E1 – Costruzioni in legno (1)

Il materiale e le sue proprietà

Le seguenti 'slides' costituiscono solo una base per lo sviluppo delle lezioni e, pertanto, non sostituiscono i testi consigliati

Il legno strutturale

Il ***legno strutturale*** presenta un'ottima efficienza se paragonato ad altri materiali da costruzione.

L'efficienza in termini di ***resistenza*** può essere espressa in funzione del rapporto tra la resistenza f e la massa volumica ρ.

L'efficienza in termini di ***deformazione*** e ***stabilità*** può essere espressa in funzione del rapporto tra il modulo di elasticità E e la resistenza f.

Materiale	f/ρ	E/f
Legno massiccio (C24)	~ 63	~ 480
Legno lamellare (GL36)	~ 70	~ 400
Acciaio	~ 55	~ 480
Calcestruzzo armato	~ 10	~ 1200

I valori riportati in tabella mostrano che l'efficienza del legno in termini di resistenza è un po' maggiore di quella dell'acciaio ed è sei volte superiore a quella del calcestruzzo armato. L'uso del legno, pertanto, conduce a strutture leggere, con grandi vantaggi in ambito sismico.

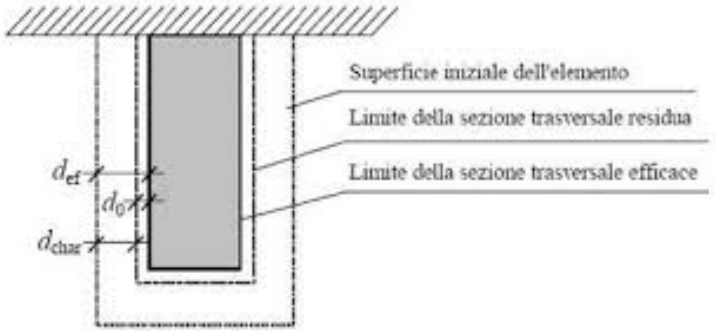
Tuttavia, l'efficienza del legno in termini di deformazione e stabilità è tre volte inferiore a quella del calcestruzzo armato ed è paragonabile a quella dell'acciaio. Come per l'acciaio, quindi, anche le strutture in legno devono essere sempre controllate nei riguardi delle deformazioni e della stabilità dell'equilibrio.

Il legno strutturale 2/2

Al contrario di un pregiudizio comunemente diffuso, le costruzioni in legno hanno un buon comportamento nei confronti del fuoco.

Il legno, infatti, brucia molto lentamente, creando uno strato di carbonizzazione al di sotto del quale il materiale rimane efficiente.

A differenza dell'acciaio, dove il fuoco determina una rapida perdita di resistenza e quindi crolli veloci e totali, il crollo di una struttura in legno avviene per riduzione delle sezioni resistenti in modo lento e controllato.



Il legno lamellare incollato

Le ***travi in legno lamellare incollato*** sono costituite da tavole ricavate da tronchi, giuntate in lunghezza e sovrapposte in altezza in modo da costituire un fascio collaborante di lamelle.

Travi di questo tipo consentono di superare i limiti del materiale di base, riducendo la presenza di difetti e consentendo il superamento di grandi luci.

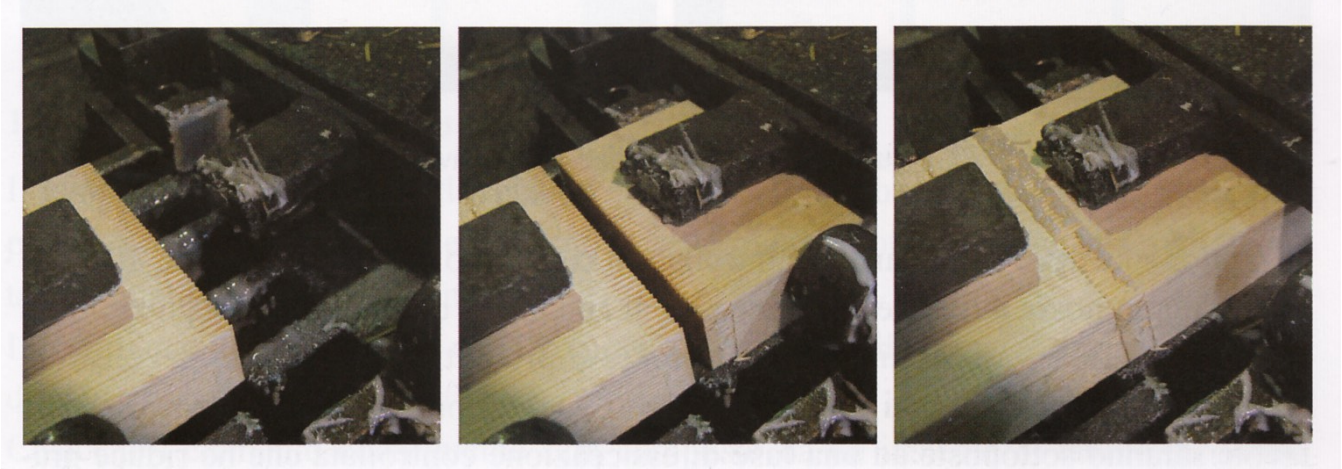
Gli elementi strutturali in legno lamellare, inoltre, possono assumere forme curve e articolate, ampliando così le possibilità della progettazione architettonica e strutturale.

Per evitare problemi di deformazione, bisogna controllare che il contenuto di umidità del legno deve essere compreso tra l'8% e il 10%. Prima di poterle incollare, quindi, le tavole devono essere sottoposte a un processo di essiccazione controllata che ne riduce gradualmente l'umidità.

Anche l'ambiente in cui avviene l'incollaggio deve avere una temperatura e un'umidità relativa costanti e monitorate.

Preparazione delle lamelle e incollaggio

Per ottenere le lamelle della lunghezza desiderata, le tavole sono collegate di testa mediante cosiddetti *giunti a dita* (*finger joints*). Inizialmente, le teste delle tavole sono fresate conferendo loro la caratteristica forma a pettine, poi si applica la colla e infine si procede a incastrarle a pressione.

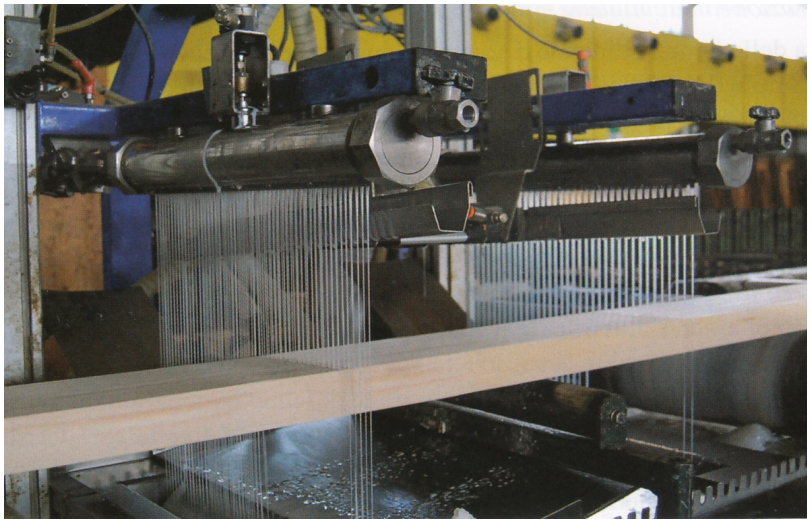


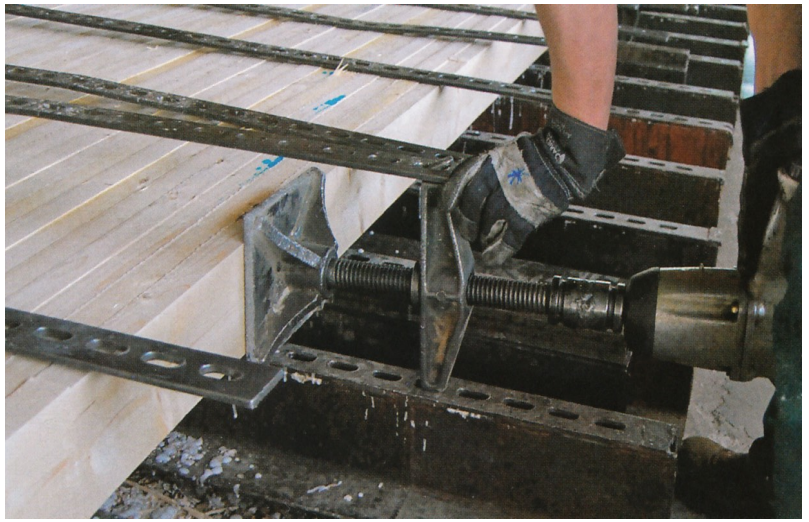
Lamelle di abete giuntate pronte per l'incollaggio

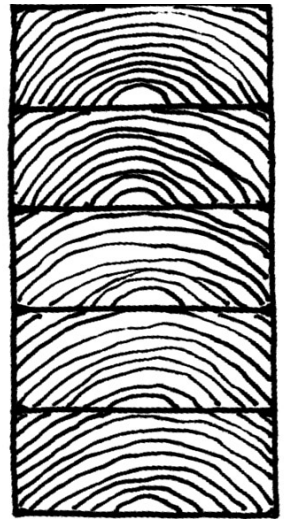
Il legno lamellare incollato

Dopo avere preparato le lamelle si passa alle realizzazione della trave. Lungo ogni lamella viene applicata la resina attraverso un'incollatrice a fili, in maniera da distribuire l'adesivo uniformemente e nella sufficiente quantità.

L'incollaggio finale avviene in appositi *letti di pressaggio*, in cui le lamelle vengono poste una sull'altra, fino al raggiungimento dell'altezza desiderata. L'orientamento delle lamelle deve avere il midollo rivolto verso lo stesso lato.





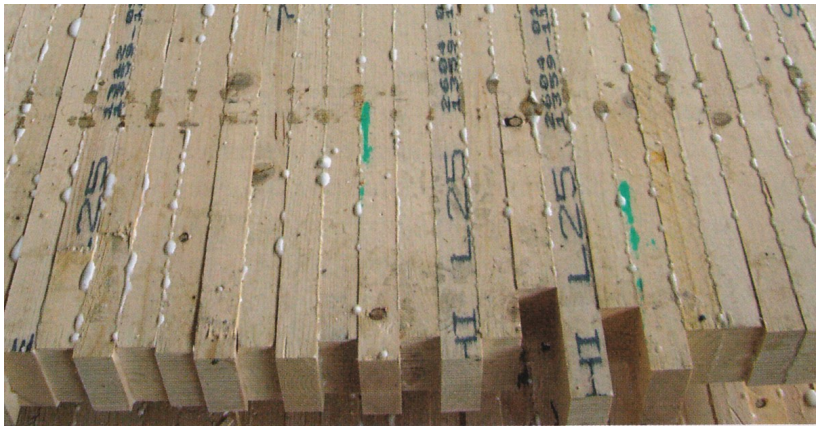


La misura della larghezza delle lamelle varia da 10 a 24 cm, mentre lo spessore da 40 a 33 mm.

Quando tutte le lamelle di una trave appartengono alla stessa classe di resistenza, la trave si dice ***omogenea***, altrimenti si dice ***combinata***. Le sezioni combinate consentono di ottimizzare l'uso delle lamelle, ponendo quelle con migliori caratteristiche meccaniche all'intradosso e all'estradosso, cioè nelle parti della trave maggiormente sollecitate.

Il legno lamellare incollato

Dopo l'indurimento, gli elementi sono grezzi e sporchi. Per la loro finitura devono passare attraverso una macchina piallatrice e poi, eventualmente, possono essere sottoposti a ulteriori lavorazioni, manuali o a macchina. Infine, per garantirne la durabilità, gli elementi sono sottoposti a un processo di impregnazione con speciali vernici protettive.



Pannelli a tavole incrociate – tipo XLAM o CLT

Tra i pannelli a base di legno per uso strutturale, una soluzione costruttiva che si sta diffondendo nel campo dell'edilizia residenziale riguarda il cosiddetto ***compensato di tavole***, più spesso indicato con l'acronimo XLAM (*crosslam*) o CLT (*cross laminated timber*).

Il pannello è costituito da strati incrociati di tavole incollate, aventi ciascuno uno spessore medio di 2 cm, per uno spessore complessivo fino a 30 cm.

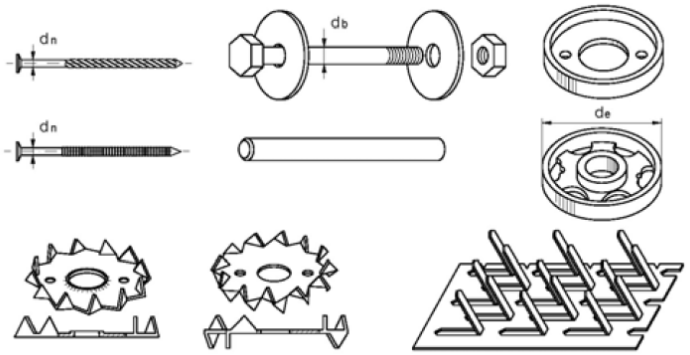
I pannelli sono tagliati in base alle esigenze architettoniche, completi di aperture per porte e finestre, e in seguito posti in opera e collegati tra loro con angolari metallici e viti autoforanti.

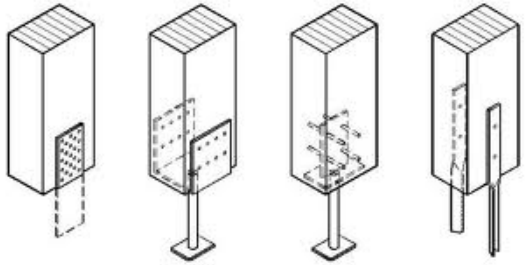
I pannelli possono lavorare sia come piastre, per carichi agenti in direzione ortogonale al loro piano, sia come lastre, per carichi agenti nel loro piano.
Con questa tecnica si possono realizzare elementi piani di grandi dimensioni, con una buona stabilità dimensionale e relativamente privi di difetti.

Collegamenti tra elementi strutturali

I collegamenti tra elementi strutturali in legno rivestono un ruolo molto importante nella definizione del sistema strutturale.

I collegamenti possono essere realizzati per contatto di superfici in legno, o mediante l'ausilio di elementi metallici (unioni meccaniche).



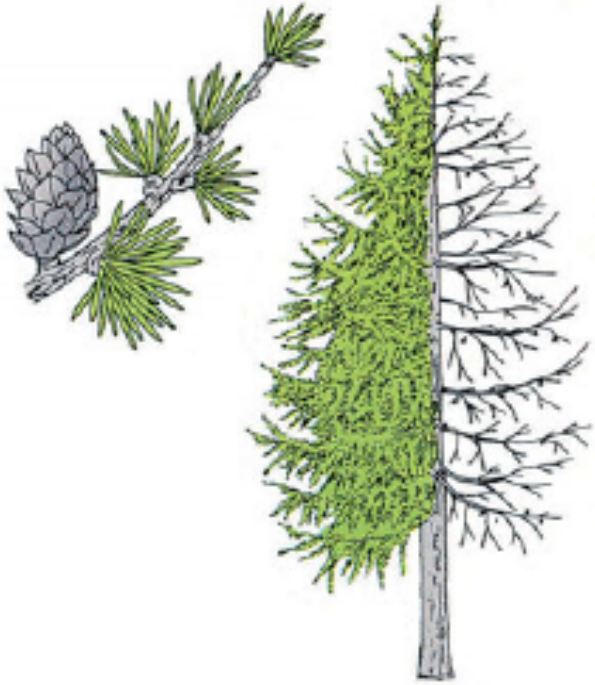


Specie legnose per uso strutturale

Le principali specie legnose per uso strutturale sono suddivise in ***conifere*** e ***latifoglie***.

Le ***conifere*** crescono in montagna, dove le temperature sono più fredde. Il loro nome significa *portatore di coni*, cioè le pigne. Sono chiamate anche aghifoglie perché hanno foglie sottili e appuntite come aghi. Le conifere più diffuse sono l'***abete rosso***, l'***abete bianco***, il ***larice***, il ***pino silvestre***, la ***douglasia***, che formano grandi boschi di una sola specie.

Abete rosso



Larice

Specie legnose per uso strutturale

Lariceto

Conifere

Abete rosso

Abete bianco

Larice

Pino silvestre

Douglasia

Le ***latifoglie*** sono alberi che vivono in pianura, in collina e in bassa montagna, dove il clima è temperato. Il termine *latifoglia* significa a foglia larga. Le latifoglie più diffuse sono il ***faggio***, la ***quercia***, il ***frassino***, la ***robinia***, il ***castagno***, che formano grandi boschi di una sola specie.

Faggio

Frassino

Rovere

I legni ricavati dalle conifere vengono definiti teneri (*softwood* secondo la nomenclatura anglosassone), mentre quelli ricavati dalle latifoglie vengono definiti duri (*hardwood*). Tuttavia, la classificazione in legni teneri e duri è tradizionale e spesso non ha riscontro con la realtà: esistono infatti alcune latifoglie, come balsa e pioppo, i cui legni sono molto più teneri di quelli delle conifere.

Specie legnose per uso strutturale

Latifoglie

Faggio

Quercia (rovere)

Frassino

Robinia

Castagno

Il materiale

Il ***legno*** da costruzione per uso ***strutturale*** si ricava dagli alberi segando longitudinalmente i loro tronchi. Gli elementi così ottenuti si indicano con il termine ***segati***, e possono essere o utilizzati direttamente come elementi strutturali, o sottoposti a successive lavorazioni per la produzione di travi e pannelli lamellari (video 1).

Trave in legno massiccio

Trave in legno lamellare

Pannello X-lam

Il materiale 2/3

Il legno possiede caratteristiche che lo differenziano molto dagli altri materiali da costruzione, come:

- la ***sostenibilità ambientale***, in quanto è un materiale *naturale* e *rinnovabile*, la cui produzione e trasformazione hanno un basso impatto energetico; la messa a dimora di nuove piante negli spazi lasciati liberi dalle operazioni di taglio permette di ricostruire in tempi relativamente brevi il patrimonio forestale;
- la ***biodegradabilità***, perché è facilmente smaltibile;
- la ***compatibilità ecologica***, perché la sua produzione conduce all'assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera; le piante in vita, infatti, assorbono più anidride carbonica di quella immessa nell'ambiente dal ciclo produttivo;
- le ***prestazioni energetiche***, perché presenta un notevole potere coibente;
- le ***prestazioni igroscopiche***, che consentono al materiale di regolare l'umidità negli ambienti, assorbendola o rilasciandola, così da renderli particolarmente confortevoli;
- la ***bassa densità***, che consente di realizzare strutture leggere, particolarmente adatte per le costruzioni in zone sismiche;
- la ***velocità*** e la ***precisione di montaggio***, tipica dei sistemi a secco;
- l'***aspetto "gradevole"***, che consente di evitare costose opere di rifinitura.

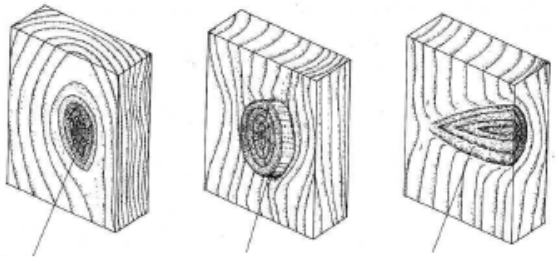
Il materiale

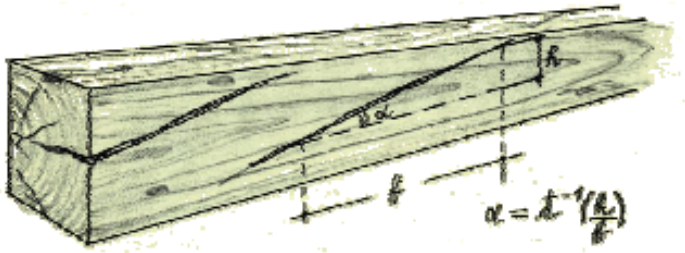
Con riferimento alle ***proprietà meccaniche*** (resistenza e deformazione), il legno è un materiale:

- ***anisotropo***, poiché le sue caratteristiche fisiche e meccaniche cambiano al variare della direzione;
- ***viscoso***, poiché le deformazioni tendono ad aumentare nel tempo;
- ***resistente***, nei confronti delle sollecitazioni di trazione, compressione, flessione e taglio.

Le proprietà meccaniche sono influenzate dalla presenza di ***difetti***, quali nodi e fessurazioni, o da ***degrado*** provocato da microrganismi, quali insetti o funghi.

Le proprietà meccaniche dipendono anche dal contenuto di ***umidità***, che può causare fessurazioni e deformazioni da ritiro.





La struttura del legno

Il legno rappresenta il tessuto del tronco, dei rami e delle radici di un albero.

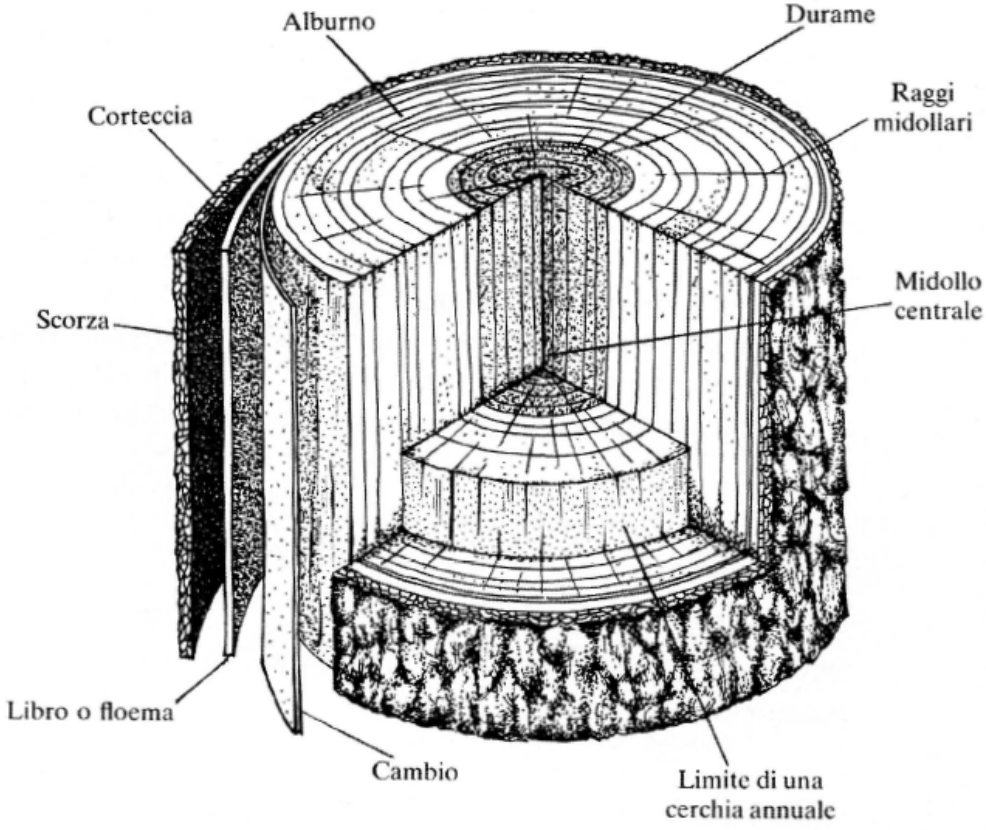
La ***corteccia*** rappresenta la parte più esterna del tronco ed è divisa in esterna, o ***scorza***, e in interna, o ***libro***. Tra il libro e il tronco vi è un sottile strato anulare, detto ***cambio***, visibile solo al microscopio, in cui avviene l'accrescimento del legno.

La sezione trasversale di un tronco presenta, in generale, una serie di ***anelli concentrici***.

Un anello corrisponde alla quantità di legno prodotta dall'albero durante una stagione di crescita.

La suddivisione in anelli è dovuta alla differenza tra le cellule che si formano durante la fase iniziale della stagione di crescita e quelle che si formano durante la fase finale.

Le prime sono più grandi e hanno la parete più sottile; le altre sono più piccole, hanno la parete più spessa e costituiscono un materiale più denso e più resistente.

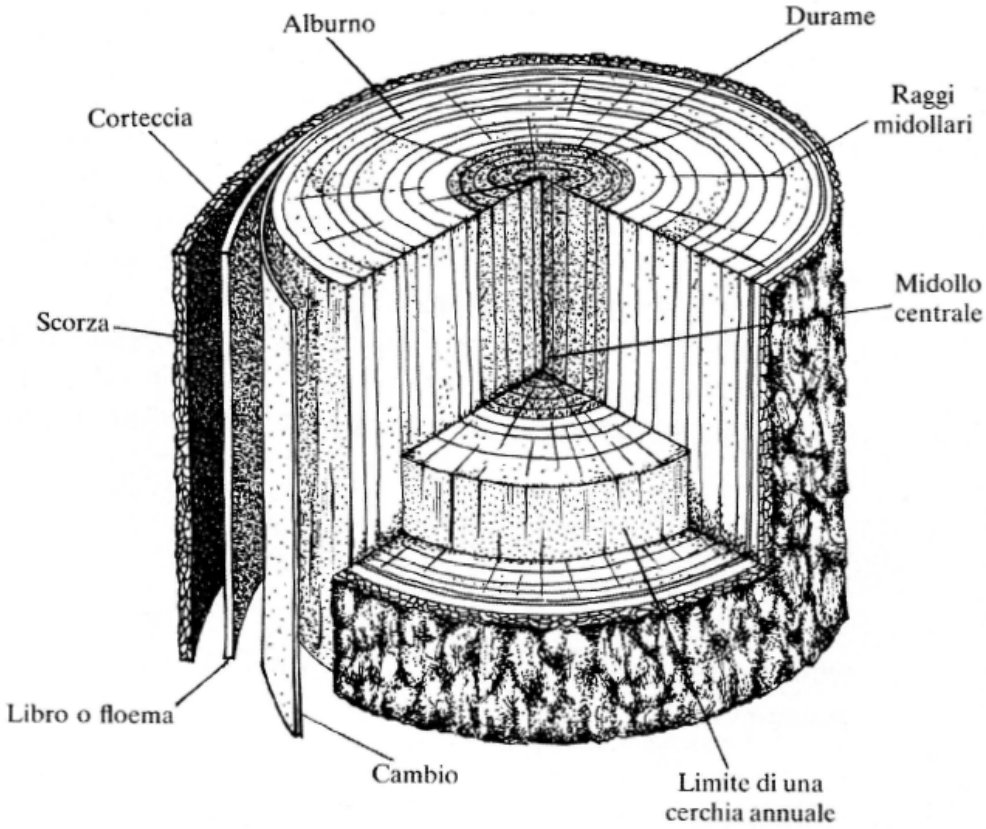


La struttura del legno

La sezione trasversale di un tronco presenta generalmente due diverse colorazioni. La porzione centrale, detta ***durame***, è più scura, mentre quella periferica, detta ***alburno***, è più chiara.

La quantità relativa delle due parti dipende dalla specie dell'albero. Il durame è ovviamente più vecchio dell'alburno ed è costituito da cellule di legno ormai inattive, ma molto resistenti. L'alburno è costituito da una combinazione di cellule attive e inattive, e svolge il ruolo di trasporto dell'acqua all'interno dell'albero e di immagazzinamento delle sostanze nutritive.

La resistenza del durame e dell'alburno è sostanzialmente la stessa. Il durame è meno sensibile alla diminuzione di resistenza nel tempo, l'alburno favorisce maggiormente l'assorbimento di conservanti chimici.



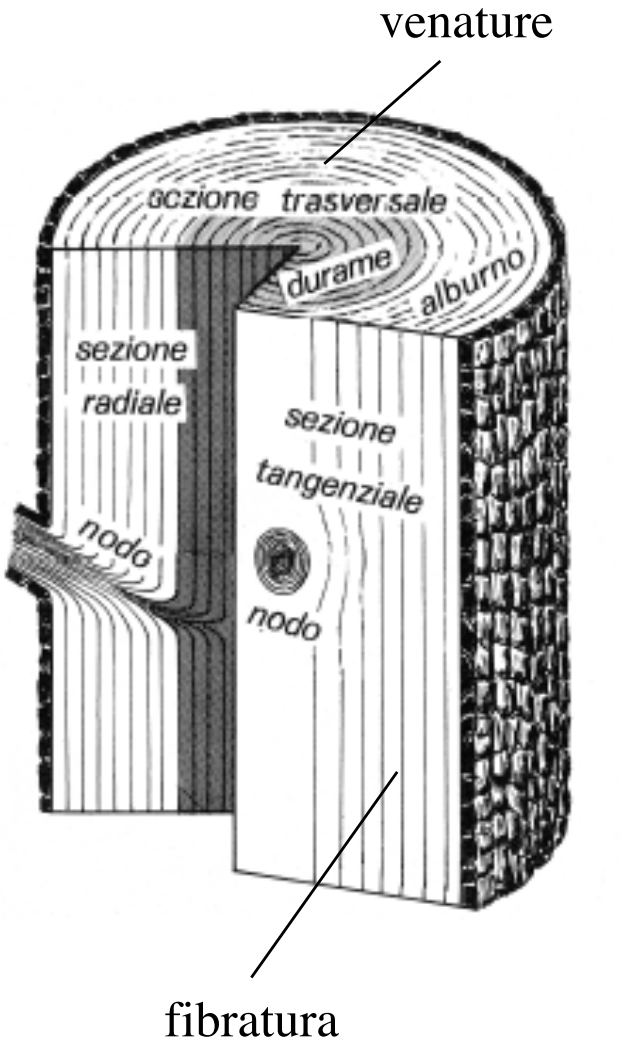
La struttura del legno

Il legno è composto di cellule allungate di forma tubolare, le cui pareti sono costituite da ***cellulosa***. La loro lunghezza è molto maggiore dell'ampiezza e la loro direzione è essenzialmente parallela a quella del tronco dell'albero. Le cellule sono circondate e unite tra di loro da una sostanza che prende il nome di ***lignina***.

La parete cellulare è quindi un corpo misto di cellulosa resistente a ***trazione*** e lignina resistente a ***compressione***.

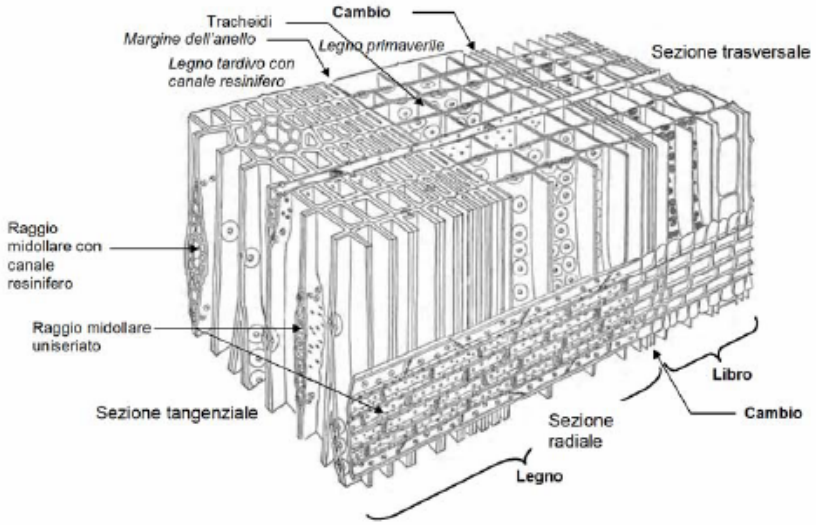
Nella tecnologia del legno, la direzione preferenziale delle cellule che lo costituiscono viene indicata con il termine ***fibratura***.

Si osserva che le proprietà meccaniche del legno variano al variare della direzione e raggiungono i valori massimi secondo la direzione della fibratura.



Umidità del legno

Il legno è un materiale ***poroso***, caratterizzato da una notevole superficie interna. Come tutti i materiali porosi, il legno ha un comportamento ***igroscopico***: assorbe, cioè, vapore acqueo dall'aria circostante e può imbeversi, per capillarità, di acqua o di altri liquidi come, per esempio, soluzioni di sostanze protettive o adesivi.



Il contenuto di umidità del legno influenza le sue ***caratteristiche fisiche***, ***meccaniche*** e ***tecnologiche***, come pure la ***stabilità dimensionale***.

Inoltre, i ***parassiti del legno***, animali e vegetali, hanno bisogno per svilupparsi di un determinato contenuto minimo di umidità. Pertanto, una buona protezione del legno può essere raggiunta mantenendo sufficientemente bassa la sua umidità.

Si definisce ***umidità percentuale*** del legno il rapporto tra la massa dell'acqua contenuta in un campione e la massa dello stesso campione allo stato anidro, cioè

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100$$

in cui m_u e m_0 sono rispettivamente la massa allo stato umido e allo stato anidro del campione.

La massa allo stato umido, m_u, può essere determinata pesando il campione; quella allo stato anidro, m_0, essiccando il campione in una stufa a circolazione d'aria a una temperatura di 103 ± 2 °C, fino a quando due pesate successive risultino praticamente uguali.

Si osserva che l'umidità del legno può anche essere maggiore del 100%. Per esempio, nell'alburno del legno di conifera può anche superare il 150%.

Umidità del legno

Essendo un ***materiale igroscopico***, il legno stabilisce un equilibrio con l'ambiente circostante assorbendo o cedendo vapore acqueo. Il suo contenuto di umidità, quindi, dipende dalle condizioni climatiche esterne.

Si definisce ***umidità di saturazione***, u_s, quella per cui tutte le pareti cellulari sono sature di acqua; dipende dalla specie legnosa, con un valore medio di circa il 28%.

Se $u < u_s$, l'acqua viene assorbita o ceduta solo dalle pareti cellulari. In quest'intervallo l'acqua immagazzinata, che viene indicata con i termini ***acqua legata*** o ***acqua di saturazione***, ha una notevole influenza sulle proprietà fisiche e meccaniche del legno.

Se $u > u_s$, l'acqua si trova anche nei pori e viene indicata come ***acqua libera*** o ***acqua di imbibizione***. Variazioni di umidità in questo intervallo influenzano pochissimo le caratteristiche fisiche e meccaniche del legno.

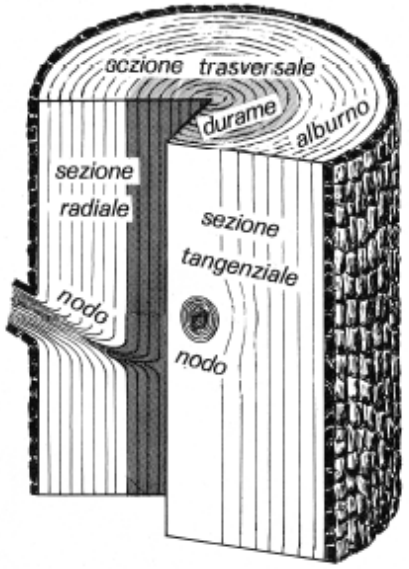
Si definisce ***umidità massima***, $u_{\max}$, quella per cui tutte le pareti cellulari e tutti i pori sono riempiti d'acqua e nel legno non è presente più aria.

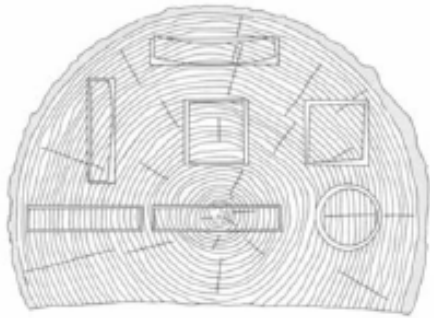
Ritiro e rigonfiamento del legno

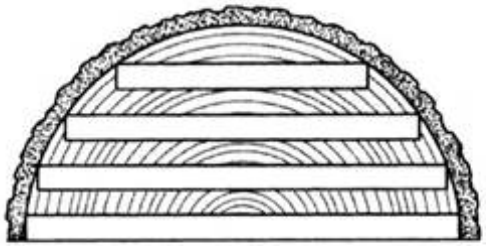
Quando l'umidità è inferiore a quella di saturazione, l'assorbimento o la cessione dell'*acqua legata* determina una ***variazione di volume***, che può anche causare una ***variazione di forma***.

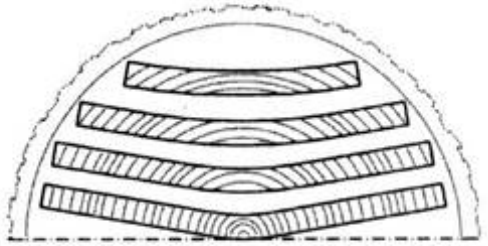
Il volume si riduce al diminuire dell'umidità e aumenta in caso contrario. Questi due fenomeni sono indicati come ***ritiro*** e ***rigonfiamento*** rispettivamente.

A causa della struttura anisotropa del legno, le variazioni dimensionali sono diverse secondo le tre direzioni anatomiche fondamentali, cioè quella longitudinale, quella radiale e quella tangenziale. Tutto questo può condurre anche a variazioni di forma. Infatti, nei segati i cui bordi non sono paralleli a queste direzioni possono presentarsi deformazioni della sezione trasversale, imbarcamento e formazione di fessure.









Densità del legno

In generale, la densità ρ di un materiale è data dal rapporto tra la massa m ed il volume V, cioè

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La densità può essere espressa in kg/m^3.

Per il legno si può definire la ***densità della sostanza legnosa***, data dal rapporto tra la massa del legno anidro m_0 e il volume occupato solo dalla sostanza legnosa V_{sl}, esclusi i pori e i vuoti interni

$$\rho_{sl} = \frac{m_0}{V_{sl}}$$

Questa quantità è una costante del materiale legno, perché assume quasi lo stesso valore per le diverse specie legnose, pari a circa 1500 kg/m^3.

Tuttavia, oltre alla sostanza legnosa, il legno contiene anche acqua e aria. Per questa ragione si devono considerare anche la ***densità apparente*** del legno, detta pure ***massa volumica***, e la ***densità anidra***.

Densità del legno

La ***densità apparente*** o ***massa volumica*** ρ_u dipende dall'umidità u del legno ed è data dal rapporto tra la massa m_u ed il volume apparente V_u del legno, comprensivo del volume dei pori e dell'acqua in essi contenuta, cioè

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

La ***densità anidra*** ρ_0 è data dal rapporto tra la massa m_0 ed il volume V_0 del legno anidro ($u = 0$ %)

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Poiché non è influenzata dal comportamento igroscopico del legno, la densità anidra può essere considerata una costante del materiale per le singole specie legnose.

A parità di contenuto di umidità, la ***densità apparente***, o ***massa volumica***, dipende dalla specie legnosa. Ciò è dovuto alla variazione, tra le diverse specie, del rapporto tra il volume occupato dalle pareti cellulari e quello occupato dai pori.

La densità apparente, tuttavia, può variare anche all'interno di una stessa specie, a causa delle differenze dovute al luogo e alle condizioni di crescita, e anche in funzione della posizione nel tronco.

Nella seguente tabella sono riportati i valori minimi, medi e massimi della densità anidra e della massa volumica per u = 15% delle più importanti specie legnose appartenenti alle conifere ed alle latifoglie.

Densità del legno

	Densità anidra ρ_0 (kg/m^3)			Densità apparente ρ_{15} (kg/m^3)		
	Minimo	*Medio*	*Massimo*	*Minimo*	*Medio*	*Massimo*
Abete rosso	300	430	640	330	470	680
Abete bianco	320	410	710	350	450	750
Pino	300	490	860	330	520	890
Larice	400	550	820	440	590	850
Douglasia	320	470	730	350	510	730
Faggio	490	680	880	540	720	910
Quercia	390	650	930	430	690	960
Frassino	410	650	820	450	690	860
Robinia	540	730	870	580	770	900
Castagno		590			630	

Altre proprietà fisiche

Il legno è un cattivo conduttore di calore a causa dell'elevata percentuale di pori ed è quindi un buon ***isolante termico***. La sua conduttività termica è circa 15 volte più piccola di quella del calcestruzzo armato.

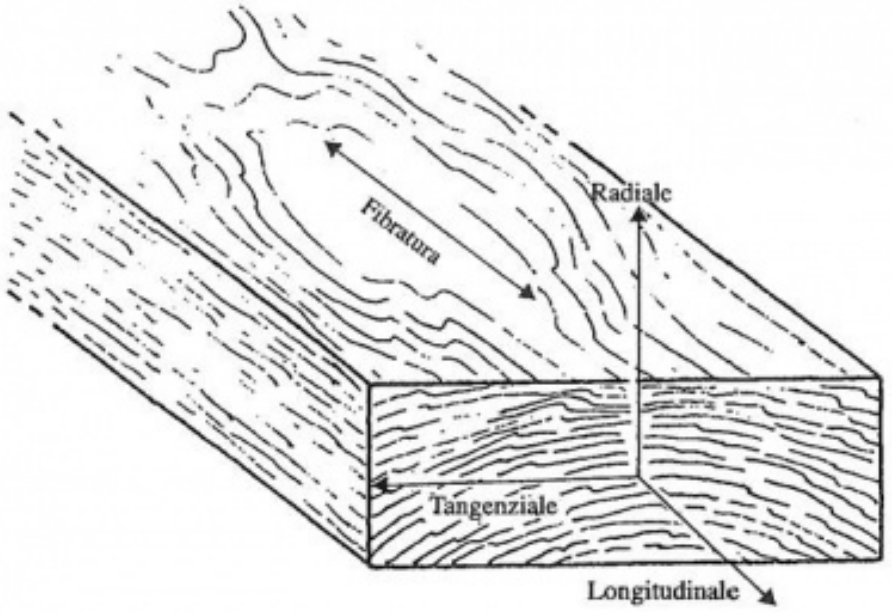
Il legno allo stato anidro è un buon ***isolante elettrico***. Tuttavia, all'aumentare del contenuto di umidità, la resistenza elettrica diminuisce molto rapidamente tendendo, in condizioni di saturazione delle pareti cellulari, al valore di quella dell'acqua. Inoltre, la resistenza elettrica del legno in direzione perpendicolare alla fibratura è doppia di quella in direzione parallela.

Come accade per tutti i materiali, anche il volume del legno dipende dalla temperatura. Tuttavia, le variazioni di dimensioni dovute al cambiamento di umidità sono 10 volte maggiori di quelle dovute alla ***dilatazione termica***. Nelle costruzioni di legno, pertanto, queste ultime hanno un'importanza trascurabile.

Caratteristiche meccaniche del legno

La ***struttura del legno*** influenza in modo determinante le sue ***proprietà meccaniche***. Le cellule, infatti, (i) sono allineate lungo una direzione preferenziale parallela all'asse del tronco, detta fibratura, (ii) hanno la forma di cilindri allungati caratterizzati da buone proprietà meccaniche e (iii) sono tenute assieme nella direzione trasversale da sostanze polimeriche con scadenti proprietà di resistenza e rigidezza. La situazione è ulteriormente complicata dall'alternarsi di strati di cellule con pareti di differente spessore e da difetti anatomici.

Per queste ragioni il legno non è un materiale isotropo, ma può essere considerato ***ortotropo***. Il legno, quindi, possiede proprietà meccaniche diverse lungo tre assi perpendicolari tra loro: l'asse longitudinale (*L*) parallelo alla fibratura, quello radiale (*R*) perpendicolare alla fibratura e agli anelli di accrescimento, quello tangenziale (*T*) perpendicolare alla fibratura e tangente agli anelli di accrescimento



Tuttavia, negli impieghi strutturali, le caratteristiche meccaniche del legno sono definite solo in direzione ***parallela*** e ***perpendicolare*** alla fibratura. Infatti, la distinzione tra direzione radiale e tangenziale è difficilmente realizzabile ai fini del dimensionamento e non porterebbe a significativi vantaggi tecnici ed economici.

Si osserva che la resistenza e la rigidezza raggiungono i loro valori massimi nella direzione della fibratura, mentre sono decisamente inferiori in quella perpendicolare. La ***fibratura***, pertanto, rappresenta la ***direzione preferenziale di sollecitazione***.

Le caratteristiche meccaniche del legno possono essere stimate attraverso l'esecuzione di ***prove sperimentali***. Tuttavia, è utile sottolineare che la resistenza e la rigidezza di uno stesso provino variano in funzione della ***temperatura*** e soprattutto dell'***umidità***. Anche le ***dimensioni*** del provino influenzano notevolmente i risultati.

Per provini di piccole dimensioni, come per esempio un parallelepipedo a base quadrata di lato 20 mm e altezza 40 mm, è alta la probabilità che il legno sia ***privo di difetti anatomici***, come per esempio deviazione della fibratura, presenza di nodi o presenza di sacche di resina. In questo caso il legno si definisce ***netto*** e la resistenza e la rigidezza raggiungono i valori massimi.

Per provini di dimensione strutturale, invece, i risultati sono molto più ***dispersi*** a causa degli inevitabili difetti della costituzione anatomica e del tipo di lavorazione. In questo caso le caratteristiche meccaniche risultano inferiori a quelle del legno netto.

Pertanto, per un materiale altamente ***non omogeneo*** come il legno, i valori di resistenza e di rigidezza forniti dalle prove devono essere intesi come ***valori medi***, largamente indicativi.

Caratteristiche meccaniche del legno 3/3

Le caratteristiche meccaniche del legno sono espresse in termini delle seguenti quantità:

$f_{c,0}$ resistenza a compressione in direzione parallela alla fibratura

$f_{c,90}$ resistenza a compressione in direzione perpendicolare alla fibratura

$f_{t,0}$ resistenza a trazione in direzione parallela alla fibratura

$f_{t,90}$ resistenza a trazione in direzione perpendicolare alla fibratura

f_m resistenza a flessione

f_v resistenza a taglio

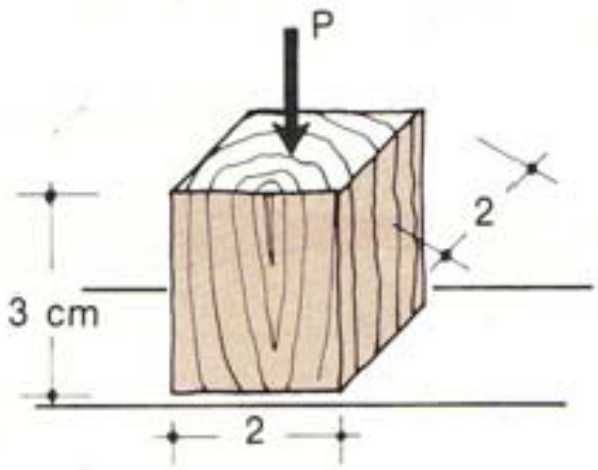
E_0 modulo elastico parallelo alla fibratura

E_{90} modulo elastico perpendicolare alla fibratura

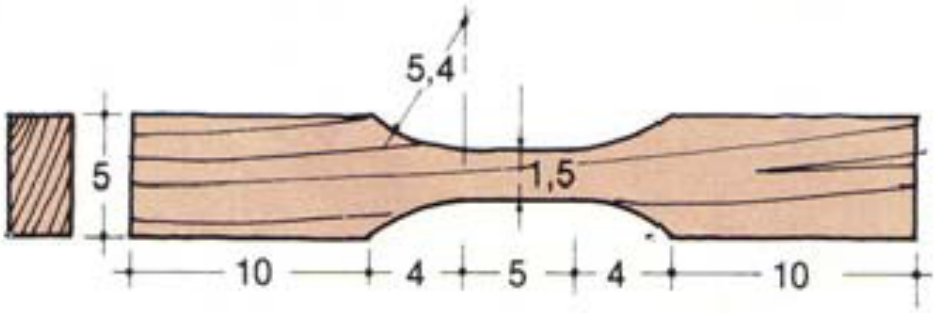
Prova monoassiale di compressione o di trazione

Per una generica specie legnosa, alcune proprietà meccaniche possono essere valutate attraverso una ***prova*** monoassiale di ***compressione*** o di ***trazione*** (video 2, 3), che generalmente si conduce su provini con un contenuto di umidità del 12%.

Nel caso provini costituiti da ***legno netto***, le dimensioni, espresse in centimetri, sono dell'ordine di grandezza di quelle indicate nella seguente figura:



Compressione



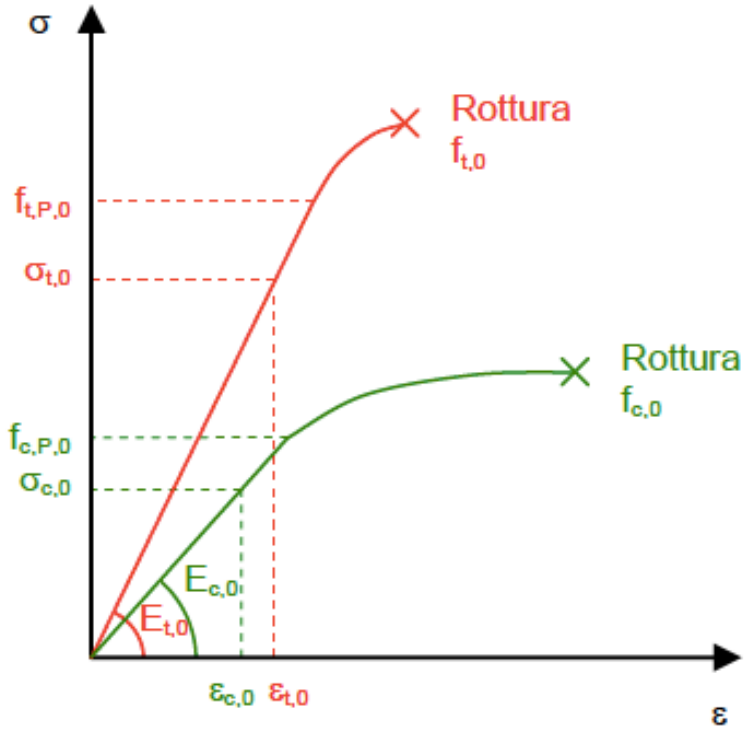
Trazione

Nel caso di provini di ***dimensioni strutturali***, le misure sono maggiori, e i provini inglobano gli inevitabili difetti anatomici del legno.

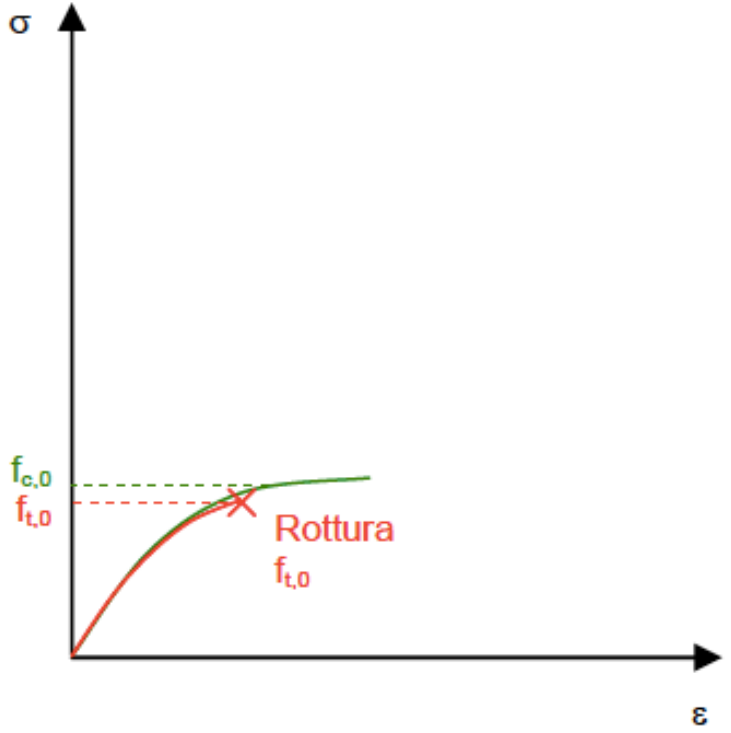
Prova monoassiale di compressione o di trazione 2/6

La prova monoassiale fornisce il cosiddetto ***legame costitutivo*** del materiale, o diagramma ***tensione-deformazione***.

A titolo di esempio, si considerino i seguenti diagrammi relativi, rispettivamente, a un provino di legno netto e a un provino di dimensioni strutturali sollecitati secondo la direzione della fibratura.



Provino di legno netto



Provino di dimensioni strutturali

Provino di legno netto: osservazioni

- Nel campo delle sollecitazioni non elevate, il provino di legno netto manifesta una dipendenza ***lineare*** tra tensioni e deformazioni, sia a trazione che a compressione. Le quantità $f_{t,P,0}$ ed $f_{c,P,0}$ rappresentano le tensioni al limite di proporzionalità a trazione e a compressione rispettivamente.
- In questo campo il legno si comporta anche ***elasticamente***, recuperando le deformazioni al cessare dell'azione del carico. Vale quindi la legge di Hooke

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

in cui σ è la tensione normale, ε la dilatazione assiale ed E il modulo di elasticità che, per le sollecitazioni di trazione e compressione, è dato dalle espressioni

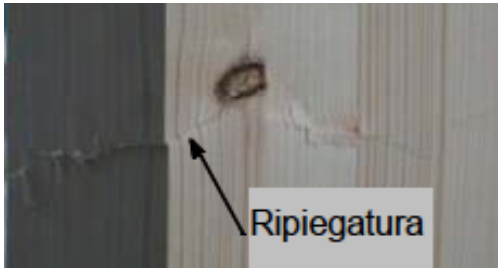
$$E_{t,0} = \frac{\sigma_{t,0}}{\varepsilon_{t,0}} \qquad\qquad E_{c,0} = \frac{\sigma_{c,0}}{\varepsilon_{c,0}}$$

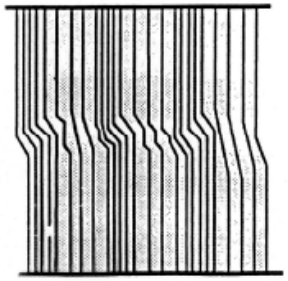
- Oltre il limite di proporzionalità, il comportamento a ***trazione*** è di tipo ***fragile***. Il provino si rompe improvvisamente a seguito di un modesto incremento di deformazione e la tensione di rottura $f_{t,0}$ è quasi coincidente con quella al limite di proporzionalità $f_{t,P,0}$.
- Il comportamento a ***compressione***, invece, è di tipo ***duttile***. La rottura avviene con un notevole incremento di deformazione e la tensione di proporzionalità $f_{c,P,0}$ è pari a circa il 60-80% di quella di rottura $f_{c,0}$.

- La resistenza e la rigidezza a ***trazione*** sono circa il ***doppio*** di quelle a ***compressione***.
- Il motivo del diverso comportamento a trazione e compressione è dovuto alle ***diverse modalità di rottura*** del provino nei due casi:
  - a ***trazione***, tutte le fibre risultano tese e la rottura avviene quando viene raggiunta la loro resistenza, con conseguente separazione del provino in due parti;
  - a ***compressione***, invece, la fibre si instabilizzano prima di raggiungere la loro resistenza massima; una parte del provino scivola sull'altra secondo un piano inclinato rispetto alla direzione longitudinale, sul quale le fibre evidenziano una doppia piegatura dovuta alla loro instabilità; tutto questo riduce la resistenza e la rigidezza rispetto alla sollecitazione di trazione, ma fa aumentare la duttilità.

Provino di dimensioni strutturali: osservazioni

- L'inevitabile presenza di difetti anatomici, quali nodi e deviazione della fibratura, riduce la resistenza e la rigidezza del provino, soprattutto nel caso della trazione.
- La tensione di rottura a ***compressione*** risulta ***simile*** a quella a ***trazione***.
- La rottura a trazione è di tipo fragile, quella a compressione di tipo duttile.





Sollecitazione applicata in direzione perpendicolare alla fibratura

- Le quantità relative a una sollecitazione perpendicolarmente alla fibratura sono indicate con il pedice “90”.
- La tensione di rottura a ***compressione perpendicolare***, $f_{c,90}$ risulta circa 10/15 volte più piccola di quella a ***compressione longitudinale***, $f_{c,0}$.
- La tensione di rottura a ***trazione perpendicolare***, $f_{t,90}$ risulta circa 20/30 volte più piccola di quella a ***trazione longitudinale***, $f_{t,0}$.
- Il modulo elastico medio ***perpendicolare***, $E_{90,mean}$ risulta circa 30 volte più piccolo di quello a ***parallelo***, $E_{0,mean}$.

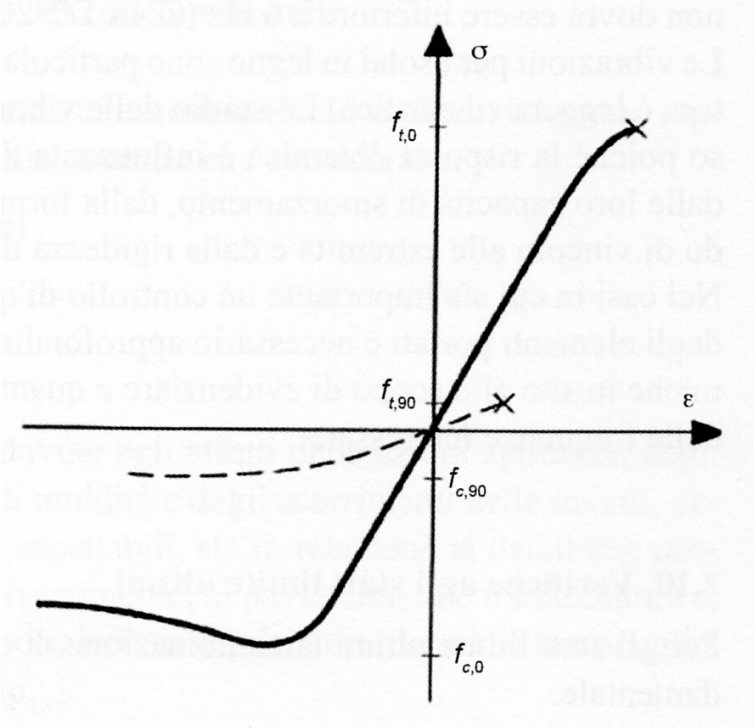
Effetti dell'umidità

Le caratteristiche meccaniche del legno diminuiscono all’aumentare del contenuto di umidità. Rispetto ai valori che si ottengono in condizioni normali, corrispondenti al 12% di umidità, quelli riguardanti il legno saturo possono diminuire anche del 50%.

Sintesi dei risultati

Trazione

Rottura fragile per lacerazione delle fibre

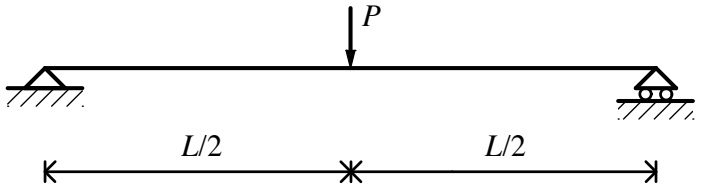


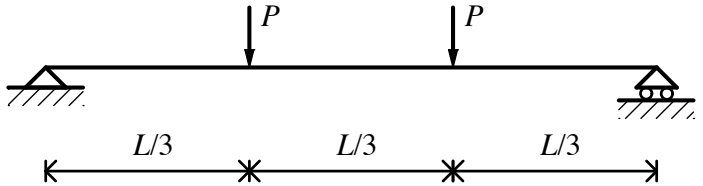
Compressione

Rottura duttile per instabilità delle fibre

Prova a flessione

La prova a flessione consente di valutare la resistenza teorica a flessione f_m e il modulo di elasticità E. La prova viene condotta applicando uno o più carichi verticali su una trave appoggiata agli estremi, generalmente a sezione rettangolare, e aumentando il loro valore fino alla rottura della trave (video 4).

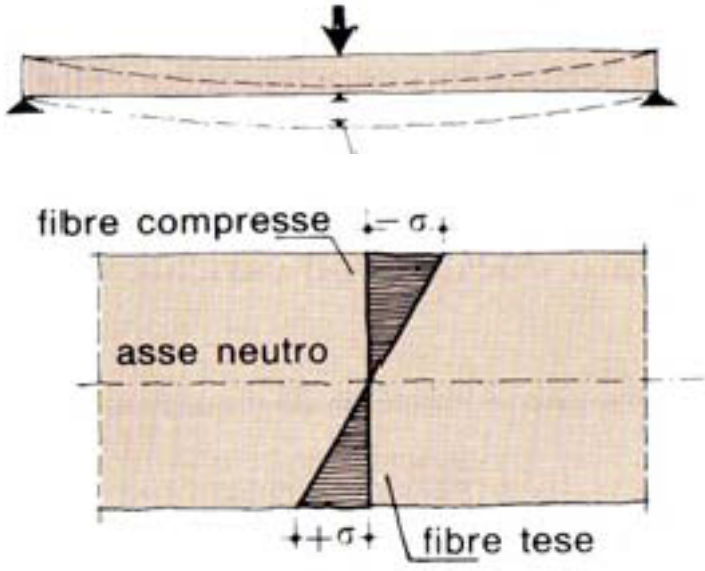




Per effetto dei carichi applicati, la trave si inflette e le fibre longitudinali risulteranno in parte compresse e in parte tese. Estendendo al legno i risultati della teoria tecnica della trave (rigorosamente valida solo per materiali elastici, lineari, omogenei e isotropi), l'andamento delle tensioni risulta lineare e la resistenza a flessione f_m si può calcolare con la formula di Navier

$$f_m = \frac{M_u}{W_{el}} = \frac{6M_u}{bh^2}$$

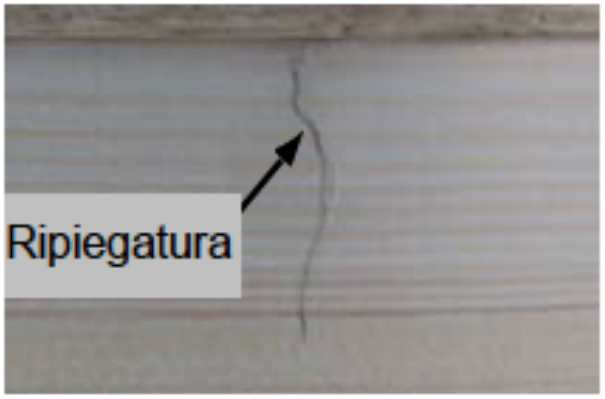
in cui M_u è il momento massimo corrispondente al carico di rottura, mentre b e h sono la base e l'altezza della sezione trasversale.



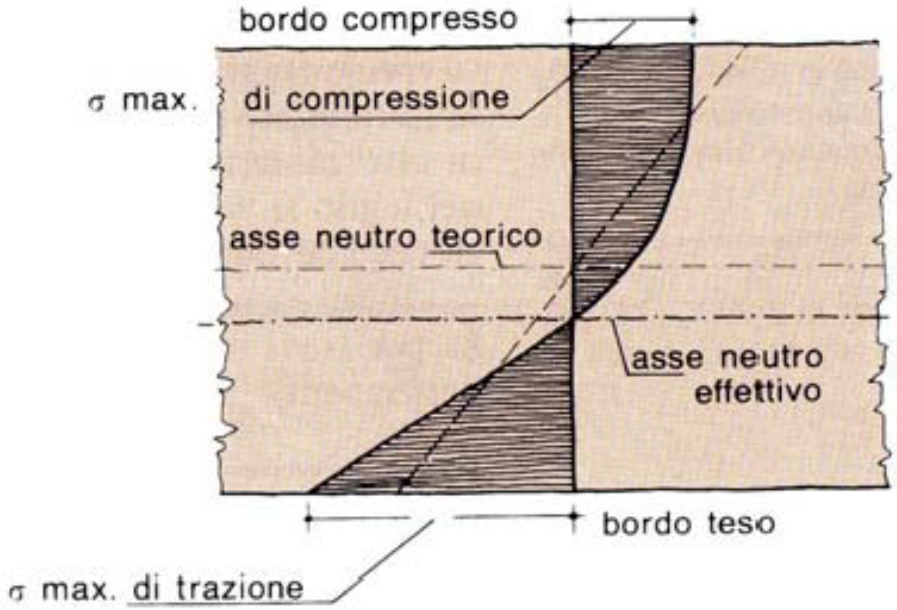
Prova a flessione

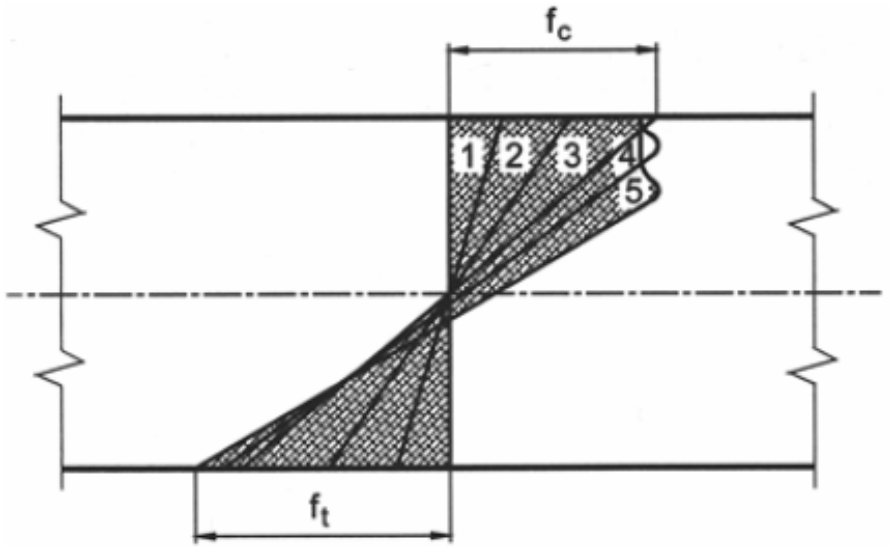
In realtà è il lembo compresso a cedere per primo, a causa dell'instabilità delle fibre, ma la rottura si manifesta in maniera evidente al lembo teso, per la rottura delle fibre. Risulta quindi $|f_c| < f_m < f_t$

Zona tesa



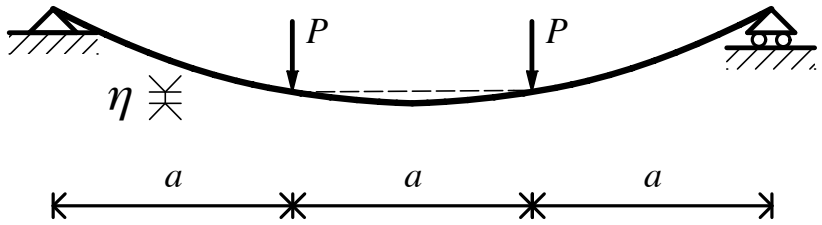
Zona compressa

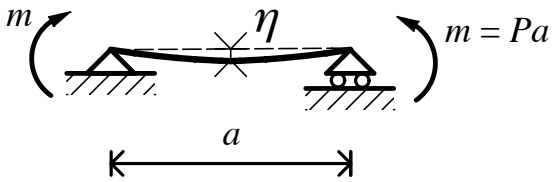




Prova a flessione

Per la valutazione del modulo di elasticità longitudinale E, si considera una trave sollecitata da due carichi verticali simmetrici, come è indicato in figura





Il tratto centrale, dove il momento è costante e il taglio è nullo, può essere considerato come una trave appoggiata sollecitata agli estremi da due coppie $m = Pa$ uguali e opposte. La sua freccia, η, può essere calcolata mediante la relazione

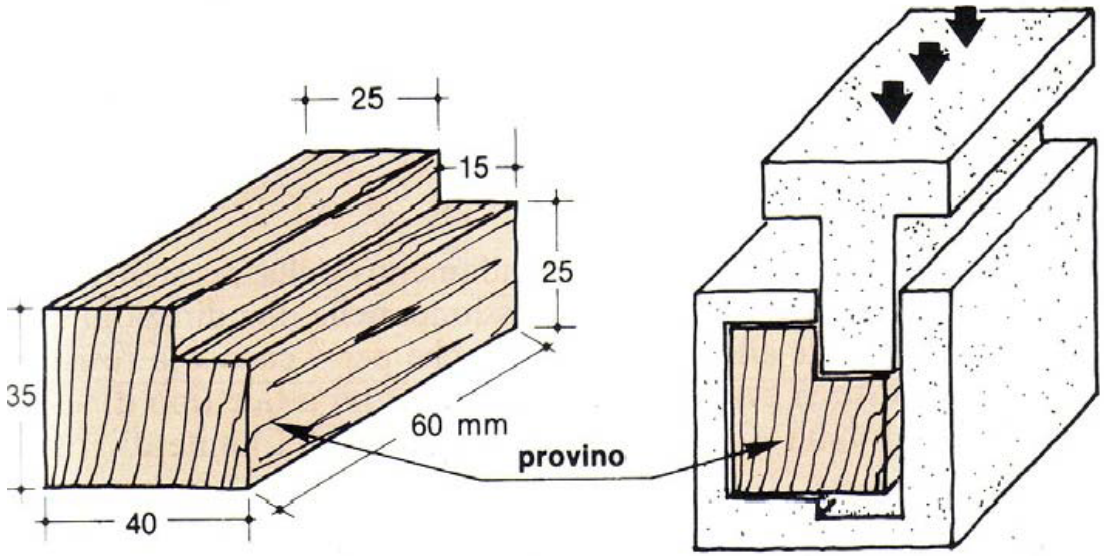
$$\eta = \frac{ma^2}{8EI}$$

in cui I è il momento d'inerzia della sezione trasversale rispetto all'asse neutro. Misurando sperimentalmente tale freccia (video 5), il modulo di elasticità longitudinale si ottiene dalla relazione

$$E = \frac{ma^2}{8\eta I}$$

Prova di resistenza a taglio

La prova si conduce come indicato in figura allo scopo di valutare la resistenza a taglio f_v



Nel caso in cui lo sforzo di taglio è diretto lungo le fibre, i valori medi della resistenza sono molto bassi, di solito compresi tra 4 e 12 MPa. Nel caso di taglio perpendicolare alle fibre, invece, la resistenza assume valori molto più alti, tra 12 e 40 MPa.

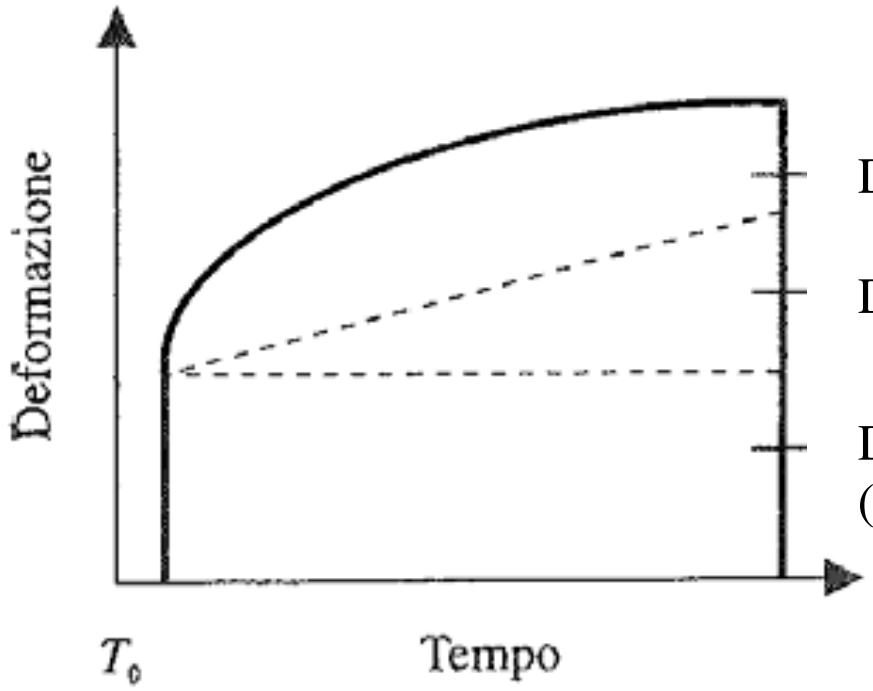
Nelle travi le rotture per taglio avvengono secondo superfici parallele alla fibratura, su cui è minore la resistenza allo sforzo di scorrimento associato al taglio.

Comportamento viscoso

Il legno ha un comportamento viscoso: nelle strutture sotto carico si ha un lento scorrimento delle fibre che determina un progressivo aumento delle deformazioni e degli spostamenti.

I valori della deformazione totale e della velocità di deformazione aumentano all'aumentare della temperatura e del contenuto di umidità.

Al cessare dell'azione dei carichi, solo parte della deformazione complessiva può essere recuperata.



Deformazione non recuperabile (permanente)

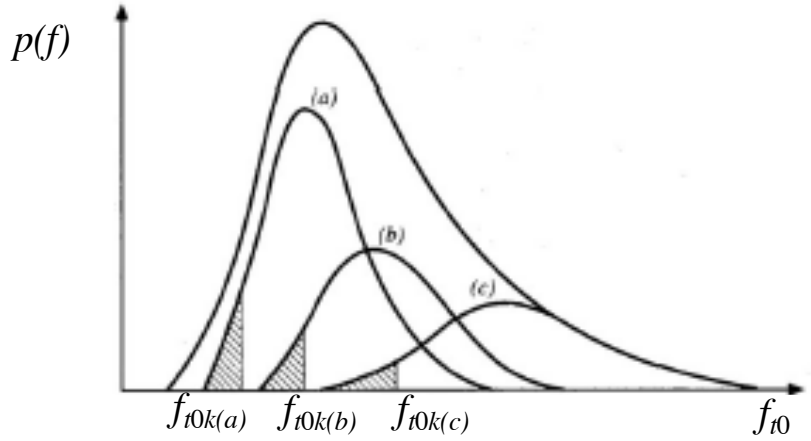
Deformazione recuperabile dopo un certo tempo

Deformazione istantanea
(recuperabile immediatamente)

Classificazione del legno secondo le resistenza

In generale, la resistenza del legno varia notevolmente in funzione della specie legnosa, del luogo di provenienza e della posizione all'interno del tronco.

Pertanto, per un impiego strutturale sicuro ed efficace, è necessario suddividere il materiale in ***classi di resistenza*** distinte, ciascuna caratterizzata da un ***valore caratteristico*** affidabile.



La classificazione secondo la resistenza può essere o ***visiva***, o ***meccanica***.

Classificazione visiva

Per la ***classificazione visiva*** si applicano i seguenti criteri, che riguardano

- il numero e la disposizione dei nodi;
- l'inclinazione delle fibre;
- l'ampiezza degli anelli di accrescimento;
- la posizione nel tronco.

La classificazione visiva si basa sulla correlazione che può essere stabilita tra questi criteri e le proprietà meccaniche del materiale.

Oltre che sulla base dell'esperienza, i valori limite di ogni singolo criterio possono essere definiti mediante prove di carico a rottura di elementi strutturali di legno massiccio in dimensioni reali.

Vantaggi

- prescrizioni e regole di classificazione semplici e immediate;
- affidabilità ed efficienza della classificazione;
- possibilità di classificare anche elementi strutturali già posti in opera.

Svantaggi

- impiego notevole di personale;
- classificazione solo parzialmente riproducibile, a causa del giudizio del personale preposto che può essere anche soggettivo;
- impossibilità di considerare classi di resistenza "elevate" e di utilizzare completamente il potenziale del materiale.

Classificazione meccanica

La ***classificazione meccanica*** si basa sulla valutazione della ***densità*** o del ***modulo di elasticità***, che sono messi in relazione con le proprietà meccaniche del materiale. A tale scopo vengono utilizzati dispositivi meccanici che non danneggiano in alcun modo il materiale.

Vantaggi

- suddivisione, rispetto alla classificazione visiva, in un numero maggiore di classi di resistenza;
- classificazione documentata e ripetibile;
- possibilità di considerare classi di resistenza "elevate" e di utilizzare completamente il potenziale del materiale;
- classificazione veloce ed efficiente: nei sistemi più moderni raggiunge i 300 metri lineari di materiale al minuto.

Svantaggi

- impiego di personale istruito e qualificato secondo criteri ben definiti;
- impossibilità di classificare anche elementi strutturali già posti in opera;
- notevole impegno finanziario per l'acquisto e la messa in esercizio dell'impianto;
- necessità di controlli e verifiche periodiche dell'impianto da parte di enti esterni accreditati.

Determinazione del modulo di elasticità E mediante la misura della velocità di propagazione di ultrasuoni

Inizialmente si determina la massa volumica ρ dell'elemento di legno mediante pesatura elettronica. Successivamente si applica a un'estremità dell'elemento un emettitore di ultrasuoni e all'altra estremità un ricevitore. A questo punto si misura il tempo impiegato da un ultrasuono a bassa frequenza (tra 35 e 50 kHz) ad attraversare l'elemento di legno parallelamente alla fibratura. Indicando con v la velocità di propagazione dell'ultrasuono, il modulo di elasticità E si ricava dalla relazione

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

I principali vantaggi di questo metodo riguardano la semplicità di applicazione e il costo ridotto dell'apparecchiatura. Questo metodo, inoltre, può essere applicato a elementi di qualsiasi dimensione: tavole e legno segato di grandi sezioni, elementi già posti in opera, alberi non ancora abbattuti. A oggi, per il legno segato con sezione di grandi dimensioni è l'unico sistema di classificazione meccanica.

Determinazione statica del modulo di elasticità E

Il modulo di elasticità *E* viene calcolato come già indicato in precedenza nella descrizione della prova a flessione (video 4). La misura viene eseguita in continuità e l'assegnazione dell'elemento a una classe di resistenza avviene sulla base del minore valore di *E* misurato. Questo metodo è adatto per spessori del materiale fino a 80 mm ed è impiegato principalmente per la classificazione di tavole per la produzione di legno lamellare incollato.

Determinazione del modulo di elasticità E mediante tecniche di identificazione strutturale

L'elemento viene posto in vibrazione mediante un impulso meccanico e la sua risposta dinamica viene rilevata attraverso speciali sensori di misura (accelerometri). Sofisticate tecniche di analisi numerica permettono di determinare la frequenza naturale di vibrazione che, considerando anche il peso e le dimensioni geometriche dell'elemento, conduce a una stima del valore del modulo *E*.

Classe e profilo resistente

La classificazione garantisce all'elemento prestazioni meccaniche minime statisticamente definite, senza la necessità di ulteriori prove sperimentali.

All'elemento viene assegnata una ***classe di resistenza***, cui corrisponde un ***profilo resistente***, costituito dai valori di resistenza, modulo elastico e massa volumica.

Le classi e i relativi profili di resistenza, unificati a livello europeo dalla norma UNI EN 338 per il legno massiccio e dalla norma UNI EN 1194 per il legno lamellare incollato, sono riportati nelle tabelle seguenti per legno di conifera e di latifoglia rispettivamente.

Le quantità indicate corrispondono ai frattili inferiori al 5% e rappresentano, quindi, ***valori caratteristici***.

Il ***progettista*** di una costruzione deve indicare la classe di resistenza scelta. Il ***produttore*** e il ***fornitore*** devono garantire le caratteristiche del materiale secondo le disposizioni di cui alla marcatura CE. Il ***direttore dei lavori*** potrà far eseguire ulteriori prove di accettazione.

Le procedure di scelta e controllo del legno strutturale sono regolamentate dalle NTC08.

Classi e profili resistenti per legno massiccio

Classi di resistenza per legno di conifera e di pioppo (secondo UNI EN 338)

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze (MPa)													
Flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	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	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Modulo elastico (GPa)													
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica (kg/m^3)													
Massa volumica caratteristica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Massa volumica media	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Classi e profili resistenti per legno massiccio

Classi di resistenza per legno di latifoglie (secondo UNI EN 338)

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistenze (MPa)							
Flessione	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Taglio	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Modulo elastico (GPa)							
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volumica (kg/m^3)							
Massa volumica caratteristica	ρ_k	530	560	590	650	700	900
Massa volumica media	ρ_m	640	670	700	780	840	1080

Classi e profili resistenti per legno lamellare incollato

Tabella 1.5. Classi di resistenza per legno lamellare di conifera (secondo UNI EN 1194)

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		GL24h	GL24c	GL28h	GL28c	GL32h	GL32c	GL36h	GL36c
Resistenze (MPa)									
Flessione	$f_{m,g,k}$	24		28		32		36	
Trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,g,k}$	16,5	14,0	19,5	16,5	22,5	19,5	26	22,5
Trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,g,k}$	0,40	0,35	0,45	0,40	0,50	0,45	0,60	0,50
Compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,g,k}$	24,0	21,0	26,5	24,0	29,0	26,5	31,0	29,0
Compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,g,k}$	2,7	2,4	3,0	2,7	3,3	3,0	3,6	3,3
Taglio	$f_{v,g,k}$	2,7	2,2	3,2	2,7	3,8	3,2	4,3	3,8
Modulo elastico (GPa)									
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,g,mean}$	11,6	11,6	12,6	12,6	13,7	13,7	14,7	14,7
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,g,05}$	9,4	9,4	10,2	10,2	11,1	11,1	11,9	11,9
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,mean}$	0,39	0,32	0,42	0,39	0,46	0,42	0,49	0,46
Modulo di taglio medio	$G_{g,mean}$	0,72	0,59	0,78	0,72	0,85	0,78	0,91	0,85
Massa volumica (kg/m^3)									
Massa volumica caratteristica	$\rho_{g,k}$	380	350	410	380	430	410	450	430

Durabilità e manutenzione

Il legno è un materiale biodegradabile, che si decompone per effetto dell'intervento di ***funghi*** e ***insetti xilofagi***.

Funghi

La presenza di funghi è rilevabile da variazioni cromatiche e di tessitura, che si manifestano con la presenza di fessurazioni longitudinali e trasversali che formano parallelepipedi friabili e facilmente asportabili.

I funghi sono trasportati dall'aria sotto forma di spore. Una volta raggiunta la superficie del legno si sviluppano solo se l'umidità del materiale è superiore al 20% e la temperatura è compresa tra 0° e 40°, cariando il legno fino al suo disfacimento.

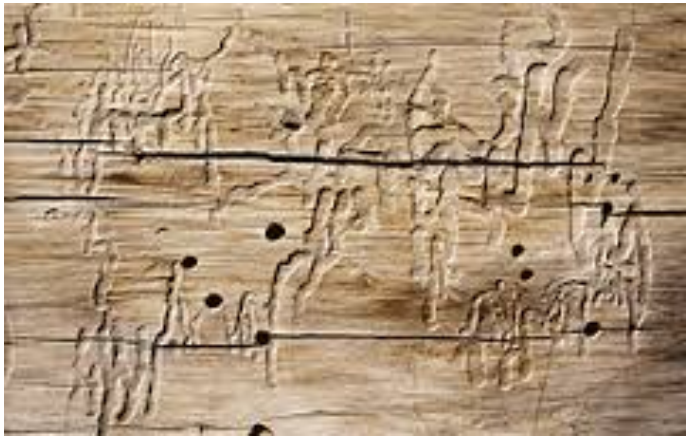
Pertanto, le aggressioni da funghi si manifestano principalmente nelle strutture di legno esposte senza protezione in luoghi molto umidi. Per scongiurare il loro attacco e proteggere il legno in piena sicurezza, è necessario tenere sotto controllo l'umidità del materiale.

Insetti xilofagi

I principali insetti xilofagi sono i ***tarli del legno***, coleotteri alati che raggiungono il legno in cerca di fessure per deporre le uova. Le larve che ne nascono si nutrono delle sostanze contenute nel legno, scavando gallerie al suo interno. Una volta divenuti adulti, escono all'esterno praticando un foro, detto di sfarfallamento.

L'attacco da parte di insetti xilofagi può essere individuato da materiale di rifiuto sulle superfici sottostanti l'elemento, da fori di sfarfallamento e da gallerie superficiali.

Per evitare attacchi di insetti xilofagi, il legno strutturale deve essere sottoposto a trattamenti preventivi con prodotti impregnanti.



Riferimenti bibliografici

1. D.M. 14 gennaio 2008. *Norme tecniche per le costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, 2008, (NTC08).

2. Circolare 2 febbraio 2009 n. 617. *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. 14 gennaio 2008, approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

3. CNR-DT 206/2007. *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno* (rev. 7 ottobre 2008).

4. Zan Bruno, *Calcolo e verifica delle strutture in legno*, Dario Flaccovio Editore, 2015.

5. Curlante Dario, *Progettare strutture in legno lamellare*, Dario Flaccovio Editore, 2014.

6. Breyer D.E., Cobeen K.E., Fridley K.J., Pollock D.G., *Design of wood structures (seventh edition)*, McGraw-Hill, 2015