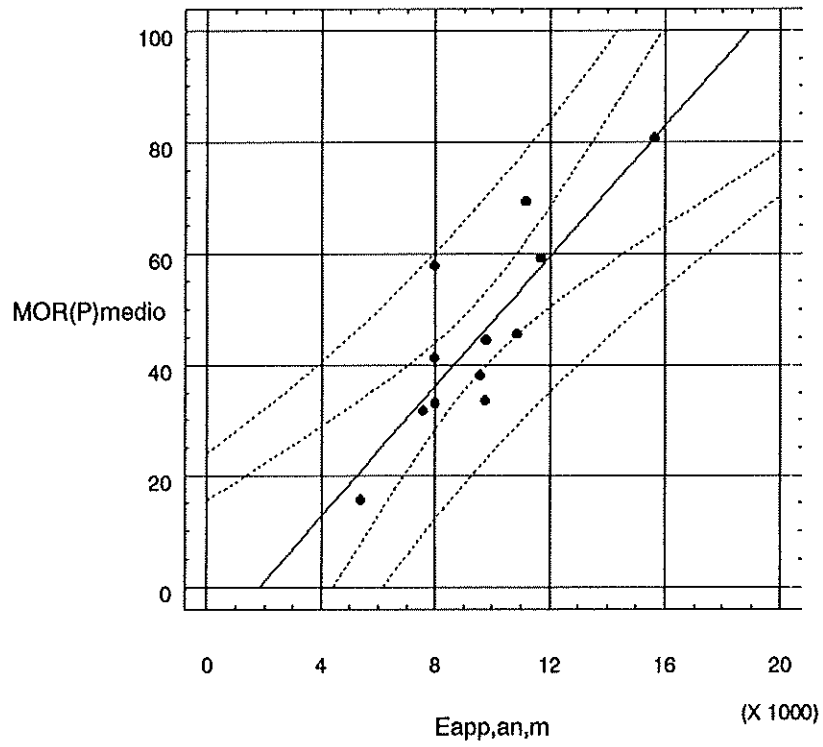


grafici 5 e 6

Regressione MOR(P)medio su Eapp,an

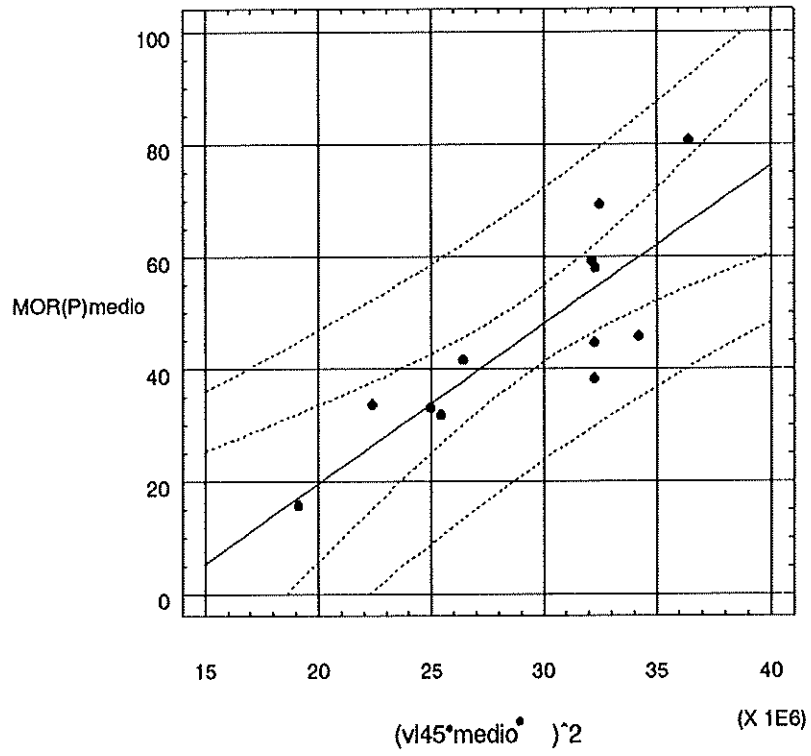


Regressione MOR(P)medio su Eapp,an,m

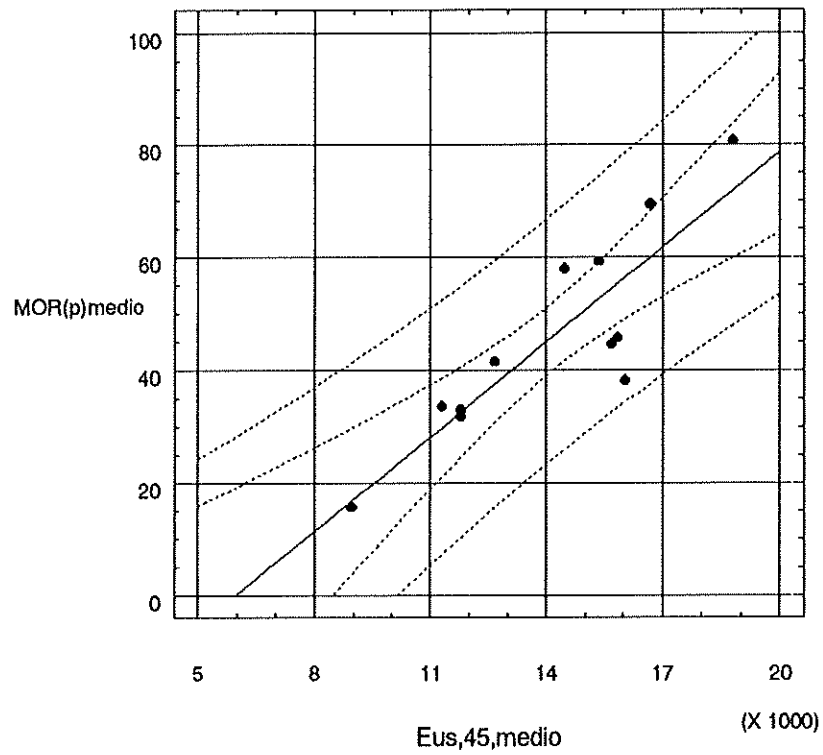


grafici 7 e 8

Regressione MOR(P)medio su $(v_{145} \cdot \text{medio})^2$

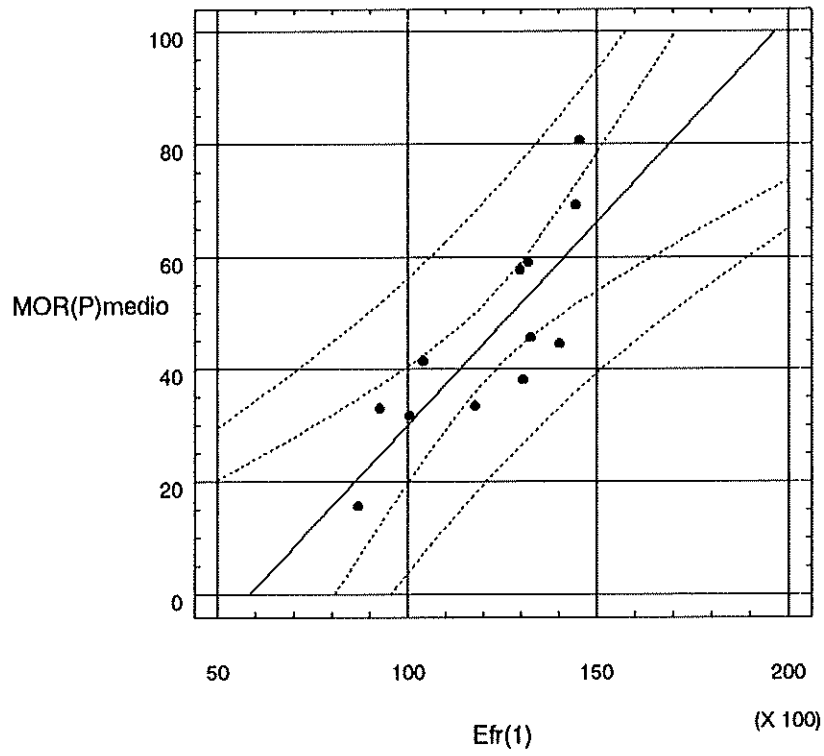


Regressione MOR(P)medio su Eus,45,medio

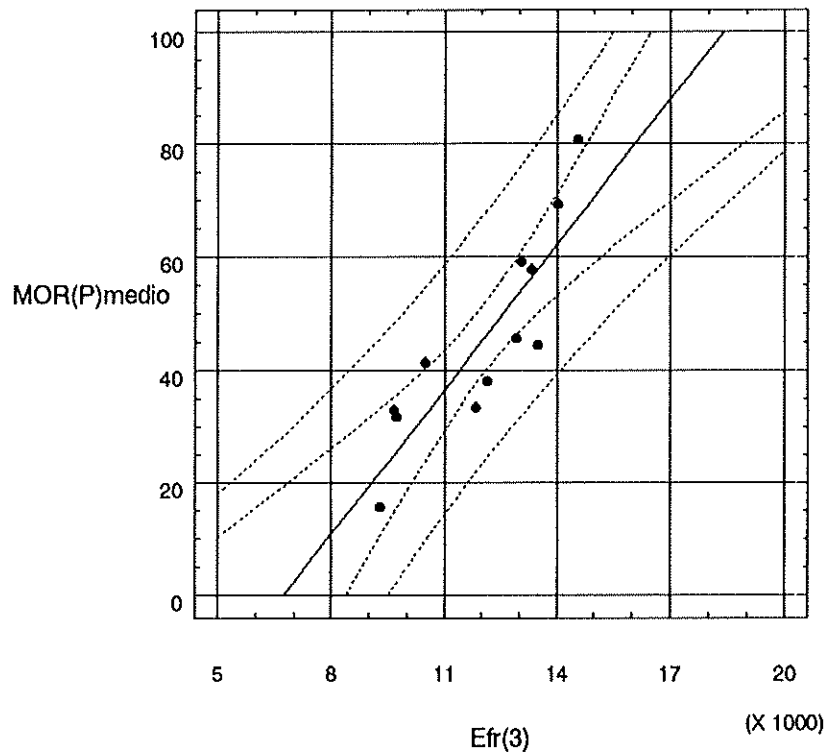


grafici 9 e 10

Regressione MOR(P)medio su Efr(1)

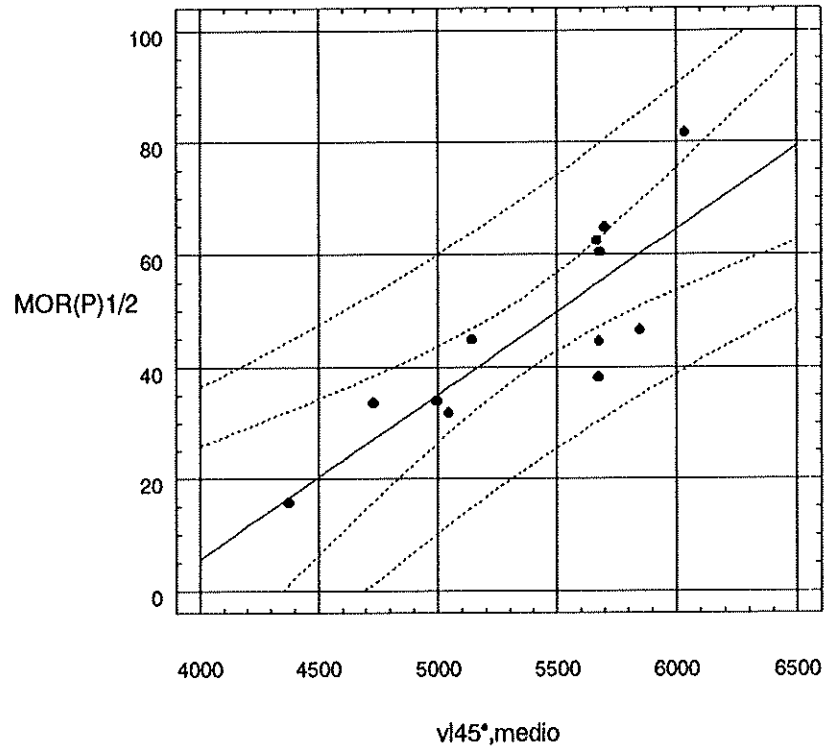


Regressione MOR(P)medio su Efr(3)

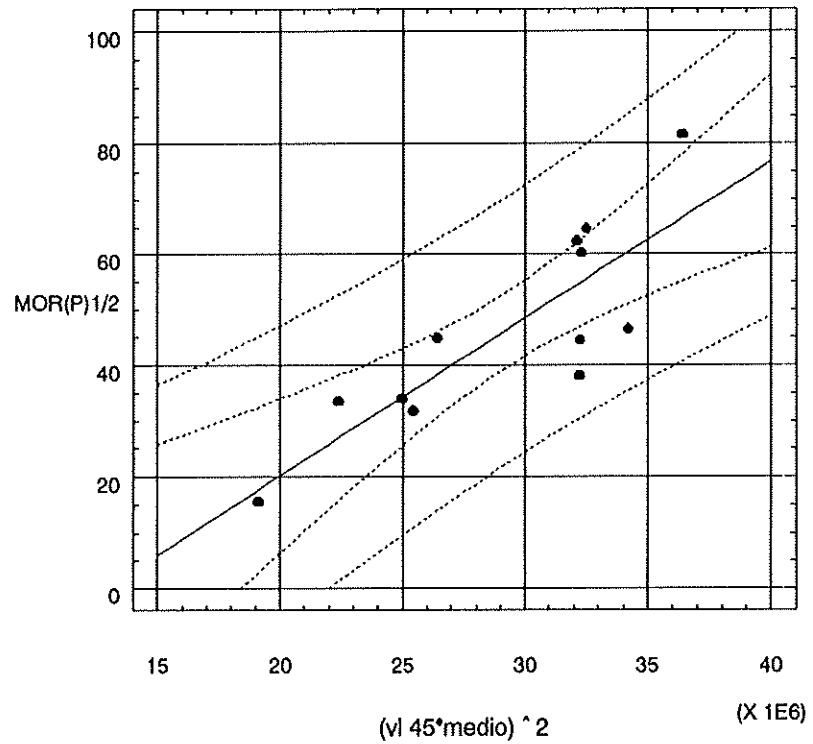


grafici 11 e 12

Regressione MOR(P)1/2 su $v_{l,45^\circ, \text{medio}}$

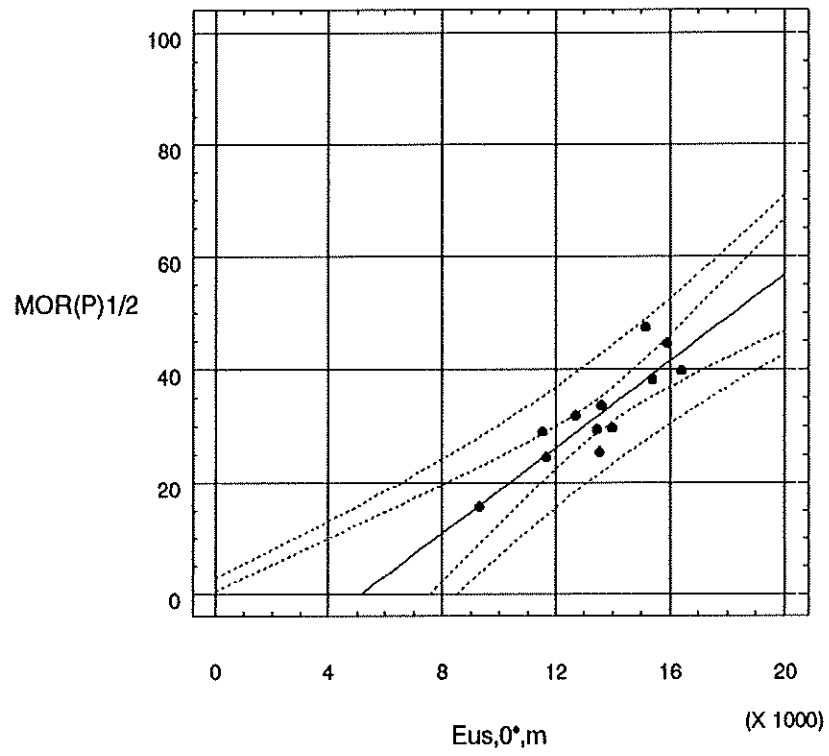


Regressione di MOR(p)1/2 su $(v_{l,45^\circ, \text{medio}})^2$

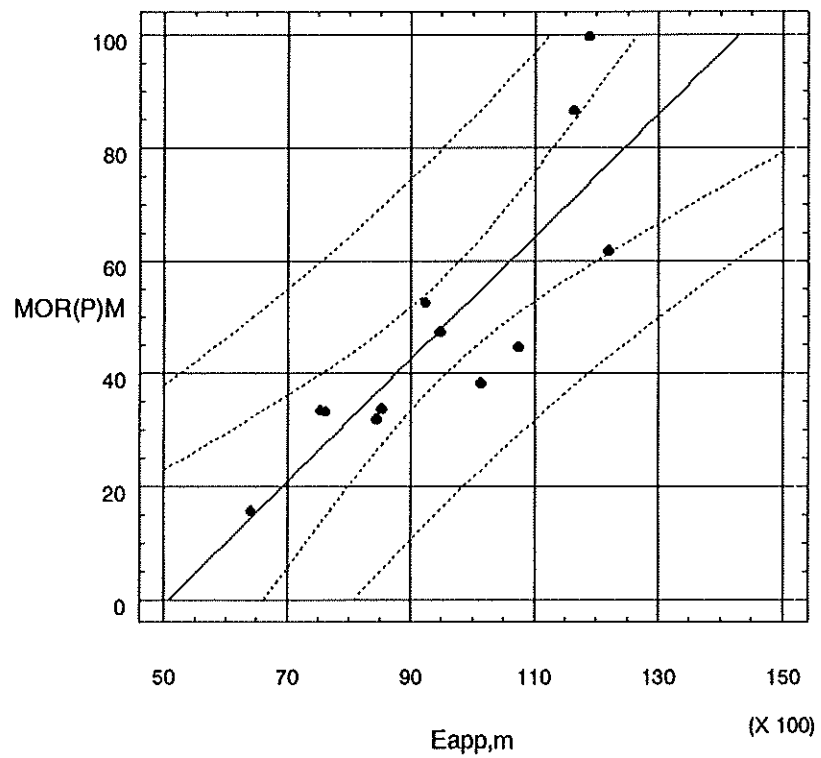


grafici 13 e 14

Regressione MOR(P)1/2 su Eus,0*,m

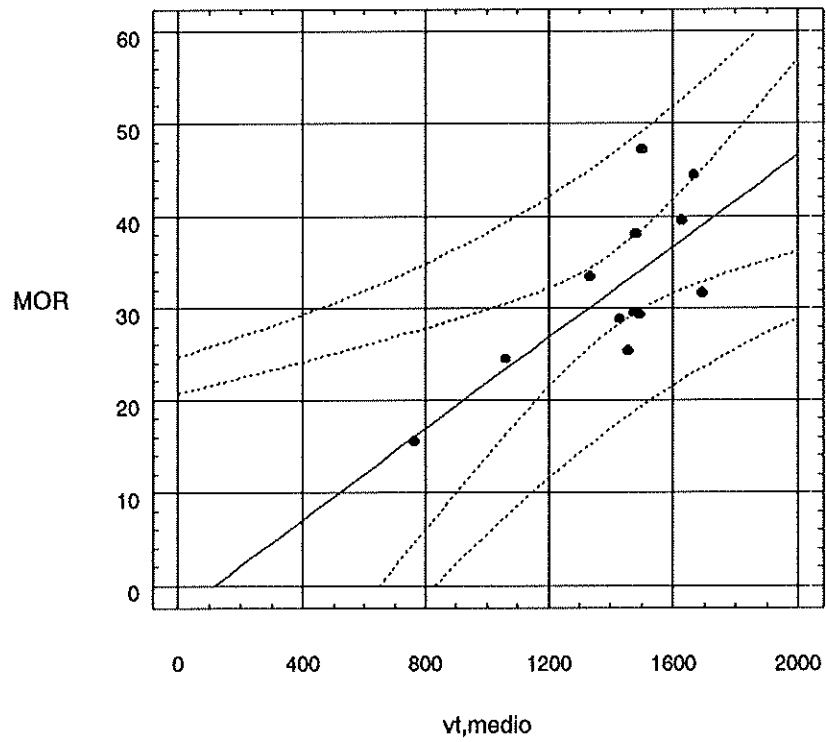


Regressione MOR(P),M su Eapp,m

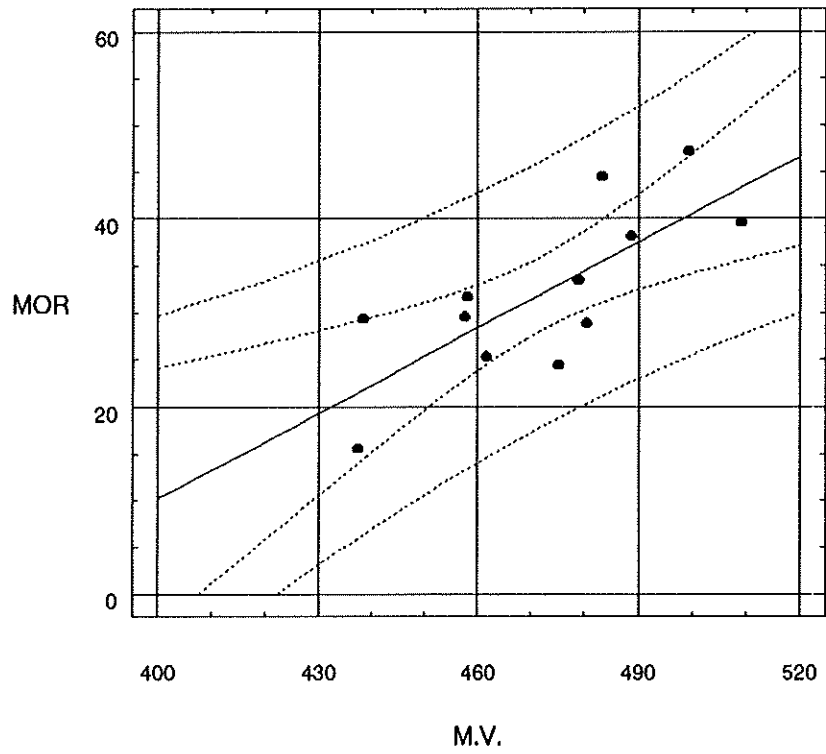


grafici 15 e 16

Regressione MOR-vt,medio

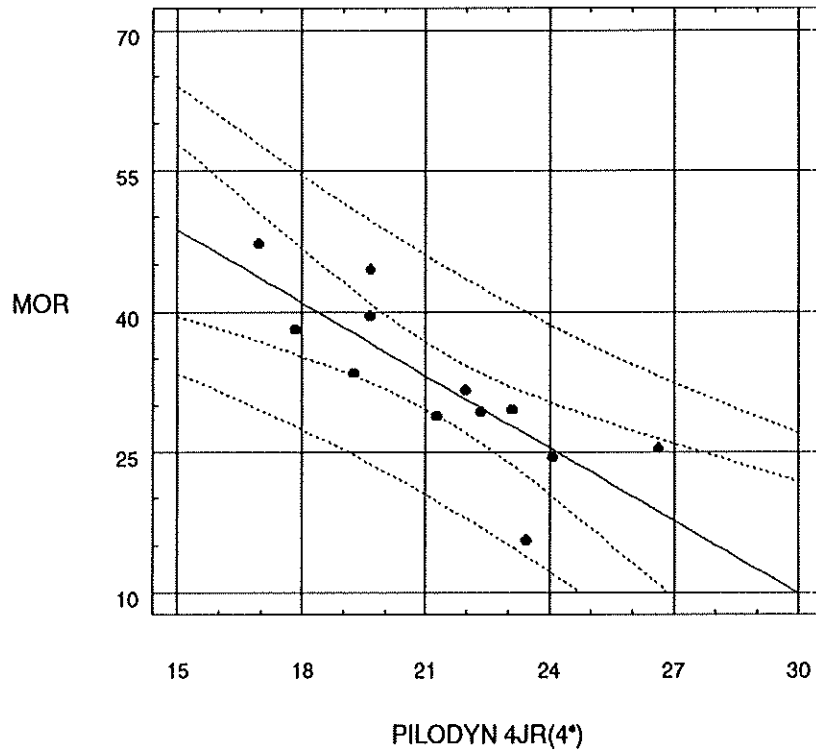


Regressione MOR-M.V.

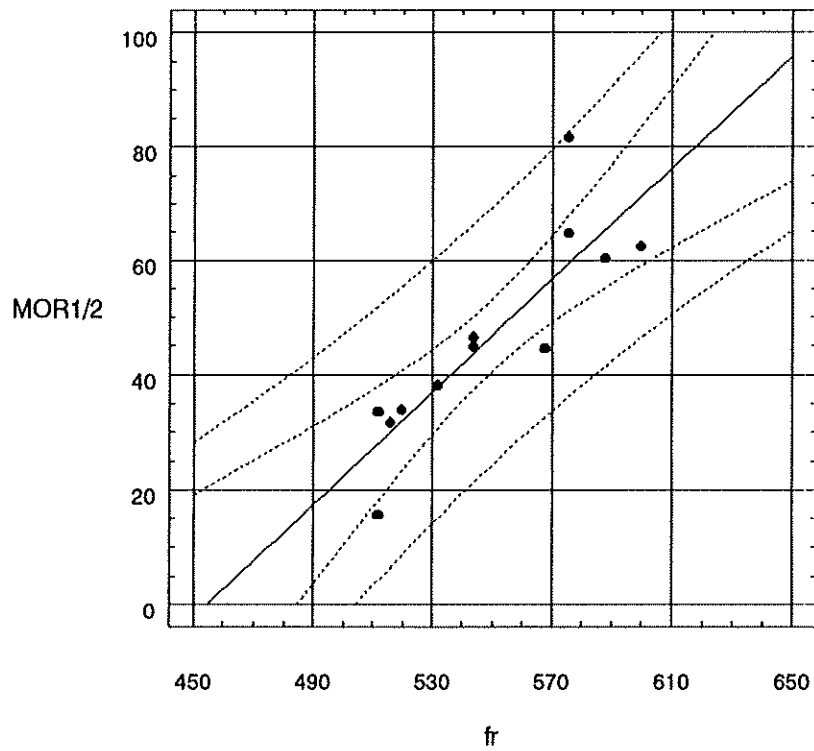


grafici 17 e 18

Regressione MOR su PILODYN 4JR(4°)

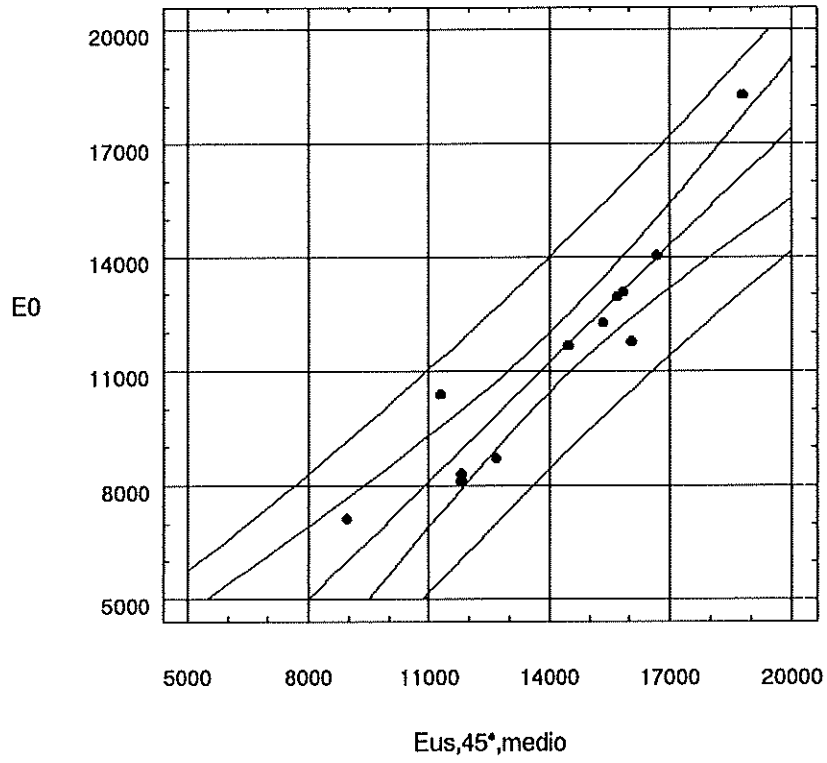


Regressione MOR1/2 su fr

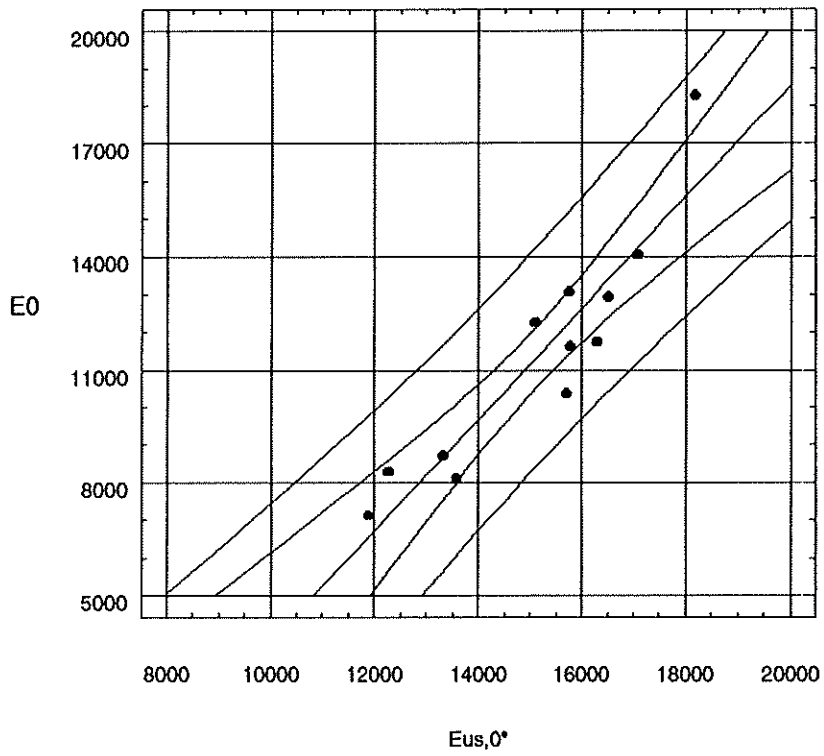


grafici 19 e 20

Regressione E0 su Eus,45°,medio

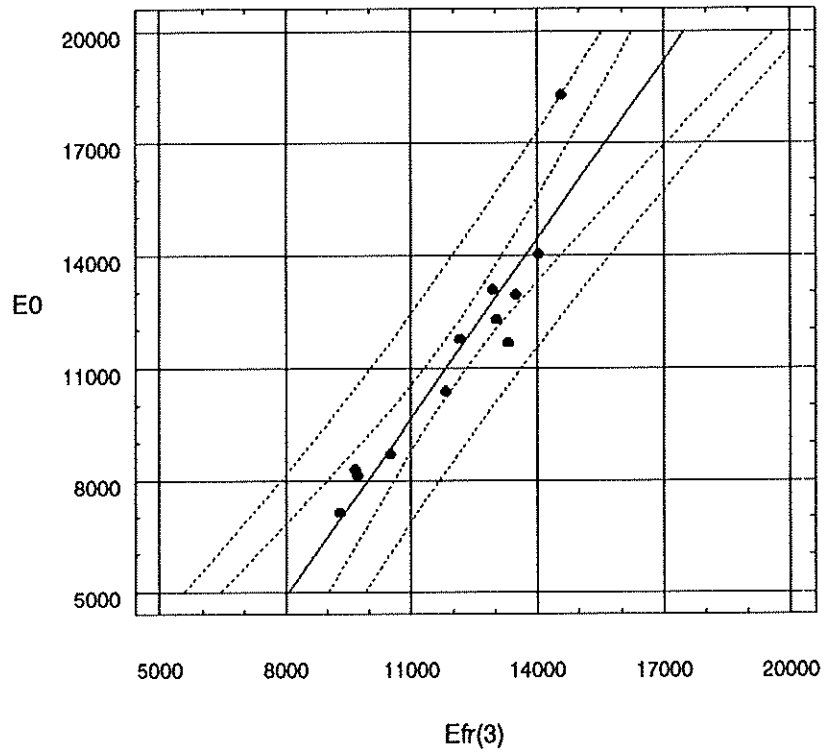


Regressione E0 su Eus,0°

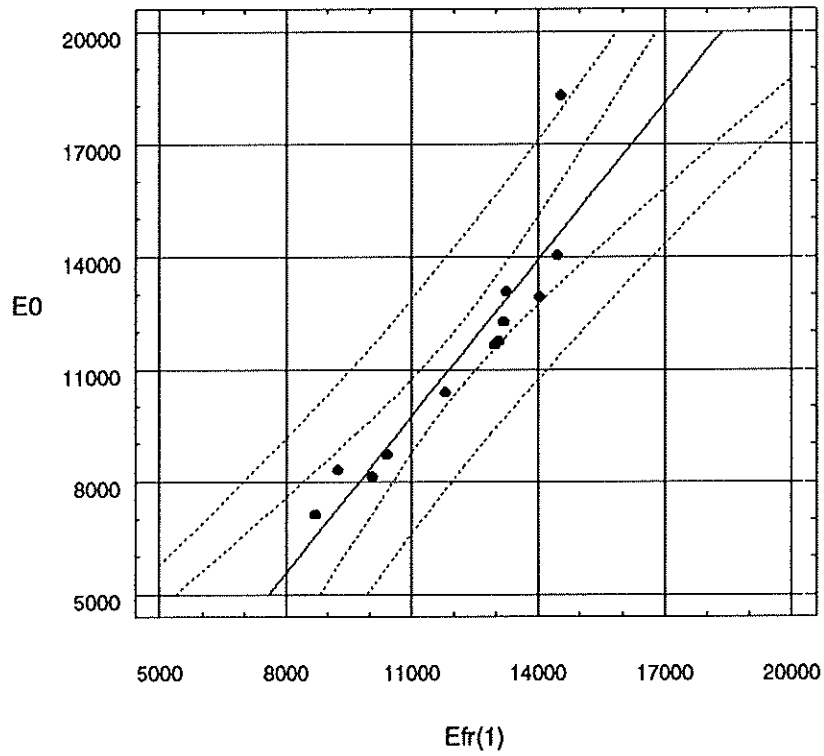


grafici 21 e 22

Regressione E0 su Efr(3)



Regressione E0 su Efr(1)



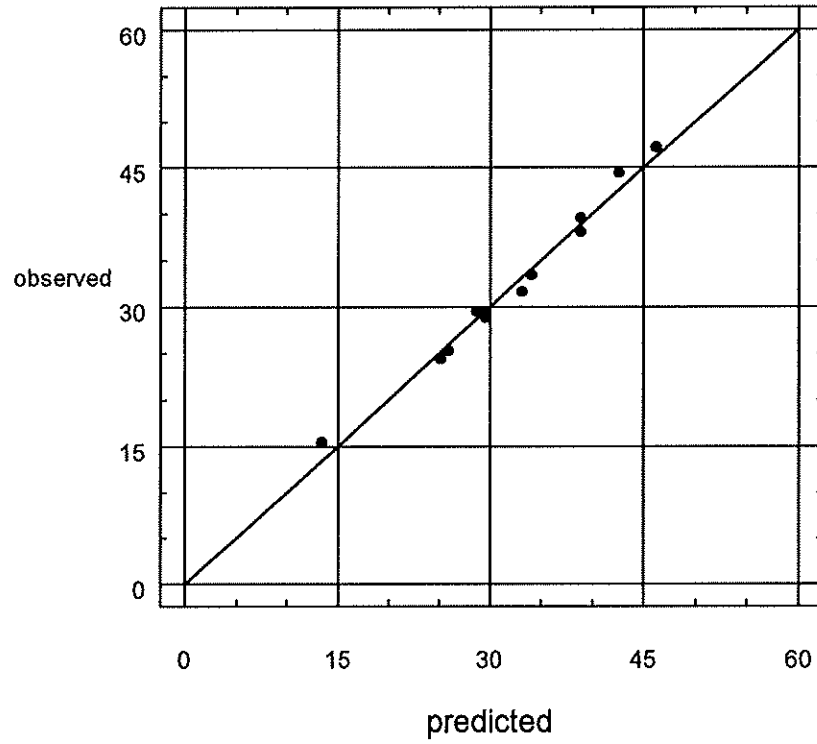
Regressioni multiple				
parametri	unità di misura	coefficienti	R ² [%]	grafico n.
$v_{l,0,min}^2$ $v_{t,max}$ $v_{t,min}$ M.V. costante	[m ² /s ²] [m/s] [m/s] [kg/m ³]	$6,175 \cdot 10^{-7}$ $1,818 \cdot 10^{-2}$ $-1,402 \cdot 10^{-2}$ $2,189 \cdot 10^{-1}$ -111,21	97,4	1
$v_{l,0,medio}^2$ $v_{t,max}$ $v_{t,min}$ M.V. costante	[m ² /s ²] [m/s] [m/s] [kg/m ³]	$4,874 \cdot 10^{-7}$ $2,180 \cdot 10^{-2}$ $-1,421 \cdot 10^{-2}$ $2,339 \cdot 10^{-1}$ -122,85	97,3	2
$v_{l,45,medio}^2$ $v_{t,max}$ $v_{t,min}$ M.V. costante	[m ² /s ²] [m/s] [m/s] [kg/m ³]	$2,953 \cdot 10^{-7}$ $2,410 \cdot 10^{-2}$ $-1,504 \cdot 10^{-2}$ $2,224 \cdot 10^{-1}$ -114,40	97,3	3
$v_{l,45,min}^2$ $v_{t,max}$ $v_{t,min}$ M.V. costante	[m ² /s ²] [m/s] [m/s] [kg/m ³]	$1,736 \cdot 10^{-7}$ $2,468 \cdot 10^{-2}$ $-1,400 \cdot 10^{-2}$ $2,267 \cdot 10^{-1}$ -113,95	96,6	4
fr(1) $v_{t,max}$ $v_{t,min}$ M.V. costante	[Hz] [m/s] [m/s] [kg/m ³]	$4,804 \cdot 10^{-2}$ $2,568 \cdot 10^{-2}$ $-1,350 \cdot 10^{-2}$ $2,390 \cdot 10^{-1}$ -144,14	98,1	5
E _{app} $v_{t,max}$ $v_{t,min}$ M.V. costante	[N/mm ²] [m/s] [m/s] [kg/m ³]	$1,106 \cdot 10^{-3}$ $2,131 \cdot 10^{-2}$ $-1,403 \cdot 10^{-2}$ $2,128 \cdot 10^{-1}$ -106,7	97,9	6
P4JR(4°) $v_{l,0,min}^2$ costante	[m ² /s ²] [mm]	-1,835 $1,428 \cdot 10^{-2}$ -3,982	89,8	7
P4JR(2°) $v_{l,0,min}^2$ costante	[m ² /s ²] [mm]	-3,946 $1,564 \cdot 10^{-6}$ 35,174	91,5	8

N.B. La variabile dipendente inserita, utilizzata per l'elaborazione (*observed*) è il MoR per tutte le regressioni multiple ad eccezione che per le ultime due dove è MoR_C

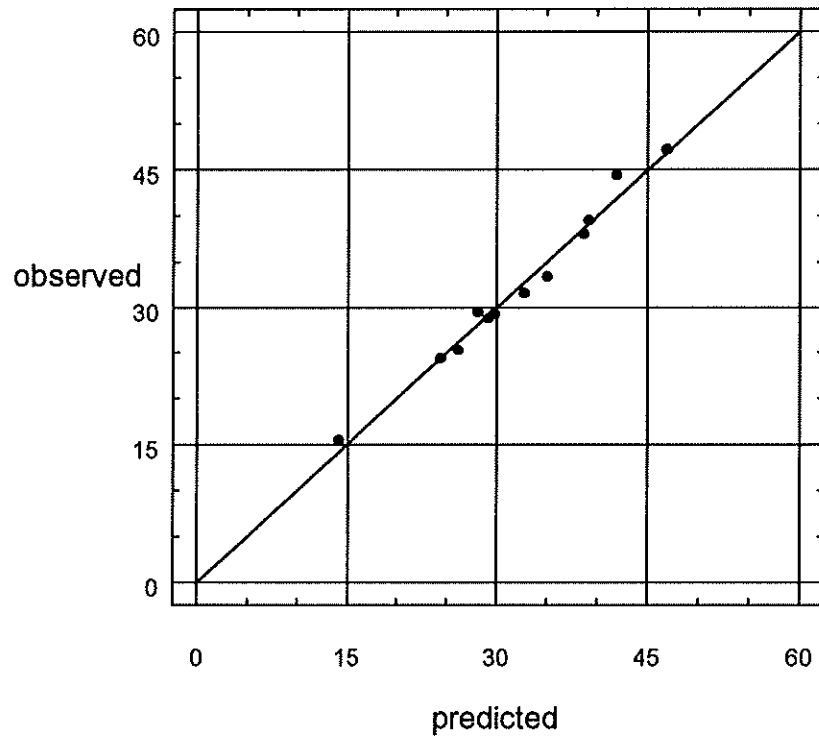
tabella 25 – Alcune regressioni multiple. I relativi grafici sono riportati nelle pagine seguenti

grafici 1 e 2

Multiple regression

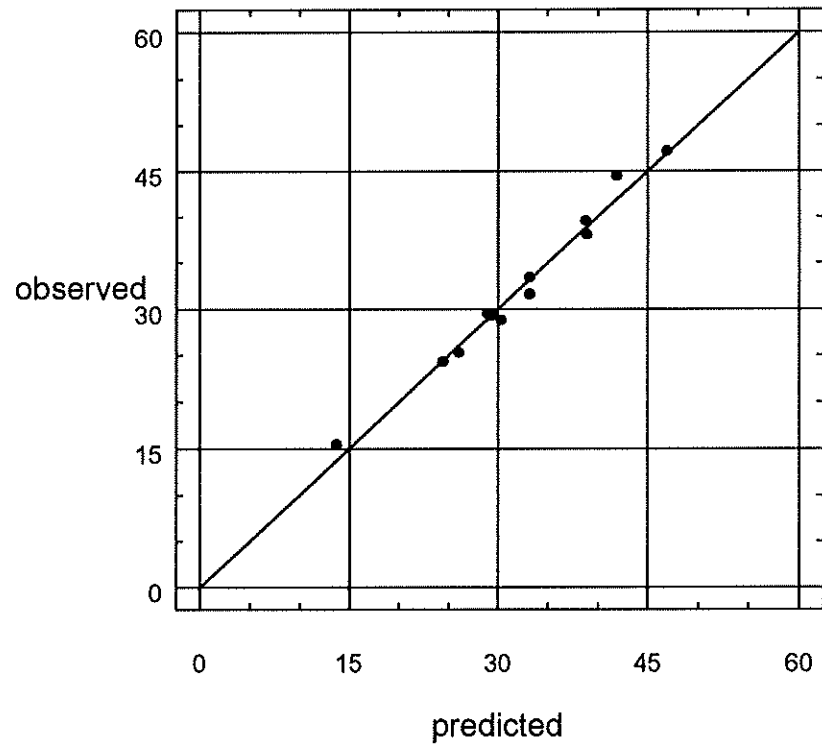


Multiple regression

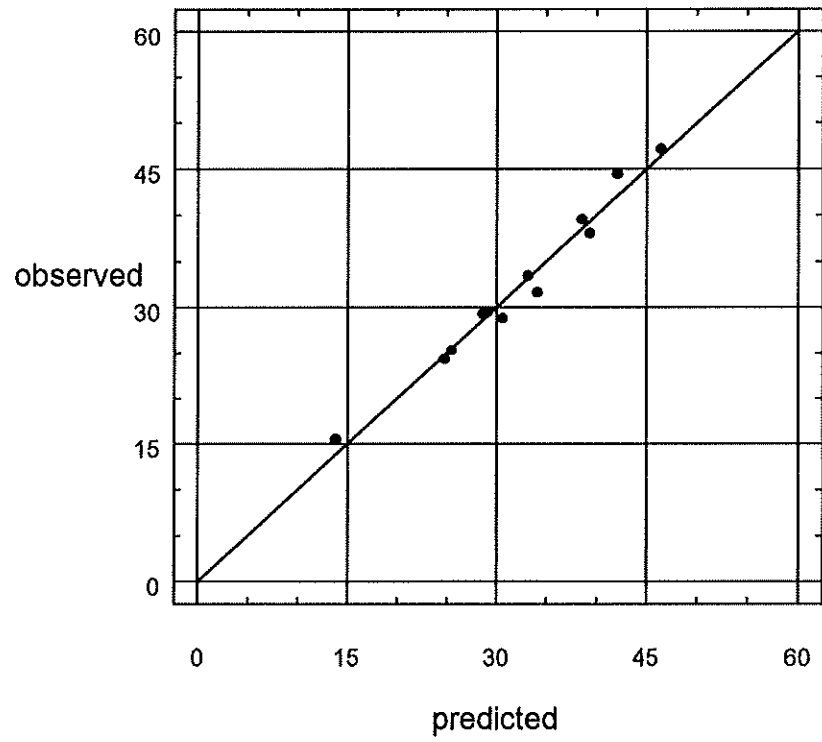


grafici 3 e 4

Multiple regression

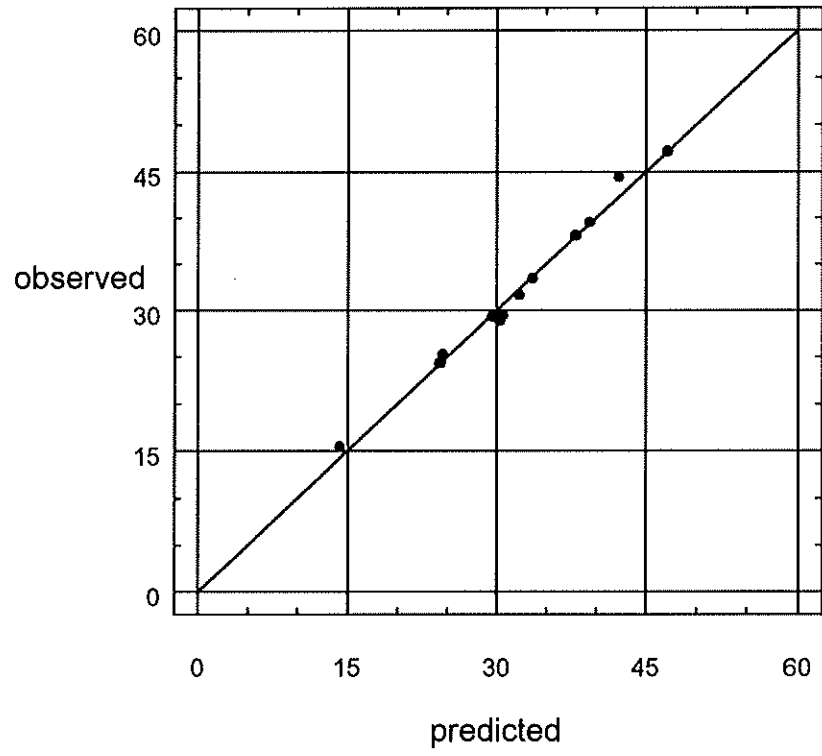


Multiple regression

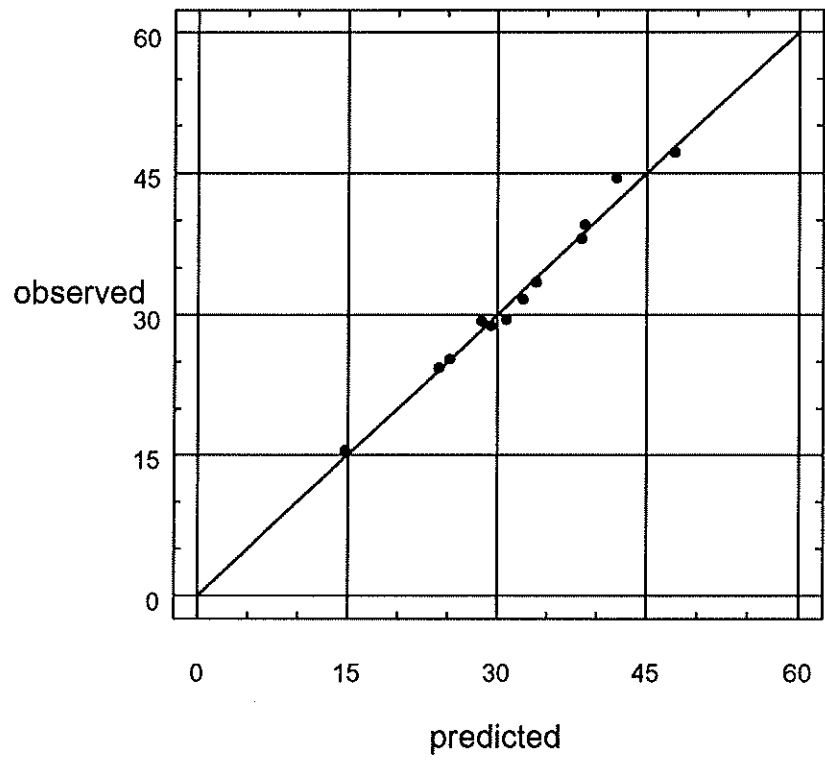


grafici 5 e 6

Multiple regression

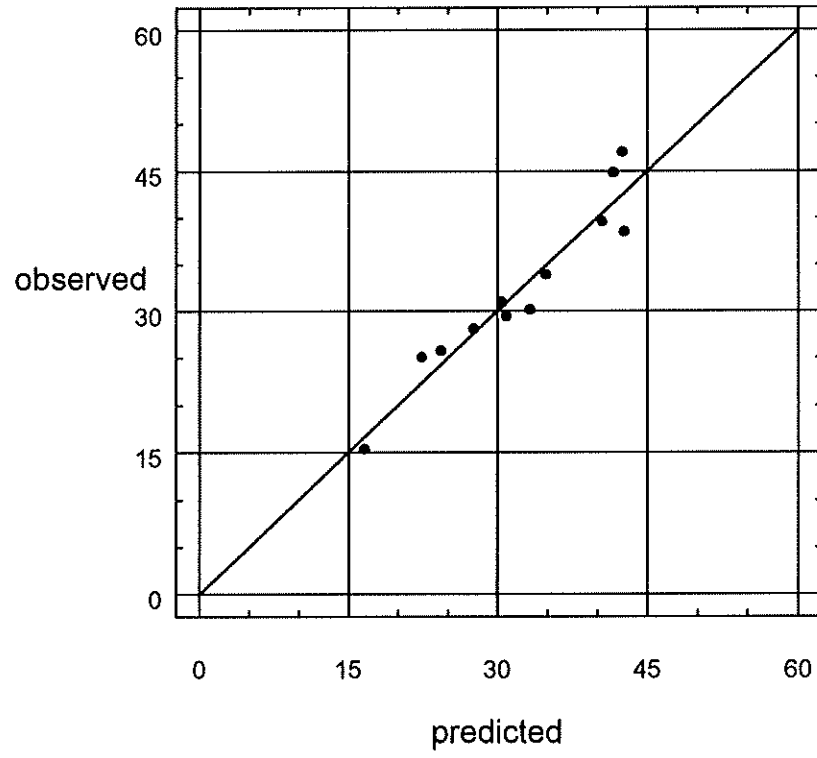


Multiple regression



grafici 7 e 8

Multiple regression



Multiple regression

