



in collaborazione con



Verbania, martedì 24 novembre 2015

Seminario:

I solai nel rinforzo di edifici esistenti
approccio statico e sismico integrati

Classificazione, durabilità, ispezione, diagnosi e tecnologie d'intervento di elementi lignei

NORME DI RIFERIMENTO: UNI EN 1995:2009 EUROCODICE 5 - N.T.C. D.M. 14 gennaio 2008

Ing. Marco Pio Lauriola

www.timberdesign.it



1 CENNI DI TECNOLOGIA DEL LEGNO.....	3
1.1 PREMessa.....	3
1.2 SPECIE LEGNOSE.....	3
1.3 LE DIREZIONI ANATOMICHE.....	3
1.4 RELAZIONI LEGNO-ACQUA.....	4
1.5 LE FESSURE DA RITIRO.....	6
1.6 ALBURNO E DURAME.....	7
1.7 BIODEGRADAMENTO, DURABILITÀ E PRESERVAZIONE.....	8
1.7.1 IL DEGRADO DA FUNGHI DELLA CARIE.....	8
1.7.2 IL DEGRADO DA INSETTI XILOFAGI.....	9
1.7.3 PRESERVAZIONE.....	9
1.7.4 LA DURABILITÀ NATURALE.....	10
2 NORMATIVA TECNICA PER LE COSTRUZIONI IN LEGNO.....	12
2.1 LA SITUAZIONE NORMATIVA ATTUALE NEL NOSTRO PAESE.....	12
2.2 QUALIFICAZIONE E CERTIFICAZIONE.....	12
2.2.1 QUALIFICAZIONE MINISTERIALE DEGLI STABILIMENTI.....	13
2.2.2 QUALIFICAZIONE CON MARCATURA CE.....	13
2.3 PROGETTARE LA DURABILITÀ.....	13
2.4 LE PROPRIETÀ MECCANICHE DEL MATERIALE LEGNO.....	14
2.4.1 LA CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA.....	16
2.4.2 LE PROPRIETÀ MECCANICHE DEL LEGNO MASSICCIO.....	17
2.4.3 LE PROPRIETÀ MECCANICHE DEL LEGNO LAMELLARE INCOLLATO.....	21
2.4.4 IL LEGNO ANTICO E LA DIAGNOSI DELLE STRUTTURE.....	24
3 CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE ESISTENTI.....	26
3.1 INTRODUZIONE.....	26
3.2 PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO.....	26
3.3 GENERALITÀ SULLE TECNICHE DI INTERVENTO.....	27
3.3.1 RICOSTRUZIONI, SOSTITUZIONI E INTEGRAZIONI.....	27
3.3.2 GLI INCOLLAGGI STRUTTURALI.....	28
3.3.3 PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....	28
3.4 CONSOLIDAMENTO DEI SOLAI.....	29
3.4.1 MIGLIORAMENTO STRUTTURALE DEI SOLAI.....	29
3.4.2 MIGLIORAMENTO STRUTTURALE DELLE TRAVI IN GENERE.....	30
3.5 RICOSTRUZIONE DI TESTATE DI TRAVI.....	31
3.5.1 PROTESI DI LEGNO CONNESSA CON BARRE.....	31
3.5.2 PROTESI DI PROFILATI METALLICI.....	31
3.6 SOLAI MISTI LEGNO-CALCESTRUZZO.....	32
3.6.1 METODO DI CALCOLO DELLE STRUTTURE MISTE: LA TEORIA DI MÖHLER.....	32
3.6.2 TIPI DI CONNETTORI.....	35
3.6.3 L'IMPIEGO DEI CALCESTRUZZI LEGGERI.....	35
4 BIBLIOGRAFIA.....	36

1 CENNI DI TECNOLOGIA DEL LEGNO

1.1 Premessa

La progettazione strutturale non è solo calcolo, il calcolo è solo una piccola parte della progettazione.

Progettare significa utilizzare al meglio i materiali e le tecnologie al fine di ottenere un'opera durevole, sicura ed economica.

La durabilità è strettamente legata con la natura del materiale che è biodegradabile, questo però non significa che le strutture di legno siano meno durabili di quelle costruite utilizzando altri materiali; esistono esempi di costruzioni in legno che hanno superato i mille anni (le chiese norvegesi, le pagode giapponesi, ecc.), basta alzare gli occhi nelle nostre chiese antiche per vedere coperture di legno che, se sono state preservate dall'umidità, sono in perfetto stato di conservazione da centinaia di anni.

Il legno deriva dal tronco che in natura aveva la funzione di sostenere la chioma, il tronco quindi era sottoposto a sforzo normale e flessione, per tale motivo il legno ha una direzione di massima resistenza e rigidità che è quella longitudinale, verticale nella pianta in piedi, mostrando uno spiccato comportamento anisotropo; pertanto le proprietà meccaniche sono fortemente diverse nelle varie direzioni anatomiche.

Il legno è un materiale igroscopico, alle variazioni di umidità del legno corrispondono variazioni dimensionali piuttosto spiccate che vanno considerate nella progettazione in quanto il legno è in continuo movimento.

Essendo materiale derivato dall'albero, il legno conserva le peculiarità dell'albero stesso. Ad esempio i nodi che sono la naturale traccia dei rami nel tronco ai fini della resistenza meccanica del segato sono un difetto che ne diminuisce la resistenza e rigidità.

Per questi motivi e per altri che verranno detti in seguito, la progettazione delle strutture di legno non può prescindere dalle conoscenze di base di tecnologia del legno.

1.2 Specie legnose

Le specie legnose maggiormente utilizzate in Italia nelle strutture sono:

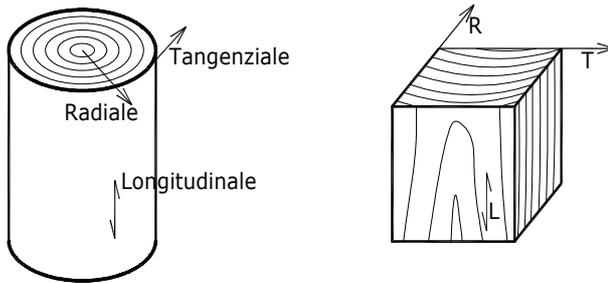
Conifere: Abete (rosso e bianco), pino, larice, douglasia.

Latifoglie: quercia (farnia, rovere, cerro, roverella), castagno, pioppo, robinia.

Il pioppo, pur essendo una latifolia, tecnologicamente è molto simile alle conifere, pertanto viene associato alle conifere.

1.3 Le direzioni anatomiche

In un tronco di legno possono individuarsi tre direzioni anatomiche, quella longitudinale è quella dell'asse del tronco, corrispondente all'orientazione generale delle cellule. Le direzioni radiale e tangenziale sono invece riferite agli anelli annuali di accrescimento.



Le direzioni anatomiche R e T variano da punto a punto all'interno del tronco, tuttavia in un segato è generalmente possibile individuare un lato circa radiale ed uno circa tangenziale.

1.4 Relazioni legno-acqua

Il legno è un materiale igroscopico, assorbe e cede umidità dall'ambiente.

Essendo formato da cellule vuote e allungate, queste possono contenere acqua in diverse forme:

acqua di saturazione: è quella che bagna le pareti cellulari, si riscontra per umidità del legno (espresse in percentuale sul peso secco) superiori allo 0%;

acqua libera: è quella contenuta nel lume cellulare, per umidità superiori al 30%.

Esiste poi l'acqua di costituzione che fa parte della parete cellulare stessa ma in questo contesto non riveste importanza tecnologica in quanto viene persa solo per distruzione della cellula stessa.

L'umidità del legno è riferita al peso secco secondo la relazione:

$$U = \frac{P - P_0}{P_0} \cdot 100$$

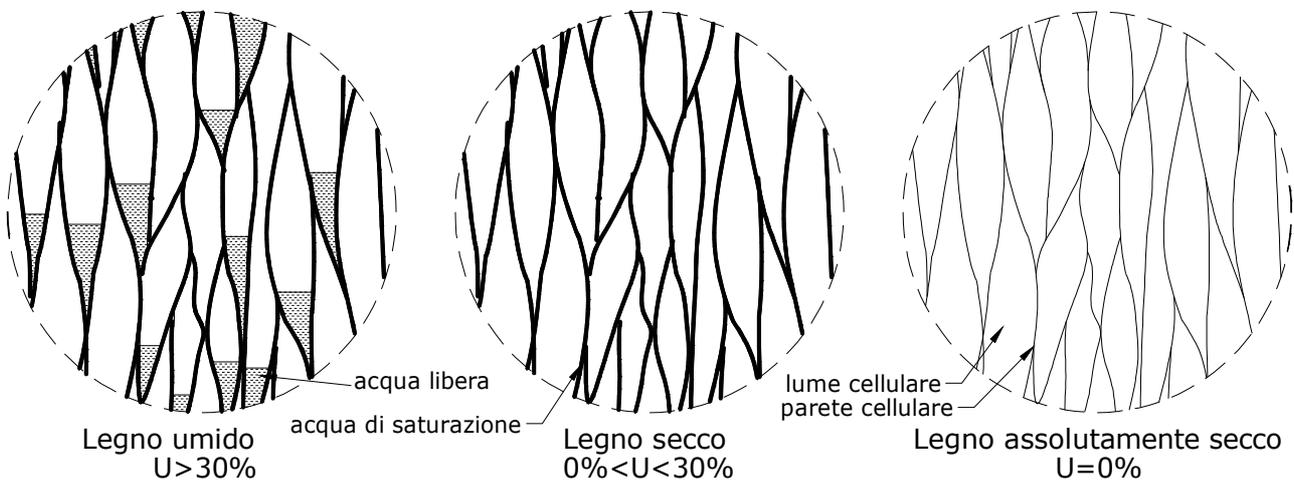
in cui:

P_0 è il peso secco, cioè il peso del solo legno, ottenuto seccando il legno in stufa ventilata per un tempo sufficiente ad eliminare completamente sia l'acqua libera che l'acqua di saturazione;

P è il peso del campione a umidità U

Detto P_0 il peso secco del materiale

Nella figura che segue è rappresentato schematicamente un ingrandimento in cui si vedono le cellule del legno.



Al momento dell'abbattimento il legno ha un contenuto di umidità molto superiore al 30%, successivamente, con il processo di stagionatura, il legno perde umidità fino ad un valore variabile in funzione dell'ambiente in cui si trova:

- U < 12% in ambienti chiusi, riscaldati in inverno;
- 12% < U < 20% in ambienti chiusi non riscaldati di inverno ed in ambienti aperti ma al coperto;
- U > 20% all'aperto, senza protezione dalle intemperie.

A seguito della perdita di umidità il legno subisce diminuzione delle dimensioni (ritiro); il fenomeno è reversibile e pertanto all'aumento di umidità il legno aumenta le proprie dimensioni (rigonfiamento).

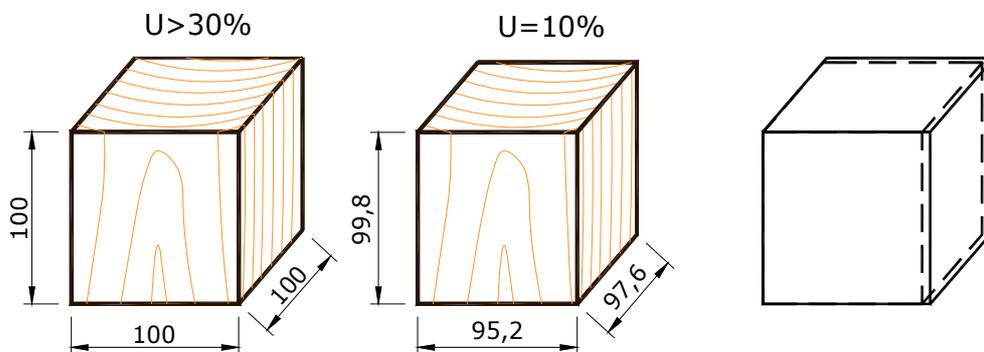
È importante osservare che il fenomeno del ritiro e rigonfiamento si ha solo nel campo di umidità compreso fra lo 0% ed il punto di saturazione delle pareti cellulari (U=30%); per valori superiori ad U=30% il legno non si ritira e non si rigonfia.

Il legno di conifera subisce i seguenti ritiri e rigonfiamenti per ogni punto percentuale di umidità (k = coefficienti di ritiro e rigonfiamento per il legno di conifera):

- in direzione longitudinale k = 0,0001
- in direzione radiale k = 0,0012
- in direzione tangenziale k = 0,0024

Ad esempio un cubetto di legno di lato 100mm passando da $U_{in} > 30\%$ a $U_{fin} = 10\%$ perde:

- in direzione longitudinale $100 \times 0,0001 \times (30-10) = 0,2\text{mm}$ diventando 99,8mm
- in direzione radiale $100 \times 0,0012 \times (30-10) = 2,4\text{mm}$ diventando 97,6mm
- in direzione tangenziale $100 \times 0,0024 \times (30-10) = 4,8\text{mm}$ diventando 95,2mm



Per il legno di latifoglia di quercia si hanno i seguenti coefficienti di ritiro e rigonfiamento:

- in direzione longitudinale k = 0,0001
- in direzione radiale k = 0,0020
- in direzione tangenziale k = 0,0040

La norma EN14080:2013 stabilisce convenzionalmente per il legno lamellare incollato:

umidità di riferimento $U_{ref} = 12\%$

in direzione longitudinale k = 0,0001

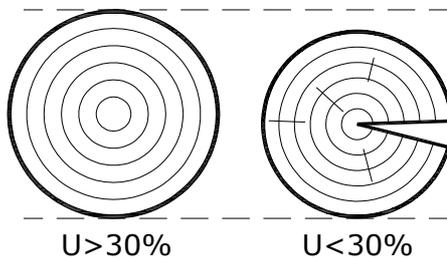
non essendo possibile distinguere la direzione radiale dalla tangenziale si considera la direzione *trasversale* e per essa si assume k = 0,0025



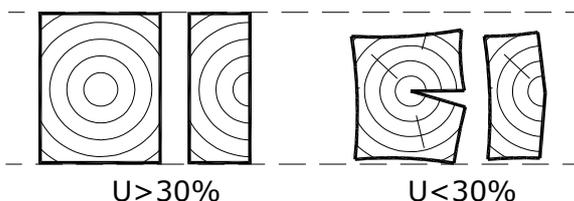
L'umidità del legno si può misurare in cantiere per mezzo degli igrometri elettrici, apparecchi che misurano la resistenza elettrica fra due elettrodi (chiodi) infissi nel legno la quale è correlata con l'umidità del legno.

1.5 Le fessure da ritiro

Essendo il ritiro tangenziale maggiore di quello radiale, alla perdita di umidità corrisponde una diminuzione del diametro del tronco ed una distorsione della sezione in quanto il ritiro dell'anello è circa doppio rispetto al ritiro del raggio; si formano le fessure da ritiro, una principale ampia che va dal centro del tronco (midollo) alla corteccia ed eventualmente altre di minor entità ma sempre tutte radiali.



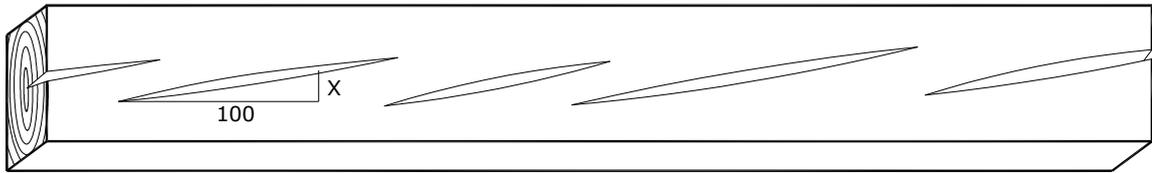
Se la stagionatura avviene dopo la squadratura del tronco, come è giusto che si faccia, il segato si distorcerà e formerà le fessure da ritiro in maniera diversa se contiene o meno il centro del tronco:



Dunque solo le sezioni ricavate senza includere il centro del tronco (cosiddette "fuori cuore") non formeranno la fessura principale da ritiro ma subiranno solo una distorsione; saranno comunque presenti le fessure da ritiro secondarie, cioè quelle di ampiezza sottile ma comunque di estensione altrettanto importante in confronto alle fessure principali.

E' chiaro che il segato può essere nuovamente squadrato dopo la stagionatura ma, visto che la stagionatura necessita di alcuni anni, il legno viene quasi sempre commercializzato e messo in opera fresco, pertanto la diminuzione di sezione, distorsione e fessurazione avviene quasi sempre in opera.

Le fessure da ritiro seguono la fibratura e pertanto ne denunciano l'inclinazione rispetto all'asse del segato (o del tronco); l'inclinazione si esprime in percentuale.



Generalmente le fessure da ritiro principali compaiono su di una sola faccia del segato e sono concentrate nella mezzeria di una delle facce più grandi.

Chiaramente un segato di legno fresco (cioè ad umidità superiore al 30%) non mostra le fessure da ritiro.

Meccanicamente le fessure da ritiro, sia quelle principali che quelle secondarie che si riscontrano anche nel legno lamellare incollato, sono indebolimento solo nei confronti della resistenza a taglio della sezione, tuttavia di tale fatto se ne tiene conto nel calcolo delle tensioni di taglio che viene condotto su di una sezione opportunamente ridotta.

Le fessure da ritiro sono un fatto fisiologico che generalmente non deve destare preoccupazione, tuttavia in alcuni casi diventano strutturalmente intollerabili, ad esempio quando una trave è affetta da fessure su due facce e queste si incontrano dividendo in due la sezione oppure quando queste passano lo spigolo determinando una vera e propria rottura come nelle seguenti foto:

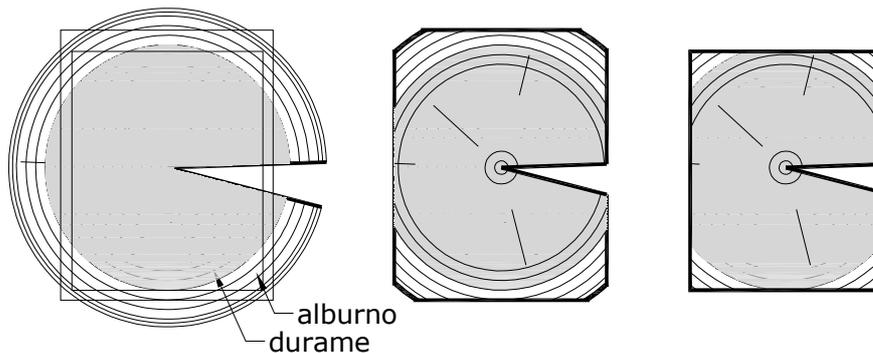


1.6 Alburno e durame



Il tronco è formato da una parte centrale detto *durame* che, durante la vita dell'albero, è legno messo a riposo e conserva la sola funzione portante per la pianta; in esso, in alcune specie legnose dette a “durame differenziato” vengono depositate le sostanze estrattive quali i tannini che generalmente conferiscono al legno una colorazione più scura e lo rendono anche più resistente agli attacchi biologici.

Gli anelli più periferici formano l'*alburno* che nella pianta in piedi è legno che conduce la linfa; generalmente è di colore più chiaro rispetto al durame e dopo l'abbattimento, a differenza del durame, conserva alcune sostanze quali gli amidi e gli zuccheri.



L'alburno è più presente nelle sezioni a spigolo smussato (uso Fiume o uso Trieste) rispetto a quelle a spigolo vivo.

Le proprietà meccaniche dell'alburno e del durame praticamente identiche fra loro, le caratteristiche di durabilità invece sono spesso nettamente diverse come si vedrà in seguito.

Alcune specie legnose, dette a “durame non differenziato” come l'abete, hanno il durame povero di estrattivi, infatti è bianco come l'alburno (cromaticamente non differenziato).

1.7 Biodegradamento, durabilità e preservazione

Il legno ha l'indubbio vantaggio di essere un materiale totalmente biodegradabile, questo però non significa che sicuramente si degraderà nel tempo. Il degrado biologico ad opera di funghi della carie ed insetti xilofagi avviene solo in certe condizioni, inoltre esistono specie legnose più o meno resistenti all'attacco biologico e parti del tronco maggiormente degradabili.

Se il legno si degrada non è colpa del legno ma del progettista: la scelta della specie legnosa in funzione dell'ambiente in cui l'elemento verrà messo in opera, l'eventuale trattamento preservante, i dettagli costruttivi, la protezione dall'umidità rendono il legno materiale eterno. Il legno non subisce alcun degrado e decadimento delle proprietà meccaniche semplicemente dovuto al passare del tempo.

Dal punto di vista della durabilità non fa differenza che il legno sia massiccio o lamellare; il legno lamellare è solo un po' meno suscettibile all'attacco da insetti come si vedrà in seguito.

La diagnosi dello stato di degrado delle strutture in opera fa parte della Tecnologia del Legno ed è materia del Dottore in Scienze Forestali.

1.7.1 Il degrado da funghi della carie

I funghi della carie si diffondono nell'aria attraverso le spore, le spore sul legno germinano se questo supera il 20% di umidità; i funghi si diffondono nella massa legnosa attraverso le ife e non necessariamente danno origine al corpo fruttifero visibile; le ife degradano chimicamente il legno (la lignina o la cellulosa o entrambe) determinando una forte diminuzione di resistenza del materiale anche nei primi stadi dell'attacco quando questo non è ancora visibile e non ha ancora dato luogo al fenomeno più macroscopico della marcescenza.

L'attacco fungino avanza fintanto che permangono condizioni di umidità favorevoli; non appena l'umidità del legno ritorna a valori inferiori al 20% il fungo cessa la sua attività, tuttavia il danno causato rimane e se l'umidità del legno ritorna ad essere elevata il fungo riprende la sua attività.

Spesso l'attacco fungino avviene all'interno degli elementi lignei senza manifestazioni all'esterno in quanto, in condizioni di umidità favorevoli all'attacco, la superficie del legno è più asciutta e quindi si preserva dall'attacco.

Le zone maggiormente soggette ad attacco fungino sono le parti conglobate nelle murature (o nei cordoli), ciò per vari motivi: il legno non è ventilato e un aumento di umidità non riesce ad essere smaltito, la muratura favorisce la permanenza di condizioni umide, l'umidità propria del legno condensa in corrispondenza del muro esterno freddo ed il legno si bagna fungendo da "pompa" che capta l'umidità dell'aria degli ambienti interni e la condensa in testata.

Per i motivi anzi detti l'attacco fungino è molto pericoloso.

Sia l'alburno che il durame sono soggetti ad attacco fungino, tuttavia esistono specie legnose, quali il castagno e le querce, il cui durame è più resistente rispetto alle altre specie legnose.

1.7.2 Il degrado da insetti xilofagi

Gli insetti che attaccano il legno sono di varie famiglie e pertanto hanno ciclo vitale diverso.

Il ciclo di vita di un insetto (ad eccezione delle termiti) parte dalla deposizione delle uova da parte di un insetto adulto (farfalla) su piccole cavità o fessure del legno. L'uovo si schiude e dà vita alla larva che penetra nella massa legnosa mangiandolo e scavando gallerie.

La larva può vivere e lavorare nel legno anche alcuni anni.

Poi si trasforma in insetto perfetto (con le ali) ed abbandona il legno forandone la superficie, si accoppia e depone le uova dando origine ad un nuovo ciclo vitale.

Il legno lamellare ha molte meno fessure rispetto al legno massiccio e sicuramente di ampiezza molto minore, per questo motivo l'insetto adulto ha difficoltà a deporre in esso le uova. Qualora il legno lamellare venga attaccato la larva non riesce a passare le superfici incollate e pertanto resta all'interno della singola tavola. Per questi motivi generalmente gli attacchi da insetti nelle travi di legno lamellare sono spesso piuttosto limitati.

È importante osservare che i fori che si riscontrano sulla superficie non sono fori di ingresso ma di uscita ovvero *fori di sfarfallamento* e pertanto la loro quantità non ci fornisce indicazioni sull'entità dell'attacco in corso.

Generalmente gli insetti mangiano la sola parte periferica del tronco, l'alburno, essendo questo più ricco di sostanze a loro gradite come gli amidi e gli zuccheri.

Il durame, se differenziato come nella quercia e nel castagno, è molto resistente all'attacco perché ricco di sostanze estrattive (tannini) che lo rendono sgradevole agli insetti.

Fanno eccezione le specie a durame non differenziato come l'abete che hanno il durame povero di estrattivi e pertanto vengono attaccate principalmente nell'alburno ma anche nel durame.

Gli amidi e gli zuccheri contenuti nel legno col tempo tendono a trasformarsi rendendo il materiale non più gradito agli insetti e, superati gli 80-100 anni dall'abbattimento, il legno diventa praticamente immune all'attacco da parte della maggior parte delle famiglie di insetti xilofagi che attaccano il legno in opera. Pertanto generalmente le strutture antiche non hanno attacchi di insetti in corso ma eventualmente pregressi e potrebbero non aver bisogno di trattamenti preservanti.

1.7.3 Preservazione

Il legno è un materiale impermeabile (con esso si fanno le botti, le scandole che si utilizzano in alternativa alle tegole), si bagna ma difficilmente si riesce a far penetrare in esso una sostanza liquida, questo è il grosso limite dei trattamenti preservanti.

Esistono tuttavia alcune specie legnose, come il pino, che hanno una scarsa durabilità naturale ma che risultano permeabili alle sostanze preservanti.

I trattamenti possono essere *preventivi* o *curativi*.

Trattamenti preventivi

I trattamenti preventivi si fanno generalmente in stabilimento mediante impregnazione (per le specie impregnabili come il pino) o superficiali a pennello per le specie legnose non impregnabili (come l'abete).

I trattamenti superficiali contro gli insetti generalmente sono a base di sostanze quali la permetrina o sali di boro, riescono a penetrare solo di qualche millimetro, tuttavia tale penetrazione è sufficiente ad ammazzare la larva appena nasce in quanto l'uovo generalmente è posato in prossimità della superficie del legno. Qualora il trattamento venga fatto su legno fresco non ancora o poco fessurato, le fessure da ritiro che si apriranno dopo il trattamento risulteranno non protette e quindi ottimo luogo per l'insetto adulto per deporre le uova; il trattamento quindi deve essere ripetuto dopo l'apertura delle fessure proprio in corrispondenza di queste. Il trattamento ha comunque efficacia limitata nel tempo, pertanto ogni circa 10 anni dovrebbe essere ripetuto.

I trattamenti superficiali contro i funghi della carie hanno il solo effetto di ritardare l'attacco fungino ma sicuramente non rendono il legno immune dal degrado specie in ambienti molto umidi o a contatto col terreno.

I trattamenti profondi, efficaci sia contro i funghi che gli insetti, si conferiscono in autoclave per immersione mediante cicli di vuoto e pressione al termine dei quali si ottiene un materiale impregnato con le sostanze preservanti anche in profondità. È il caso dei pali per linee aeree o degli arredi da giardino, spesso realizzati con pino impregnato in autoclave, che resistono per alcune decine di anni a contatto col terreno, cioè in classe di rischio elevata.

Trattamenti curativi

Contro gli attacchi da insetti in corso esistono trattamenti con gas velenosi o con le atmosfere modificate ai quali si ricorre solo in casi eccezionali essendo molto costosi e difficoltosi da utilizzare. Si possono utilizzare i trattamenti a pennello o con gel che impediscono la formazione di nuove larve, tuttavia le larve già all'interno del legno continueranno a lavorare fino allo sfarfallamento.

Contro l'attacco da funghi della carie l'unico intervento risolutivo è la rimozione della causa dell'umidità; un eventuale trattamento a pennello non ha grande efficacia se continuano a permanere le condizioni di umidità elevata.

Dopo aver bloccato il degrado e rimosse le cause andrà valutata la necessità di intervenire con interventi di consolidamento.

1.7.4 La durabilità naturale

In linea generale si può affermare che:

◆ **Alburno:**

- L'alburno di tutte le specie è poco durabile sia nei confronti dei funghi che insetti; nel castagno lo strato di alburno periferico generalmente è inferiore al centimetro, nel larice, pino e nelle querce di alcuni centimetri, pertanto il castagno una volta squadrato perde pressoché totalmente l'alburno; il larice, pino e le querce continuano a conservarne importanti quantità almeno sugli spigoli.

◆ **Durame:**

➤ **Funghi:**

- Le specie legnose maggiormente durabili sono: querce, robinia, castagno, larice. In condizioni di umidità la marcescenza si manifesta comunque ma in un tempo lungo dell'ordine delle decine di anni.
- Le specie moderatamente durabili sono: douglasia, pino silvestre. In condizioni di umidità la marcescenza si manifesta in alcuni anni.
- Le specie poco durabili sono: abete (rosso e bianco), pioppo.

➤ **Insetti coleotteri:**

- Le specie legnose a durame differenziato ed il pioppo sono resistenti all'attacco da insetti coleotteri (tutte le specie legnose citate al § 1.2 “Specie legnose“ a pagina 3, ad eccezione dell'abete bianco e rosso).
- L'abete sia bianco che rosso, che è a durame non differenziato, non è resistente all'attacco da insetti.

➤ **Insetti isoteri (termiti):**

- In generale le conifere non sono resistenti all'attacco da termiti.
- Le latifoglie sono generalmente moderatamente resistenti.

Per una trattazione completa dell'argomento si guardi [7] e la norma EN350.

2 NORMATIVA TECNICA PER LE COSTRUZIONI IN LEGNO

2.1 La situazione normativa attuale nel nostro paese

Al momento attuale in Europa è in pieno atto il processo di recepimento da parte dei vari paesi membri dei cosiddetti Eurocodici per il calcolo delle strutture portanti realizzate con i vari materiali da costruzione: acciaio, cemento armato, muratura, alluminio e legno.

Nel contempo anche le norme nazionali si stanno evolvendo e le nuove versioni assumono una forma simile a quella dell'Eurocodice pur mantenendo alcune caratteristiche del Paese in cui la norma nazionale si sviluppa.

E' stato pubblicato il DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" (di seguito indicato come DM08). Le nuove norme tecniche contengono per la prima volta in Italia tre capitoli relativi alla progettazione di strutture di legno:

- il capitolo 4.4 "Costruzioni di legno" all'interno del Capitolo 4 "Costruzioni civili e industriali";
- il capitolo 7.7 "Costruzioni di legno" all'interno del Capitolo 7 "Progettazione per azioni sismiche";
- il capitolo 11.7 "Materiali e prodotti a base di legno" all'interno del Capitolo 11 "Materiali e prodotti per uso strutturale".

Si noti però che il DM08, composto da oltre 500 pagine, dedica solo 26 pagine al legno, pertanto non è sufficiente per progettare ma da esso possiamo prendere solo i principi ed i coefficienti di sicurezza.

Inoltre hanno già superato la fase di inchiesta pubblica le CNR DT 206/2007 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno" (il documento è scaricabile all'indirizzo www.cnr.it nella sezione "Normazione e Certificazione" applicative per le strutture di legno, che contengono tutte le formule di calcolo e di verifica non presenti nelle Norme Tecniche DM08. Le Istruzioni sono state redatte sulla falsariga dell'Eurocodice e costituiscono uno di quei documenti applicativi di corredo alle Norme Tecniche citati nel Capitolo 12 "Riferimenti Tecnici".

Parallelamente è possibile utilizzare gli Eurocodici, ossia i documenti normativi europei per la progettazione strutturale che, secondo una direttiva della Comunità Europea, dal 2010 dovranno coesistere con le varie normative nazionali degli stati membri dovranno e potranno essere utilizzati al pari di queste ultime, considerando che i coefficienti di sicurezza dovranno essere comunque stabiliti dalle Autorità Nazionali.

L'Eurocodice 5 è tra l'altro attualmente il documento normativo esistente più completo per la progettazione delle strutture di legno e il suo utilizzo e applicazione (salvo per i valori dei coefficienti di sicurezza che vanno comunque presi dal DM08) non va in contrasto con le succitate Norme Tecniche.

2.2 Qualificazione e certificazione

Il DM08, in vigore dal 1 luglio 2009, e la sua circolare esplicativa n.617/09 al capitolo 11.7 stabiliscono i criteri di qualificazione ed identificazione dei prodotti a base di legno.

I prodotti coperti da norma europea armonizzata devono essere coperti da **marcatatura CE** secondo le norme europee pertinenti.

Prima del gennaio 2012 in Italia esisteva anche un sistema di qualificazione ministeriale alternativo alla marcatatura CE.

In particolare:

<i>prodotto</i>	<i>obbligo marcatura CE dal</i>	<i>norma europea armonizzata</i>
Legno massiccio	1 gennaio 2012	EN 14081
Legno lamellare	1 dicembre 2011	EN 14080

Per prodotti innovativi non citati dal DM08 (ad esempio i pannelli di legno massiccio a strati incrociati) e non coperti da specifica norma europea armonizzata il prodotto deve comunque avere la marcatura CE in base ad una procedura ETA (European Technical Approval) oppure essere coperto da un certificato di idoneità tecnica all'impiego rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale o da certificato di idoneità tecnica all'impiego rilasciato da organismi europei e riconosciuto dal Servizio Tecnico Centrale (ad esempio i certificati tedeschi *Zulassung* oppure gli *Avis Technique* francesi).

2.2.1 Qualificazione ministeriale degli stabilimenti

Una prima distinzione è fra *centri di produzione* e *centri di lavorazione*.

Produttori sono gli stabilimenti che producono elementi di legno massiccio o lamellare partendo dal tronco o da semilavorati, essi devono essere in possesso dell'**Attestato di Qualificazione** rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale.

Centri di lavorazione sono gli stabilimenti in cui viene effettuata la lavorazione degli elementi base provenienti dai produttori per dare loro la configurazione finale in opera (tagli, intagli, forature, applicazione di ferramenta, ecc.) che però non modificano le proprietà meccaniche dell'elemento; essi devono possedere l'**Attestato di Denuncia di Attività** rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale.

2.2.2 Qualificazione con marcatura CE

I produttori devono rispettare la pertinente norma europea armonizzata che prescrive una serie di adempimenti e controlli da parte di organismi di controllo, nonché avere un sistema di qualità riconosciuto.

Sia i produttori che i centri di lavorazione devono apporre in maniera indelebile il proprio marchio anche mediante etichettatura (precedentemente depositato presso il Servizio Tecnico Centrale) su ogni elemento prodotto o lavorato. In certi casi è possibile apporre il marchio solo sulla confezione del gruppo omogeneo di prodotti. Insieme al marchio deve essere riportato anche il tipo di legno, il lotto e la data di produzione o classificazione.

Ogni fornitura deve essere accompagnata dal **Certificato di conformità CE** rilasciato dall'organismo di controllo o **Dichiarazione di conformità CE** rilasciata dallo stesso produttore.

Deve essere accompagnata anche dai **documenti di trasporto** di tutti i trasportatori dallo stabilimento di produzione o lavorazione al cantiere.

Nel caso in cui il materiale sia qualificato secondo norma europea armonizzata e sia lavorato da un centro di lavorazione, il DM08 e la relativa circolare non stabiliscono gli obblighi del centro di lavorazione, tuttavia si ritiene che in questo caso si rientri nelle procedure di qualificazione ministeriale del centro di lavorazione anche se il materiale è originariamente qualificato con marcatura CE.

2.3 Progettare la durabilità

Il DM 08, per la prima volta, è molto chiaro nei riguardi della progettazione della durabilità.

Si riportano alcuni passi:

“2.4.1 Vita nominale

“è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata”

Opere provvisorie ≥ 10 anni

Opere ordinarie ≥ 50 anni

Grandi opere ≥ 100 anni”

Cioè bisogna assicurare che con la sola manutenzione ordinaria l'opera duri per la vita nominale di progetto. Durante la vita nominale l'opera non dovrebbe avere bisogno di manutenzione straordinaria.

La classificazione di un intervento in manutenzione ordinaria e straordinaria non è definito, tuttavia, con riferimento alle strutture di legno, ad esempio si può ipotizzare che il trattamento insetticida periodico possa essere inteso come manutenzione ordinaria, mentre la sostituzione di una trave perché gravemente attaccata da insetti sia un intervento di manutenzione straordinaria. Questo purché il trattamento insetticida sia previsto, programmato e descritto nel piano di manutenzione.

“2.5.4 Degrado

La protezione contro l'eccessivo degrado deve essere ottenuta attraverso una opportuna scelta dei dettagli, dei materiali e delle dimensioni strutturali, con l'eventuale applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi, nonché l'adozione di altre misure di protezione attiva o passiva”

E' chiaro che questa frase è indirizzata al Progettista; egli è quindi investito dell'onere di progettare la durabilità ed è anche il primo responsabile della durabilità dell'opera.

Figura 2.1: Pilastrini di legno incastrati alla base in bicchieri di calcestruzzo.

Il Progettista ha pensato ai pilastrini in legno incastrati alla base in una trave di calcestruzzo armato.

Si è preoccupato di far passare i ferri di armatura per aumentare il grado di incastro.

Ha sottovalutato la “trappola di umidità” che costituisce il bicchiere di calcestruzzo e che ha provocato la carie (marcescenza) del legno in pochi anni.

Il problema non deriva dalla mancanza di manutenzione ordinaria ma da cattiva progettazione; la progettazione ha curato gli aspetti strutturali ma non la durabilità.

(Foto Mauro Dasasso)



2.4 Le proprietà meccaniche del materiale legno

Le proprietà meccaniche degli elementi strutturali di legno dipendono dalla specie legnosa e dai difetti in esso contenuti che ne determinano la categoria.

Dipendono anche dalla direzione di sollecitazione rispetto alle direzioni anatomiche, tuttavia nella progettazione delle strutture di legno si abbandona la distinzione fra direzione radiale e tangenziale ma si parla solo di *trasversale* ovvero *ortogonale*; pertanto per il legno strutturale si farà riferimento a due sole direzioni:

LONGITUDINALE	direzione dell'asse del segato coincidente con l'asse verticale della pianta in piedi, detta anche direzione parallela alla fibratura ¹ , anche indicata con “0” (zero gradi);
TRASVERSALE	ortogonale all'asse del segato, ricomprende e confonde le direzioni tangenziale e radiale, anche indicata con “90” (90 gradi rispetto alla direzione longitudinale).

Le proprietà meccaniche del materiale legno (massiccio di conifera e pioppo, massiccio di latifolia, lamellare incollato) sono date nei paragrafi seguenti in funzione delle classi di resistenza secondo il sistema europeo.

Le proprietà sono elencate di seguito; il pedice "k" si riferisce al valore caratteristico (frattile 5%, a volte indicato con "0,05"), il pedice "mean" si riferisce al valore medio.

¹ Dal punto di vista della Tecnologia del Legno la “direzione della fibratura” è la direzione di orientamento generale delle cellule che, per vari motivi, può essere inclinata rispetto all'asse del segato (del tronco). Tuttavia nella Tecnica delle Costruzioni in Legno si parla impropriamente di “direzione parallela alla fibratura” per indicare la direzione parallela all'asse del segato che non necessariamente è parallelo alla fibratura (fibratura deviata che è un difetto che diminuisce le proprietà meccaniche del legno). Tuttavia della deviazione della fibratura se ne tiene conto in sede di classificazione del legno per usi strutturali; poi il Tecnico Progettista non si dovrà più preoccupare della effettiva deviazione di fibratura assumendo convenzionalmente la direzione della fibratura parallela all'asse del segato.

Proprietà di resistenza	Valore caratteristico (frattile 5% inferiore)	Valore medio
Flessione	$f_{m,k}$	
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	
Taglio	$f_{v,k}$	
Taglio per rotolamento (*)	$f_{r,k}$	
Proprietà di rigidezza		
Modulo di elasticità parallelo	$E_{0,k}$	$E_{0,mean}$
Modulo di elasticità perpendicolare	$E_{90,k}$	$E_{90,mean}$
Modulo di elasticità tangenziale	G_k	G_{mean}
Modulo di elasticità tangenziale per rotolamento	$G_{rol,k}$	$G_{rol,mean}$
Massa volumica		
Massa volumica	ρ_k	ρ_{mean}
Alcuni valori che non vengono forniti nelle tabelle seguenti possono essere assunti: $f_{r,k} = 2,0 f_{t,90,k}$ (nota al § 6.1.7 dell'Eurocodice 5) $G_k = 2/3 G_{mean}$ per legno massiccio di conifera e pioppo (DIN 1052:2004 tabella F.5) $G_k = 5/6 G_{mean}$ per legno massiccio di latifoglia e legno lamellare incollato (DIN 1052:2004 tabella F.7 ed F.9) $G_{rol,mean} = 0,10 G_{mean}$ per legno massiccio di conifera e legno lamellare incollato (DIN 1052:2004 tabella F.5 ed F.9)		

Tabella 2.1: Proprietà di resistenza, rigidezza e massa volumica e relativa simbologia.

2.4.1 La classificazione secondo la resistenza

La classificazione secondo la resistenza consente di suddividendo i segati in *categorie* in base alla difettosità; la categoria viene attribuita mediante l'operazione di classificazione del segato in dimensioni d'uso, la classificazione consente di selezionare i segati in categorie aventi proprietà meccaniche omogenee all'interno della stessa categoria e di scartare gli elementi con proprietà meccaniche eccessivamente basse.

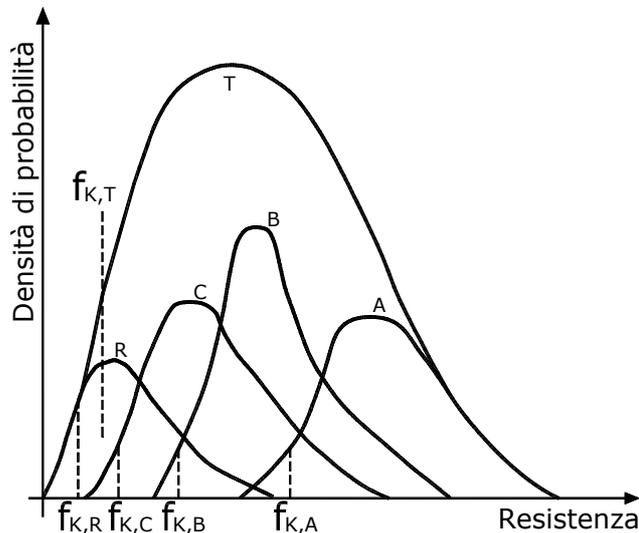
Classificando in categorie di qualità resistente, in base al tipo ed entità dei difetti presenti (ad es. dimensioni dei nodi, inclinazione della fibratura, ma anche in base allo spessore degli anelli di accrescimento che è correlato con la massa volumica) è possibile suddividere il legname in funzione della sua resistenza.

Le regole di classificazione sono diverse da Paese a Paese (più precisamente area geografica) perché generalmente "calibrate" sui legni di produzione locale, pertanto il legno si deve classificare utilizzando la norma del Paese di origine. Ogni norma di classificazione è ulteriormente suddivisa in base alla specie legnosa, pertanto ad esempio il larice di produzione francese si classifica utilizzando le regole per il larice scritte nella norma francese, mentre la douglasia di produzione tedesca si classifica secondo le regole per la douglasia della norma tedesca.

Le norme di classificazione sono state scritte utilizzando il seguente metodo: per ciascun *tipo di legno* (specie legnosa, provenienza, categoria), dopo una metodica ed estesa campagna di prove a rottura su elementi in dimensioni d'uso (si veda [1] cap. 4), è

possibile determinare la distribuzione delle resistenze che compete a ciascuna categoria e determinarne il valore caratteristico al frattile 5% (a titolo di esempio nella figura si sono individuate tre categorie, A, B, C ed R, quest'ultima comprendente gli elementi rifiutati).

Questo lavoro di ricerca viene ripetuto ogni qualvolta un Paese voglia scrivere delle regole di classificazione per una specie legnosa di una determinata provenienza non ancora coperta da regole di classificazione; alcuni legnami di produzione italiana sono attualmente in fase di studio e per essi non esistono ancora regole di classificazione.



Come si può vedere dal diagramma, le regole di classificazione non sono efficienti al 100% giacché non consentono di collocare tutti i pezzi migliori nella categoria più alta e i pezzi peggiori tutti nella categoria più bassa.

Tuttavia le regole di classificazione sono essenziali perché consentono comunque di individuare valori diversi e scalati di resistenze di riferimento utili per il calcolo, e quindi di avere un progetto più efficiente sfruttando al meglio il materiale.

Si noti che la parte di coda a sinistra delle distribuzioni di resistenza è pressoché tronca: il che vuol dire che con il legno, una volta classificato, per ogni gruppo le resistenze minime sono più basse di quella caratteristica ma non sono molto diverse da quest'ultima.

In assenza di classificazione si dovrebbe adottare come valore di resistenza caratteristica per tutto il lotto di segati un unico valore $f_{k,T}$ piuttosto basso.

2.4.2 Le proprietà meccaniche del legno massiccio

La categoria è legata alla norma di classificazione del Paese di origine, in generale ogni Paese ha le sue sigle che identificano le varie categorie; in Europa esiste una norma di raccordo, la EN 1912, che stabilisce l'equivalenza in termini di proprietà meccaniche dei tipi di legno di produzione europea; ciascun tipo di legno può essere quindi collocato in una **classe di resistenza europea** alla quale corrispondono determinate proprietà meccaniche.

classe di resistenza secondo EN 338	categoria (norma nazionale)	specie legnosa	provenienza
C30	ST-I (Francia)	Abete rosso e bianco	Francia
	S13 (Germania, Austria e Repubblica Ceca)	Abete rosso e bianco, Pino silvestre, Larice	Europa centrale, del nord e dell'est
	S1 (Italia)	Douglasia (massima altezza e larghezza 100mm)	Italia (max 100mm)
	T3 (Paesi nordici)	Abete rosso e bianco, Pino silvestre, Larice	Europa del nord e del nord-est
	S0 (Slovacchia)	Abete rosso	Slovacchia
	ME1 (Spagna)	Pino laricio	Spagna
C24	ST-II (Francia)	Abete rosso e bianco, Douglasia, Pini, Pioppo, Larice	Francia
	S10 (Germania)	Abete rosso e bianco, Pino silvestre, Larice	Europa centrale, del nord e dell'est
	S10 (Germania)	Douglasia	Germania e Austria
	S2 (Italia)	Pino nero, abete rosso e bianco	Italia
	T2 (Paesi nordici)	Abete rosso e bianco, Pino silvestre, Larice	Europa del nord e del nord-est
	T2 (Paesi nordici)	Sitka spruce	Danimarca e Norvegia
	SI (Slovacchia)	Abete rosso	Slovacchia
	S10 (Slovenia)	Abete rosso e bianco	Slovenia
	ME1 (Spagna)	Pino radiato, Pino marittimo	Spagna
	SS (Regno Unito)	Pino del Paraná	Brasile
	SS (Regno Unito)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre	Europa centrale, del nord e dell'est
	SS (Regno Unito)	Douglasia, Larice	USA e Canada
	SS (Regno Unito)	Pino pece	Caraibi
	SS (Regno Unito)	Larice	Regno Unito
J&P Sel (Canada) SLF Sel (Canada)	Douglasia, Larice, Abete rosso e bianco, Pino	USA e Canada	

Tabella 2.2 Assegnazione delle categorie e specie legnose alle classi di resistenza per legno strutturale secondo EN 1912:2012, tabella non completa. Questa tabella consente di associare ciascun "tipo di legno" (identificato dalla terna "categoria" - "specie legnosa" - "provenienza") ad una classe di resistenza. Da notare che la categoria si riferisce alla norma di classificazione specifica per il paese di origine (della provenienza) in quanto il legno si classifica secondo norme tarate in funzione dell'area geografica di crescita del legno.

Per il legno massiccio il sistema europeo (EN 1912 + EN 338) consente di associare ad ogni tipo di legno (**tipo di legno = specie-provenienza-categoria**, cioè un segato con sezione in dimensioni di uso di una determinata specie legnosa, cresciuto in una determinata area geografica e classificato in una determinata categoria secondo la norma di classificazione del paese di origine) una classe di resistenza alla quale corrisponde un certo profilo di resistenza. Attualmente sono inserite nel sistema europeo molti tipi di legno europei e di altre zone geografiche, ma non tutti; alcune corrispondenze si possono però trovare nelle norme nazionali, ad esempio:

D24: quercia francese classe 2 (norma NF B 52-001)

D18: quercia francese classe 3 (norma NF B 52-001)

Altre tipi di legno di provenienza italiana (norma UNI 11035:2010)

Classe di resistenza		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
<i>Proprietà di resistenza in N/mm²</i>													
Flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,40											
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Taglio	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
<i>Proprietà di rigidezza in N/mm²</i>													
Modulo di elasticità parallelo medio	$E_{0,mean}$	7 000	8 000	9 000	9 500	10 000	11 000	11 500	12 000	13 000	14 000	15 000	16 000
Modulo di elasticità parallelo caratteristico	$E_{0,k}$	4 700	5 400	6 000	6 400	6 700	7 400	7 700	8 000	8 700	9 400	10 000	10 700
Modulo di elasticità perpendicolare medio	$E_{90,mean}$	230	270	300	320	330	370	380	400	430	470	500	530
Modulo di taglio medio	G_{mean}	440	500	560	590	630	690	720	750	810	880	940	1 000
<i>Massa volumica in kg/m³</i>													
Massa volumica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Massa volumica media	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabella 2.3 Profili resistenti delle varie classi di resistenza di legno massiccio di conifera e pioppo così come individuate nella norma EN 338:2009.

Il legno massiccio di conifera importato in Italia proviene in gran parte dal centro Europa (Austria, Germania), in tali Paesi si classifica con la norma DIN 4074 che prevede per il legno massiccio le classi S7, S10 ed S13 che corrispondono rispettivamente alle classi di resistenza europee C16 (o C18 per alcuni tipi di legno), C24 e C30.

Classe di resistenza		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<i>Proprietà di resistenza in N/mm²</i>									
Flessione	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Taglio	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
<i>Proprietà di rigidezza in N/mm²</i>									
Modulo di elasticità parallelo medio	$E_{0,mean}$	9 500	10 000	11 000	12 000	13 000	14 000	17 000	20 000
Modulo di elasticità parallelo caratteristico	$E_{0,k}$	8 000	8 500	9 200	10 100	10 900	11 800	14 300	16 800
Modulo di elasticità perpendicolare medio	$E_{90,mean}$	630	670	730	800	860	930	1 130	1 330
Modulo di taglio medio	G_{mean}	590	620	690	750	810	880	1 060	1 250
<i>Massa volumica in kg/m³</i>									
Massa volumica	ρ_k	475	485	530	540	550	620	700	900
Massa volumica media	ρ_{mean}	570	580	640	650	660	750	840	1080

Tabella 2.4 Profili resistenti delle varie classi di resistenza di legno massiccio di latifoglia così come individuate nella norma EN 338:2009.

Il legno di provenienza italiana è solo parzialmente contemplato nella EN 1912, per esso esiste una specifica norma italiana, la UNI 11035, che fornisce sia le regole di classificazione che i profili di resistenza per le varie classi; inoltre, per alcuni tipi di legno, stabilisce l'equivalenza con le classi di resistenza europee.

Specie/provenienza	Abete / Italia		Pino laricio / Italia			Larice / Nord Italia		Douglasia / Italia		Altre conifere ⁽²⁾ / Italia			
	S2	S3	S1	S2	S3	S2	S3	S1 ⁽¹⁾	S2/3	S1	S2	S3	
Corrispondenza classe di resistenza EN 338	C24	C18	C40	C22	C14	C22	C18	C35	C22				
<i>Proprietà di resistenza in N/mm²</i>													
Flessione	f _{m,k}	25	18	40	22	15	23	18	35	22	33	26	22
Trazione parallela	f _{t,0,k}	15	11	24	13	9	14	11	21	13	20	16	13
Trazione perpendicolare	f _{t,90,k}	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressione parallela	f _{c,0,k}	21	18	26	20	17	20	18	25	20	24	22	20
Compressione perpendicolare	f _{c,90,k}	2,6	2,6	3,2	3,0	3,0	3,6	3,6	3,2	2,9	3,7	3,7	3,7
Taglio	f _{v,k}	4,0	3,4	4,0	3,8	3,0	3,8	3,4	4,0	3,8	4,0	4,0	3,8
<i>Proprietà di rigidezza in N/mm²</i>													
Modulo di elasticità parallelo medio	E _{0,mean}	11 800	10 500	15 000	12 000	11 000	12 500	11 500	15 800	13 000	12 300	11 400	10 500
Modulo di elasticità parallelo caratteristico	E _{0,k}	7 900	7 000	10 000	8 000	7 400	8 400	7 700	11 000	8 700	8 200	7 600	7 000
Modulo di elasticità perpendicolare medio	E _{90,mean}	390	350	500	400	370	420	3808	530	430	410	380	350
Modulo di taglio medio	G _{mean}	740	660	940	750	690	780	720	990	810	770	710	660
<i>Massa volumica in kg/m³</i>													
Massa volumica	ρ _k	375	375	455	425	430	510	520	450	415	530	530	530
Massa volumica media	ρ _{mean}	450	450	550	520	520	610	620	540	500	575	575	575
(1) Massima altezza e larghezza 100mm.													
(2) Pino silvestre, Pino nero, Pino marittimo, Pino domestico, Pino strobo, Cipresso, Cedro													

Tabella 2.5 Categorie e profili resistenti delle varie classi di resistenza di legno massiccio di conifera così come individuate nella norma UNI 11035:2010.

Specie/provenienza		Castagno / Italia	Querce caducifoglie / Italia	Pioppo e Ontano / Italia	Altre latifoglie ⁽²⁾ / Italia
		S	S	S	S
Corrispondenza classe di resistenza EN 338		D24 ⁽¹⁾			
<i>Proprietà di resistenza in N/mm²</i>					
Flessione	f _{m,k}	28	42	26	27
Trazione parallela	f _{t,0,k}	17	25	16	16
Trazione perpendicolare	f _{t,90,k}	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressione parallela	f _{c,0,k}	22	27	22	22
Compressione perpendicolare	f _{c,90,k}	7,3	11	6,3	7,7
Taglio	f _{v,k}	4	4	2,7	4
<i>Proprietà di rigidezza in N/mm²</i>					
Modulo di elasticità parallelo medio	E _{0,mean}	12 500	12 000	8 000	11 500
Modulo di elasticità parallelo caratteristico	E _{0,k}	10 500	10 100	6 700	9 700
Modulo di elasticità perpendicolare medio	E _{90,mean}	830	800	530	770
Modulo di taglio medio	G _{mean}	780	750	500	720
<i>Massa volumica in kg/m³</i>					
Massa volumica caratteristica	ρ _k	485	760	420	515
Massa volumica media	ρ _{mean}	580	825	460	560
(1) Massima altezza e larghezza 100mm.					
(2) Faggio, Robinia, Frassino, Olmo					

Tabella 2.6 Categorie e profili resistenti delle varie classi di resistenza di legno massiccio di latifolia così come individuate nella norma UNI 11035:2010.

L'abete ed il larice S1 vengono contemplati nella UNI 11035:2010 come regole di classificazione ma per essi non vengono dati i profili delle resistenze, pertanto per essi bisogna adottare i profili dell'S2.

2.4.3 Le proprietà meccaniche del legno lamellare incollato

Il legno lamellare incollato è un prodotto industriale ottenuto tramite l'incollaggio di due o più lamelle; le lamelle sono formate da tavole incollate di testa tramite i giunti a dita.

E' possibile ottenere elementi curvi curvando le lamelle prima dell'incollaggio.

Le attuali produzioni di legno lamellare utilizzano conifere, principalmente abete, pino, douglasia e pioppo (che è una latifoglia), tuttavia è in produzione anche il legno lamellare di larice (di durabilità superiore).



Figura 2.2: Archi a tre cerniere di legno lamellare a copertura di una palestra.

Il legno lamellare di pino e di pioppo può essere impregnato in autoclave per aumentarne la durabilità.

Il legno lamellare incollato è realizzato partendo da tavole di legno massiccio classificate; le proprietà meccaniche del legno lamellare incollato dipendono quindi dalle proprietà del legno di cui è composto; l'argomento è regolato dalla norma EN14080:2013².

A titolo di esempio: utilizzando lamelle di legno massiccio di classe C24 si ottiene il legno lamellare omogeneo di classe GL24h; con lamelle di classe C30 si ottiene il legno lamellare GL28h; con lamelle di classe C40 si ottiene il legno lamellare GL32h.

Il legno lamellare incollato può essere del tipo omogeneo "h" cioè la cui sezione è formata da lamelle tutte della stessa classe, oppure del tipo combinato "c" la cui sezione è composta da lamelle di classe migliore ai lembi estremi (nella trave inflessa le tensioni massime si hanno all'intradosso ed all'estradosso) e lamelle di qualità più bassa nella parte centrale. Ad esempio il legno lamellare incollato di classe GL28c può essere composto da lamelle esterne di classe C30 per almeno il 25% dell'altezza della sezione sia superiormente che inferiormente, e lamelle interne di classe C24 per il restante 50% o meno dell'altezza; la resistenza a flessione è la medesima del GL28h essendo determinata dalle lamelle esterne, mentre altre proprietà meccaniche possono risultare inferiori essendo condizionate anche dalle lamelle interne di classe più bassa.

² La norma è entrata in vigore ad agosto 2015 e sostituisce le EN 1194:1999 ed EN 14080:2005. L'attuale norma si basa sulla classificazione delle tavole destinate alla produzione di legno lamellare in classi di resistenza a trazione T-class in alternativa alla classificazione in classi C come per il legno massiccio, unico metodo utilizzato in passato.

Il vantaggio del legno lamellare combinato è un costo leggermente più basso rispetto al legno lamellare omogeneo a parità di resistenza a flessione.

Classe di resistenza		GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
<i>Proprietà di resistenza in N/mm²</i>								
Flessione	$f_{m,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,5						
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	2,5						
Taglio	$f_{v,k}$	3,5						
Taglio per rotolamento	$f_{r,k}$	1,2						
<i>Proprietà di rigidità in N/mm²</i>								
Modulo di elasticità parallelo medio	$E_{0,mean}$	10 400	10 400	11 400	12 000	12 500	13 000	13 500
Modulo di elasticità parallelo caratteristico	$E_{0,k}$	8 600	8 600	9 100	10 000	10 400	10 800	11 200
Modulo di elasticità perpendicolare medio	$E_{90,mean}$	300						
Modulo di elasticità perpendicolare caratteristico	$E_{90,k}$	250						
Modulo di taglio medio	G_{mean}	650						
Modulo di taglio caratteristico	G_k	540						
Modulo di taglio per rotolamento medio	$G_{rol,mean}$	65						
Modulo di taglio per rotolamento caratteristico	$G_{rol,k}$	54						
<i>Massa volumica in kg/m³</i>								
Massa volumica caratteristica	ρ_k	355	355	365	385	390	390	400
Massa volumica media (*)	ρ_{mean}	390	390	400	420	420	430	440

Tabella 2.7 Profili di resistenza per legno lamellare incollato combinato di conifera secondo EN 14080:2013. Le classi in grassetto sono quelle previste anche dalla vecchia norma EN 1194 e comunque attualmente maggiormente commercializzate.

Classe di resistenza		GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
<i>Proprietà di resistenza in N/mm²</i>								
Flessione	$f_{m,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	16	17,5	19,2	20,8	22,3	24	25,6
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,5						
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	2,5						
Taglio	$f_{v,k}$	3,5						
Taglio per rotolamento	$f_{r,k}$	1,2						
<i>Proprietà di rigidità in N/mm²</i>								
Modulo di elasticità parallelo medio	$E_{0,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
Modulo di elasticità parallelo caratteristico	$E_{0,k}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
Modulo di elasticità perpendicolare medio	$E_{90,mean}$	300						
Modulo di elasticità perpendicolare caratteristico	$E_{90,k}$	250						
Modulo di taglio medio	G_{mean}	650						
Modulo di taglio caratteristico	G_k	540						
Modulo di taglio per rotolamento medio	$G_{rol,mean}$	65						
Modulo di taglio per rotolamento caratteristico	$G_{rol,k}$	54						
<i>Massa volumica in kg/m³</i>								
Massa volumica caratteristica	ρ_k	340	370	385	405	425	430	440
Massa volumica media (*)	ρ_{mean}	370	410	420	445	460	480	490

Tabella 2.8 Profili di resistenza per legno lamellare incollato omogeneo di conifera secondo EN 14080:2013. Le classi in grassetto sono quelle previste anche dalla vecchia norma EN 1194 e comunque attualmente maggiormente commercializzate.

Il legno lamellare incollato destinato alle classi di servizio 1 e 2 può essere prodotto con lamelle di spessore da 6 a 45mm, per la classe di servizio 3 lamelle di spessore da 6 a 35mm.

A livello europeo i produttori si sono dati degli standard di produzione che seguono le seguenti regole:

- Lamelle di spessore 40mm, pertanto l'altezza della sezione è un multiplo di 40mm, da 80mm (2 lamelle) a 2000mm (50 lamelle) e anche di più in relazione alle potenzialità dello stabilimento di produzione.
- Lamellare di altezza 100mm prodotto con tre lamelle da 33mm.
- Lamellare di altezza 140mm prodotto con tre lamelle da 40mm ed una da 20mm.
- Base della sezione (larghezza della lamella) multiplo di 20mm con un minimo di 60mm ed un massimo di 260mm; pertanto base = 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260mm; sottolineate le basi di maggior uso più facilmente reperibili sul mercato.

Dimensioni diverse da quelle su elencate sono non immediatamente disponibili sul mercato ma su ordinazione ed ad un prezzo superiore rispetto alle sezioni standard.

Larghezze superiori a 260mm si possono ottenere utilizzando lamelle composte da tavole affiancate, comunque non sono produzioni standard.

2.4.4 Il legno antico e la diagnosi delle strutture

Qualunque intervento su di una struttura, ed in particolare di legno, deve essere preceduto dalla conoscenza.

Conoscenza in termini di proprietà del materiale, stato di degrado, condizioni ed efficienza dei vincoli.

L'indagine è condotta da un Tecnologo del Legno Dottore Forestale, in accordo con quanto disposto dalla normativa UNI 11119:2004 “Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera”.

La metodologia prevede:

- Ispezione visiva: identificazione della specie legnosa, rilievo dimensionale, classificazione secondo la qualità resistente, valutazione dello stato di conservazione.
- Prove strumentali: prove resistografiche, prove soniche/ultrasoniche, misura dell'umidità.

Le indagini anzi descritte permettono la stima della sezione efficace di ciascun elemento strutturale, ovvero la determinazione delle porzioni di legno ancora sano per consentire una corretta verifica statica dell'elemento stesso.

La determinazione della classe di utilizzo (rischio biologico) in accordo alla EN335 e le informazioni circa l'evoluzione del degrado permettono di definire gli eventuali trattamenti preservanti necessari e/o la necessità di variare le condizioni ambientali e migliorare i particolari costruttivi.

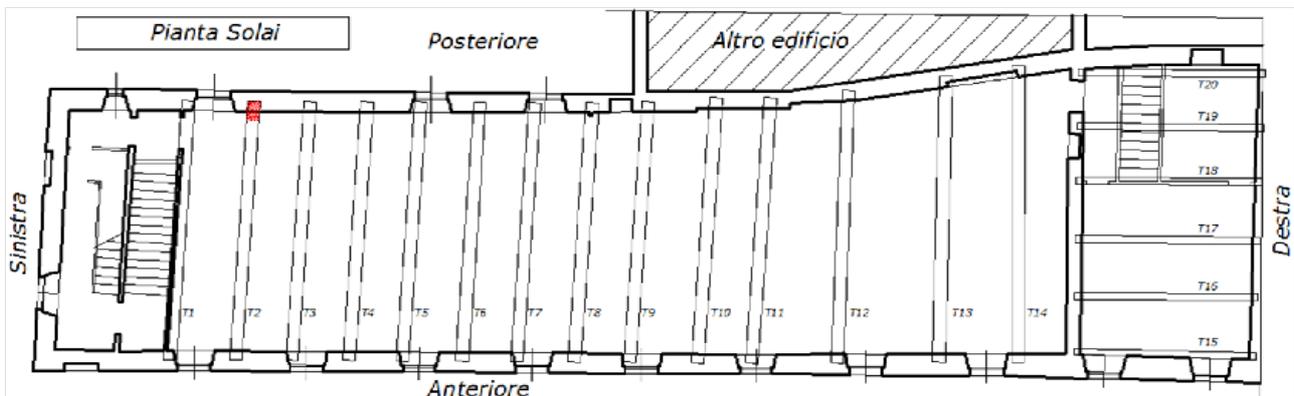


Figura 2.3: Esempio di restituzione grafica dell'indagine diagnostica su di un solaio. La campitura rossa indica grave degrado da carie.

<i>Elem.</i>	<i>Sezione (cm)</i>	<i>Sez. residua (cm)</i>	<i>Descrizione e stato di conservazione</i>	<i>Classe (UNI 11035)</i>
T1	40x34	40x34	Buono stato di conservazione.	S2
T2	44x35	44x35	Degrado da carie all'appoggio posteriore sul 50% della sezione esteso in luce per cm 30.	S2
T3	45x38	43x38	Piccolo distacco in intradosso in luce. Buono stato di conservazione.	S3
T4	41x36	26x36	Fessurazione secante lo spigolo inferiore in luce.	S3
T5	42x35	42x35	Buono stato di conservazione.	S2
T6	41x36	41x36	Buono stato di conservazione.	S1
T7	43x36	43x36	Buono stato di conservazione.	S3
T8	41x34	40x33	Degrado superficiale da insetti sulle facce sx dx e intradosso.	S3

Tabella 2.9: Esempio di restituzione dei risultati dell'indagine diagnostica. In questo caso non è indicata in tabella la specie legnosa in quanto sempre abete. (Estratto da una relazione di diagnosi del Dott. For. Mario Moschi).

Si sottolinea che **il materiale legno non subisce degrado per il semplice trascorrere del tempo**, il degrado del legno avviene solo in certe condizioni così come descritto al § 1.7 “Biodegradamento, durabilità e preservazione” a pagina 8.

3 CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE ESISTENTI

3.1 Introduzione

Queste brevi note vogliono introdurre alcuni concetti che sono alla base della progettazione degli interventi di consolidamento ed adeguamento delle strutture di legno, non sono sicuramente esaustive di tutti i problemi che possono presentarsi e delle possibili soluzioni.

E' bene sottolineare che non necessariamente una struttura di legno ha bisogno di consolidamento, bisogna evitare di ricorrere al consolidamento per sopperire alla scarsa conoscenza dei materiali e dello stato di conservazione; tante strutture antiche sono giunte a noi in ottimo stato di conservazione ed in perfetta efficienza, per esse la fase progettuale inizia con l'indagine diagnostica, passa attraverso la verifica numerica e si conclude con un giudizio sulla sicurezza in relazione alle condizioni di uso.

Il consolidamento ed adeguamento delle strutture richiede uno sforzo in più rispetto alla progettazione ex novo in quanto necessita dell'interpretazione del funzionamento strutturale attuale, l'attenta lettura del degrado e delle cause, lo studio delle possibili soluzioni per eliminare le cause del degrado e ripristinare la funzionalità della struttura e la ricerca di schemi di calcolo appropriati, il tutto limitando al minimo necessario gli interventi per rispettare il valore storico e culturale dell'opera, minimizzare i costi ma senza prescindere dalla durabilità dalla sicurezza e dalla affidabilità dell'intervento.

Il Progettista non deve limitarsi ad utilizzare soluzioni preconfezionate e schematizzate, non deve ridurre la progettazione al semplice soddisfacimento delle verifiche statiche formali, ma deve affrontare la progettazione in maniera critica con l'obiettivo di realizzare interventi sicuri, efficaci ed efficienti nel tempo; in questa ottica è necessario, parallelamente agli interventi di consolidamento, rimuovere le cause che hanno determinato il degrado stesso e prevedere presidi che impediscano il degrado in futuro.

3.2 Principali cause di dissesto

Può presentarsi l'esigenza di intervenire sulle strutture di legno principalmente nei seguenti casi:

- degrado biologico degli appoggi a muro (principalmente carie): tale circostanza è spesso generata da percolazioni di acqua meteorica a causa della cattiva tenuta del manto di copertura, oppure dalla umidità dell'ambiente interno che in corrispondenza del muro esterno condensa bagnando la testata spesso non opportunamente areata ma lasciata a stretto contatto con la muratura;
- rottura in luce di uno o più elementi per cattiva qualità del materiale e/o sottodimensionamento;
- degrado biologico in luce di uno o più elementi (carie o attacco da insetti xilofagi) con eccessiva perdita di sezione resistente;
- nelle strutture composte (ad esempio le capriate) rottura o sconnessione di una o più unioni interne a causa del sottodimensionamento degli stessi e/o di degrado biologico locale e/o difetti localizzati;

In molti casi la rottura o eccessiva inflessione degli elementi lignei o la rottura delle unioni è causata dall'eccessivo carico al quale le strutture risultano sottoposte a seguito di interventi realizzati senza tener conto delle effettive capacità delle strutture esistenti, in passato molte coperture sono state gravate con solette di calcestruzzo il cui peso ha

spesso raddoppiato il carico permanente originario causando altrettanti incrementi tensionali nelle sezioni e nelle unioni; nel caso dei solai è abbastanza frequente la pratica di realizzare nuovi pavimenti, con relativo riempimento, al fine di portare in piano il piano di calpestio imbarcato dall'inflessione delle travi; in questi casi l'eventuale intervento di consolidamento dovrebbe seguire alla riduzione dei carichi permanenti.

Nelle capriate spesso il dissesto è accompagnato dalla diminuzione degli angoli fra puntoni e catena a seguito dello scorrimento dei puntoni rispetto alla catena, evidenziata dall'abbassamento del colmo e dall'allentamento delle saette; è sempre opportuno ripristinare la originaria geometria prima di eseguire gli interventi di consolidamento.

3.3 Generalità sulle tecniche di intervento

3.3.1 Ricostruzioni, sostituzioni e integrazioni

Gli interventi sugli elementi inefficienti generalmente prevedono la sostituzione o l'integrazione di interi elementi strutturali o di loro parti.

Tali interventi possono essere realizzati con legno o con materiali diversi dal legno (acciaio, calcestruzzo, conglomerati epossidici, ecc.) giuntati al materiale preesistente mediante unioni di tipo meccanico o incollaggio.

L'utilizzo del legno per la riparazione e il consolidamento delle strutture lignee costituisce la soluzione più largamente applicata nel passato; non è raro ad esempio incontrare nelle vecchie strutture elementi riparati o parzialmente ricostruiti mediante protesi di legno unite per mezzo di giunzioni a *dardo di Giove*, tecnica questa che richiede sempre una accurata esecuzione delle lavorazioni.

A volte la protesi o l'elemento di rinforzo viene giuntato meccanicamente per mezzo di elementi metallici quali chiodi, bulloni, viti, fasce e piastre metalliche, spinotti di ferro o di legno, ecc.. In alternativa è possibile utilizzare come protesi o rinforzo elementi metallici, di conglomerato epossidico o calcestruzzo, anziché legno, sempre giuntati con unioni meccaniche o incollaggio.

In generale le protesi di legno sono da preferirsi a quelle di altro materiale perché, pur essendo praticamente impossibile trovare una protesi di legno con le stesse proprietà fisiche del resto della trave esistente, a seguito di variazioni termoigrometriche ambientali le deformazioni della protesi di legno sono sicuramente più simili a quelle del resto della trave rispetto ad una protesi di altro materiale che non si deforma. Le protesi di conglomerato epossidico hanno l'ulteriore svantaggio di richiedere volumi di resina molto grandi che hanno costi elevati e sviluppano grosse quantità di calore durante il processo di reticolazione, tale calore può provocare forti gradienti di umidità in prossimità dell'estremità della trave con conseguenti fessurazioni anomale. Le protesi di calcestruzzo possono realizzare ponte termico con le murature esterne e causare condensa all'interfaccia con il legno favorendo il deterioramento del legno stesso per attacco fungino.

Le unioni meccaniche danno garanzia di efficienza e durata nel tempo perché consentono leggeri movimenti delle varie parti e normalmente non sono soggette a fenomeni di degrado.

Le protesi di legno devono essere realizzate con materiale ad umidità prossima a quella di equilibrio in opera per evitare che eccessive deformazioni dovute alla stagionatura ad intervento eseguito ne pregiudichino la funzionalità, per elementi in edifici chiusi è sufficiente che l'umidità media del legno sia inferiore al 18%; inoltre è da tener presente che gli incollaggi epossidici non sono possibili su legno troppo umido.

Per i motivi sopra esposti le protesi devono essere realizzate o con legno massiccio nuovo ma sufficientemente stagionato (di difficile reperibilità), o recuperato da altre strutture antiche, oppure di legno lamellare incollato.

Qualora la protesi venga realizzata di legno lamellare incollato, per raggiungere la larghezza richiesta possono essere accoppiati due elementi sempre con malta epossidica.

Gli interventi sulle unioni possono essere realizzati mediante la messa in opera di ferramenta leggera (chiodi, viti, spinotti, bulloni, ecc.) o apparecchi metallici opportunamente realizzati.

3.3.2 Gli incollaggi strutturali

Da qualche decina di anni, in luogo dei materiali tradizionali si fa uso di materiali di origine sintetica; tra questi le resine epossidiche, grazie ad alcune loro peculiari caratteristiche, costituiscono i collanti più ampiamente utilizzati.

Le resine epossidiche vengono usate pure o caricate con inerte minerale fine (filler) per incollare parti di legno o acciaio, oppure vengono caricate con inerti di granulometria da fine a grossa per la realizzazione di conglomerati adatti a riempimenti e ricostruzioni.

Quando la protesi viene realizzata di legno si utilizzano i prodotti epossidici per la sola giunzione.

La giunzione fra protesi e resto del legno generalmente viene eseguita mediante l'incollaggio di barre di acciaio o vetroresina o altro materiale composito; le barre di acciaio ad aderenza migliorata da c.a. e le barre filettate hanno una sufficiente adesione con le malte epossidiche e non hanno alcuna controindicazione per quest'uso, pertanto non c'è motivo di utilizzare barre di materiale composito sicuramente più costose e non sempre più resistenti.

I prodotti a base di resina epossidica sono in generale molto sensibili al dosaggio, alle condizioni di conservazione, alla temperatura esterna, all'eccessiva umidità del legno, al tempo che intercorre fra la miscelazione e la messa in opera, alla temperatura durante la maturazione ed a vari altri fattori difficilmente controllabili in condizioni di cantiere; per questo si consiglia sempre di far utilizzare questi prodotti a personale esperto sotto la diretta supervisione di un Tecnico.

È bene utilizzare resine caricate in maniera tale da raggiungere la consistenza tixotropica (malte epossidiche) spatolabili in maniera tale che non colino; le resine liquide tendono a colare svuotando le zone di incollaggio, inoltre penetrano nelle fessure del legno e ne possono bloccare i naturali movimenti, tale circostanza genera pericolose autotensioni nel legno.

Piccole ricostruzioni di parti degradate possono essere eseguite mediante l'incollaggio di tavolette di legno con malta epossidica (tecnica del lamellare in opera); tale tecnica può essere applicata su grossi volumi facendo attenzione a non contrastare i naturali movimenti del legno.

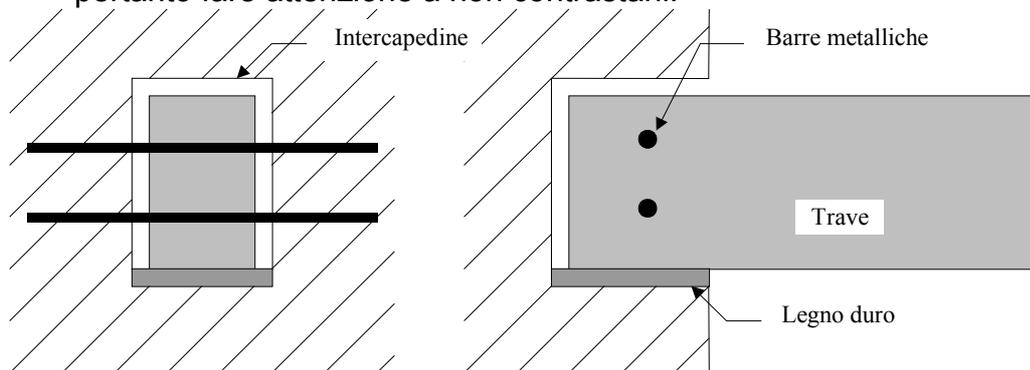
3.3.3 Particolari costruttivi

I particolari costruttivi ben progettati conferiscono durabilità all'opera; bisogna tener presente le seguenti regole di base:

- il degrado biologico del legno da parte dei funghi della carie avviene quando l'umidità del legno supera il 20%; nelle strutture protette dalle intemperie e ben aerate normalmente non si supera tale valore; bisogna quindi provvedere all'aerazione naturale dei locali con struttura lignea, evitare le "trappole di umidità" ad esempio non ricalzando con malta le testate delle travi inserite nei muri, evitare che gli elementi metallici a contatto con il legno finiscano all'esterno e quindi, fungendo da ponte

termico, siano oggetto di condense, evitare l'esposizione diretta alla pioggia specialmente sulle sezioni trasversali, provvedere alla manutenzione dei manti di copertura;

- esistono specie legnose più durabili di altre; è bene pertanto scegliere la specie legnosa più idonea alle condizioni di esercizio;
- il legno, a causa della sua igroscopicità, scambia umidità con l'ambiente; per conseguenza esso subisce dei movimenti che, se impediti, generano pericolose autotensioni; pertanto è necessario lasciare la possibilità agli elementi lignei di "muoversi" piuttosto liberamente, evitare di trasformare le unioni fra i diversi elementi da cerniere ad incastri, utilizzare sistemi di giunzione non troppo rigidi;
- i movimenti del legno dovuti alle variazioni di umidità sono molto maggiori in direzione ortogonale alla fibratura rispetto a quelli in direzione parallela; bisogna pertanto fare attenzione a non contrastarli.



L'intercapedine all'appoggio a muro, eventualmente riempita con pannelli di sughero, consente l'aerazione della testata, le

barre metalliche scongiurano il pericolo di sfilamento della trave dal muro in fase sismica pur non contrastando i naturali movimenti del legno.

3.4 Consolidamento dei solai

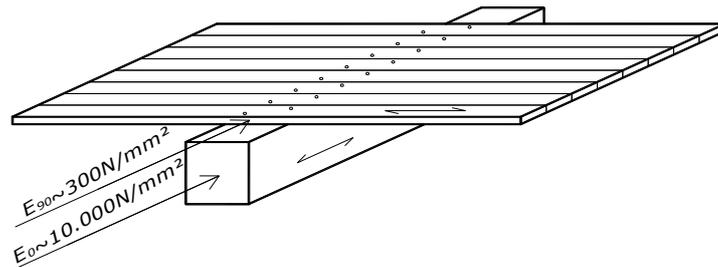
3.4.1 Miglioramento strutturale dei solai

Al fine di aumentare la rigidità nel piano dei solai, può essere sufficiente costruire un doppio tavolato incrociato sull'estradosso delle travi; tale tavolato deve essere efficacemente collegato alle murature d'ambito mediante staffe metalliche a muro. Questo intervento normalmente non aumenta il carico utile del solaio.

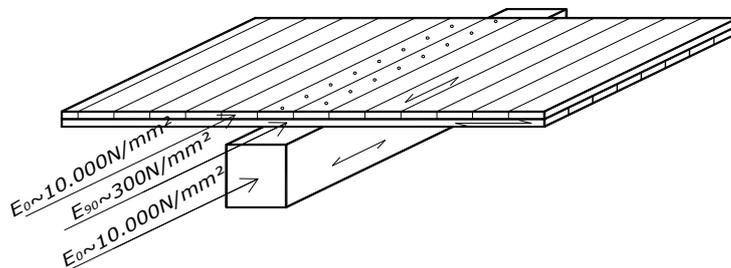
Per aumentare il carico utile è necessario mettere in opera elementi strutturali in grado di collaborare meccanicamente con le travi. Un modo può essere quello di costruire una soletta di calcestruzzo continua sull'estradosso efficacemente collegata alle travi in modo da collaborare meccanicamente con esse; il collegamento può essere fatto mediante viti o connettori metallici di vario tipo; in questo modo si riesce ad aumentare di molto sia la resistenza che la rigidità. Si fa notare che una soletta non collegata alle sottostanti travi costituisce solo un peso senza determinare aumento di carico utile.

L'alternativa alla soletta di calcestruzzo è il compensato strutturale.

Il tavolato semplice è in grado di ripartire i carichi fra le varie travi ma non può costituire soletta collaborante in quanto le tavole, ortogonalmente alla fibratura, mostrano la loro rigidità minima.



Un eventuale strato di tavole disposto parallelamente alle travi può collaborare con esse, tuttavia la collaborazione è limitata alle sole tavole fissate direttamente alle travi e comunque la rigidità delle unioni potrebbe vanificare anche questa minima collaborazione.



Altro modo per rinforzare i solai è integrare le travi con altri elementi di legno e/o di acciaio.

In casi particolari si rende necessario intervenire mediante strutture metalliche quali tiranti metallici di vario tipo e funzionamento.

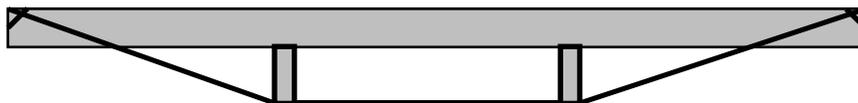
3.4.2 Miglioramento strutturale delle travi in genere

Gli interventi devono essere mirati a migliorare il comportamento senza avere la pretesa di ripristinare la geometria persa durante il corso del tempo.

In molti casi è sufficiente affiancare alla trave altri elementi lignei o metallici.



In altri casi, quando è possibile per ragioni di spazio e di utilizzabilità degli ambienti, un intervento semplice consiste nella messa in opera di tiranti metallici come nello schema seguente:





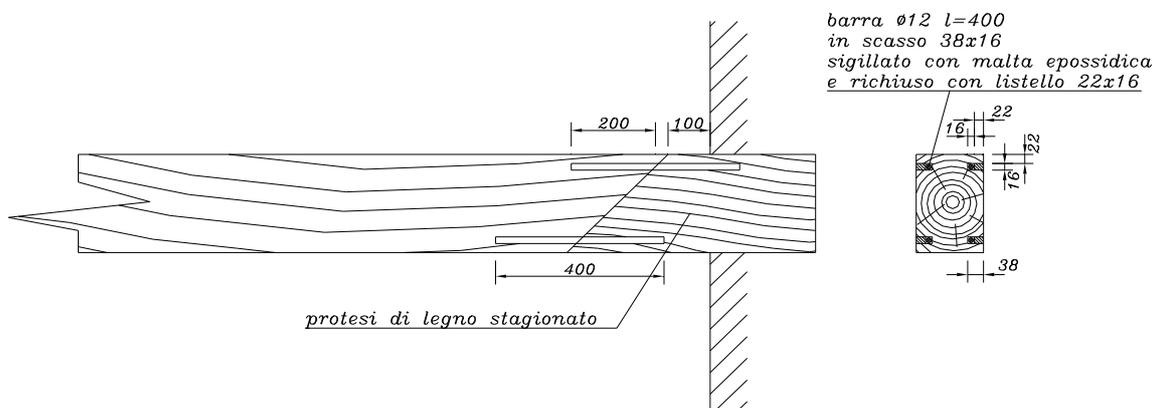
I cavi principali portanti sono quelli disposti al disotto della trave, quelli posti ortogonalmente ad essa sono di stabilizzazione. L'aggancio di testa è realizzato mediante piastre dentate (GeKa).

3.5 Ricostruzione di testate di travi

I problemi di degrado del legno a causa dei funghi della carie sono frequenti quando le testate risultano ricalzate dalla muratura, normalmente interessano la zona nella muratura e le immediate vicinanze, è possibile ricostruire la zona degradata mediante tecniche diverse.

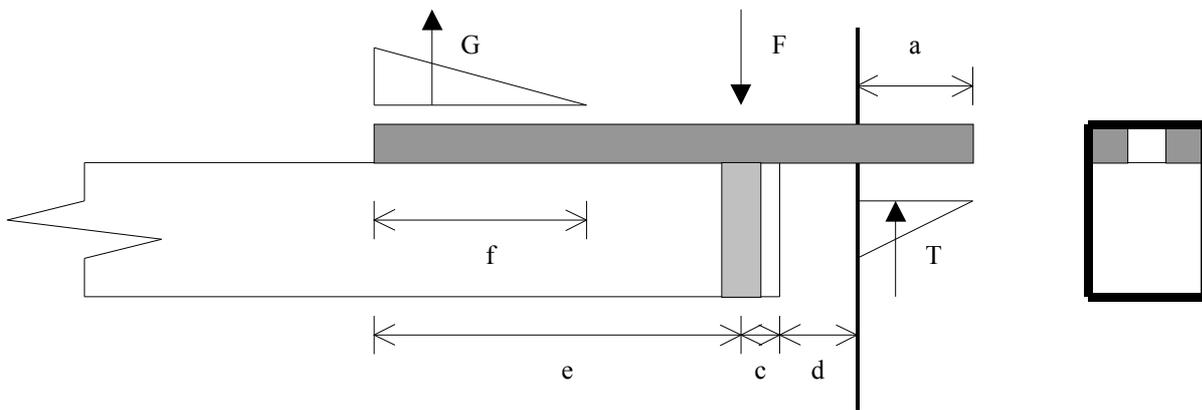
3.5.1 Protesi di legno connessa con barre

La tecnica consiste nel praticare un taglio a 45° per eliminare completamente la parte degradata, mettere in opera una protesi di legno e connetterla con barre di acciaio opportunamente alloggiare in fresature laterali fissate con malta epossidica.



3.5.2 protesi di profilati metallici

É possibile ripristinare l'appoggio compromesso mediante la messa in opera di profilati metallici all'estradosso (come in figura) o all'intradosso, opportunamente fissati alla trave.



Gli sforzi possono essere calcolati, fissando la geometria, impostando le equazioni di equilibrio dei profilati.

Lo sforzo F deve essere trasferito alla trave mediante una fascia metallica abbastanza larga da indurre tensioni sul legno ortogonali alla fibratura adeguate; è necessario che la fascia sia collocata in zona di legno sicuramente sana.

Da notare che nel tratto “ e ” la sollecitazione di taglio nel legno è pari ad F che è sicuramente molto maggiore di T .

La lunghezza f del tratto ove si trasmette la forza G può essere considerata pari ad $e/2$.

3.6 Solai misti legno-calcestruzzo

Per aumentare le proprietà di resistenza e rigidità nei confronti dei carichi verticali è necessario mettere in opera elementi strutturali in grado di collaborare meccanicamente con le travi.

Un modo può essere quello di costruire una soletta di calcestruzzo continua sull'estradosso efficacemente collegata alle travi in modo da collaborare meccanicamente con esse; il collegamento può essere fatto mediante viti o connettori metallici di vario tipo; in questo modo si riesce ad aumentare di molto sia la resistenza che la rigidità.

Si fa notare che una soletta non collegata alle sottostanti travi, pur costituendo piano rigido ai fini sismici, costituisce solo un peso senza determinare aumento di carico utile.

3.6.1 Metodo di calcolo delle strutture miste: la teoria di Möhler

Il calcolo delle strutture miste legno-calcestruzzo si basa sulla teoria delle travi composte di Möhler; tale teoria è stata adottata da molti codici di calcolo e, in particolare, è presente nell'Eurocodice 5.

Il metodo consiste nel considerare la deformabilità dell'unione fra legno e calcestruzzo; tale deformabilità consente lo scorrimento relativo per taglio fra legno e calcestruzzo pur contrastandolo con la rigidità a taglio propria dell'unione.

Nelle strutture di legno le unioni meccaniche sono deformabili; la loro deformabilità ha importanza sia per il calcolo delle deformazioni delle strutture che nel calcolo delle caratteristiche di sollecitazione nei sistemi iperstatici.

Il comportamento delle unioni non è lineare, tuttavia nel calcolo per semplicità ci si riferisce ad un comportamento lineare considerando le rigidità secanti.

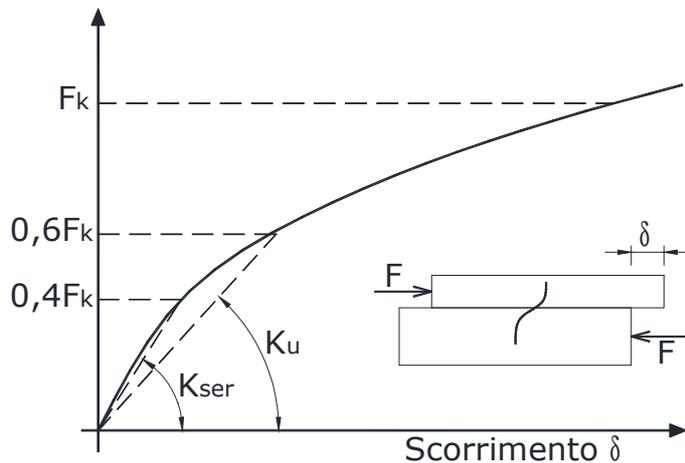
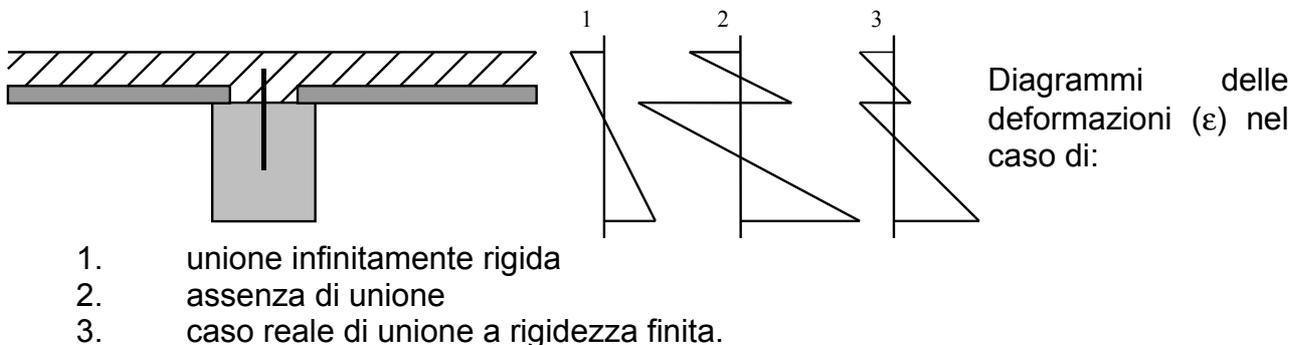


Figura 3.1: Schematizzazione della curva carico-scorrimento di una unione meccanica.

K_{ser} , modulo di scorrimento di servizio, è utilizzato nelle verifiche a stato limite di esercizio;

K_u , modulo di scorrimento ultimo, viene utilizzato nelle verifiche a stato limite ultimo.

Viene abbandonata l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane per la sezione composta; tale ipotesi resta valida per la sola sezione di legno e la sola sezione di calcestruzzo; di conseguenza esiste un asse neutro per il legno ed uno per il calcestruzzo; il legno lavora a tensoflessione mentre il calcestruzzo a pressoflessione.



Ai fini della rigidezza, la sezione di calcestruzzo viene considerata interamente reagente; qualora sia soggetta a tensioni di trazione è necessario disporre un'armatura in grado di assorbire interamente tali sforzi.

La larghezza di soletta collaborante con la trave di legno è definita, in accordo alla UNI EN 1992 "Eurocodice 2 Progettazione delle strutture di calcestruzzo", pari ad un quinto della luce più la larghezza della nervatura; in ogni caso tale dimensione non può superare l'interasse fra le travi.

Le ipotesi di base sono:

- elasticità lineare
- travi semplicemente appoggiate
- carico ripartito uniformemente sulla luce.

Le proprietà meccaniche dell'unione, intesa come insieme legno-connettore-calcestruzzo, devono essere determinate con apposite prove (UNI EN 26891:1991 "Strutture di legno. Assemblaggi realizzati tramite elementi meccanici di collegamento. Principi generali per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità"); è opportuno precisare che la verifica dell'unione è soddisfatta se lo sforzo di taglio sul connettore è inferiore alla resistenza di progetto; pertanto non bisogna fare ulteriori verifiche locali sul legno, sul calcestruzzo o sul connettore.

Non è prudente considerare l'attrito fra soletta e orditure lignee sottostanti in quanto questo può essere annullato dalle vibrazioni e dal ritiro del legno che tende a distaccarsi dalla soletta; l'attrito però influisce positivamente sul comportamento meccanico del solaio

che, se sottoposto a prove di carico, generalmente mostra deformazioni inferiori a quelle teoriche.

È necessario considerare il fenomeno della viscosità sia sul legno che sul calcestruzzo; pertanto bisogna eseguire le verifiche sia “a tempo zero” che “a tempo infinito” perché nel tempo cambia il regime tensionale della sezione. In particolare avviene una migrazione delle tensioni dal calcestruzzo al legno inoltre e aumenta l’inflessione.

Le verifiche “a tempo zero” devono essere svolte considerando tutto il carico agente sulla struttura, i moduli di elasticità propri dei materiali e la rigidezza propria dell’unione; le verifiche “a tempo infinito” devono essere svolte considerando tutto il carico agente sulla struttura ma i moduli di elasticità e la rigidezza dell’unione fittiziamente ridotti per tener conto delle deformazioni lente (viscosità).

Il coefficiente totale di viscosità agisce a dividere i moduli di elasticità e la rigidezza dell’unione, per quest’ultima si utilizza il coefficiente di viscosità del legno (k_{def}).

Bisogna precisare che solo i carichi permanenti producono fenomeni di viscosità, pertanto bisogna pesare i coefficienti di viscosità per tener conto della durata del carico assumendo che una parte dei carichi variabili (la frazione ψ_2 come definita nell’Eurocodice 1) sia sempre presente sulla struttura.

Un esempio di calcolo completo è presente su [2].

È necessario puntellare la struttura prima del getto e lasciarla puntellata per un tempo sufficiente alla maturazione del calcestruzzo, essendo il fenomeno della viscosità legato all’età del calcestruzzo all’atto della messa in carico.

Fra pianellato o tavolato e soletta bisogna inserire un foglio di materiale che inibisca lo scambio di umidità. Questo perché, affinché il calcestruzzo maturi correttamente, l’acqua di impasto non deve essere assorbita dal pianellato o dal tavolato; inoltre, in presenza di tavolato, l’assorbimento dell’acqua di impasto può far dilatare le tavole nel senso della larghezza le quali contrastando di fianco l’un l’altra si sollevano spingendo il getto non ancora maturo.

In alternativa, nel caso di pianellato, è possibile ovviare al problema bagnando abbondantemente il piano prima del getto; nel caso del tavolato trattando quest’ultimo con olio di lino (che inibisce lo scambio di umidità) e utilizzando calcestruzzo opportunamente additivato con ritentori di umidità, oppure interponendo fra il tavolato ed il getto un foglio di materiale impermeabile.



Solaio a doppia orditura con connettori tipo Tecnaria solo sulle travi principali, i connettori ai quarti estremi della luce sono disposti su due file; da notare le barre di ancoraggio a muro.



Solaio a singola orditura con connettori del tipo “Turrini-Piazza” (barre di acciaio da c.a. fissate nel legno con malta epossidica)

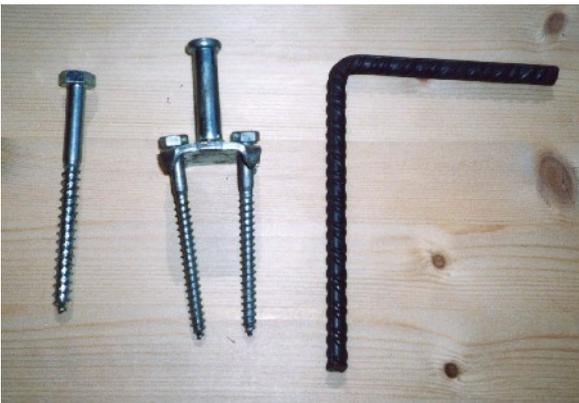
3.6.2 Tipi di connettori

Ogni tipo di connettore è caratterizzato dai propri valori di resistenza e di rigidezza, non esiste un sistema di unione perfettamente rigido che non sia l’incollaggio.

Spesso l’unione è realizzata mediante barre da cemento armato infisse ortogonalmente all’asse della trave per una profondità di almeno 10 diametri, e sigillate con pasta a base epossidica; la barra prosegue fino a superare il piano medio della soletta e poi presenta un tratto orizzontale.

Fermo restando che l’interasse tra i connettori debba essere calcolato, è bene che sia maggiore di 8 diametri e minore di 30 diametri.

Esistono altri sistemi di unione che non necessitano di collanti perché si ancorano al legno meccanicamente per infissione o per mezzo di viti.



Connettori per solai con soletta collaborante, da sinistra: vite mordente, connettore Tecnaria Base, connettore Turrini-Piazza.

3.6.3 L’impiego dei calcestruzzi leggeri

Il calcestruzzo leggero ad uso strutturale è contemplato al punto E della C.M. LL. PP. 15/10/1996 n°252 “*Istruzioni per l’applicazione delle <norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione ed il collaudo delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche> di cui al decreto ministeriale 9 gennaio 1996*”, in tale circolare è stabilito che i calcestruzzi leggeri per essere considerati strutturali devono avere peso specifico compreso fra 14 e 20 kN/m³; questo documento da solo non è sufficiente come supporto tecnico, maggiori indicazioni si trovano nel bollettino CNR184/98 “*Linee guida alla progettazione di strutture di calcestruzzo confezionato con aggregati leggeri*” CNR/DT 102/97; è tuttavia opportuno riferirsi a dati sperimentali.

E’ noto che i calcestruzzi leggeri hanno uno spiccato comportamento viscoso, il coefficiente di viscosità può essere due o tre volte superiore a quello di un calcestruzzo normale, pertanto è importante conoscere non solo la rigidezza e la resistenza del materiale ma anche il coefficiente di viscosità.

4 BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Giordano, A. Ceccotti, L. Uzielli, *Tecnica delle costruzioni in legno*, quinta edizione, Hoepli, Milano.
- [2] A. Ceccotti, M. Follesa, M. Lauriola, *Le strutture di legno in zona sismica - Criteri e regole per la progettazione ed il restauro*, II ediz. ; CLUT, Torino, 2006.
- [3] M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena, *Strutture di legno*, Hopeli, Milano, 2005.
- [4] *Il Manuale del Legno Strutturale*, Coordinatore generale L. Uzielli, Mancosu Editore Roma.
- [5] **AA.VV., *Linee guida per l'edilizia in legno in Toscana – Regione Toscana – Giunta regionale Toscana – Edizioni Regione Toscana, 2009* (distribuzione gratuita su www.regione.toscana.it).**
- [6] **AA.VV., *Linee guida sugli edifici a struttura di legno di supporto alle associazioni sportive – Regione Toscana – Giunta regionale Toscana – CONI comitato regionale Toscana – Edizioni Regione Toscana, 2011* (distribuzione gratuita su www.regione.toscana.it).**
- [7] **M. Follesa, M. P. Lauriola, M. Moschi, *Durabilità e manutenzione delle strutture di legno* - Federlegno Arredo, Milano - 2011 (distribuzione gratuita per gli associati Federlegno su www.federlegno.it, stampa su www.lapidistampa.it).**
- [8] **AA.VV., *Edifici a struttura di legno* - Federlegno Arredo, Milano - 2011 (distribuzione gratuita per gli associati Federlegno su www.federlegno.it, stampa su www.lapidistampa.it).**
- [9] UNI EN 1995-1-1:2014 *Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici*.
- [10] CNR DT 206/2007 *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno*.