

## 5. STRUTTURE IN LEGNO

---

Ottobre 2016 – v. 11.0

- Pag. 5.1 -

---

Strutture in legno

Parte dei testi e delle figure riportati nel seguito sono tratti dalla dispensa “*Strutture in Legno*” del prof. N. Gattesco, redatta in occasione del “Corso di aggiornamento sulle tecniche di calcolo presentate nella normativa tecnica sismica allegata all’Ordinanza OPCM 3274/2003”.

### 5.1. Normative di riferimento

- **D.M. 14/01/2008** “*Norme tecniche per le costruzioni*”
- **Circolare 2 febbraio 2009** - *Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008*
- **CNR-DT 206/2007** – “*Istruzioni per il Progetto, l’Esecuzione e il Controllo delle Strutture in Legno*”
- **UNI EN 1995-1-1 (EC5)** – “*Progettazione delle strutture di legno. Parte 1.1: Regole generali e regole per gli edifici*”, 2009
- **DIN 1052**– *edizione 2004-08 “Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.*

Norme di prodotto:

UNI EN 336: "Legno strutturale - Conifere e Pioppo - Dimensioni - Scostamenti ammissibili"

UNI EN 338: "Legno strutturale - Classi di resistenza"

UNI EN 384: "Legno strutturale - Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica"

UNI EN 408: "Legno strutturale e legno lamellare incollato - Determinazione di alcune proprietà fisico meccaniche"

UNI EN 518: "Legno strutturale - Classificazione - Requisiti per le norme di classificazione a vista secondo la resistenza"

UNI EN 519: "Legno strutturale - Classificazione - Requisiti per il legno classificato a macchina secondo la resistenza e per le macchine classificatrici"

UNI EN 1912: "Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie e specie legnose" legno lamellare incollato:

UNI EN 391: "Legno lamellare incollato - Prova di delaminazione delle superfici di incollaggio"

UNI EN 392: "Legno lamellare incollato - Prova di resistenza a taglio delle superfici di incollaggio"

UNI EN 386: "Legno lamellare incollato - Requisiti prestazionali e requisiti minimi di produzione"

UNI EN 408: "Legno strutturale e legno lamellare incollato - Determinazione di alcune proprietà fisico meccaniche"

UNI EN 14080:2013: "Strutture di legno - legno lamellare incollato e legno massiccio incollato".

**5.2. Il legno nelle costruzioni**

La scoperta del legno quale materiale da costruzione è antica come l'uomo, più antica della pietra e del mattone; il legno è stato il primo materiale da costruzione:

facilmente approvvigionabile

leggero

lavorabile

Attualmente è molto usato nei paesi ricchi di questa materia prima, quali il Canada, Stati Uniti, Gran Bretagna, paesi nordici, sia per le strutture verticali che orizzontali.

In Italia (ma non all'estero), con l'avvento del cemento armato nei primi decenni del '900 e in particolare nell'ultimo dopoguerra, ci si è un po' dimenticati del legno, sostituendolo con materiali che sono stati considerati sicuramente più resistenti e duraturi. In realtà è proprio in Italia che numerose opere dimostrano, quando la progettazione e la realizzazione è stata ben eseguita, come il legno ha resistito secoli senza alcun inconveniente.

In Italia si è avuto in questi ultimi anni un importante ritorno all'uso di questo materiale, soprattutto nel recupero di vecchi edifici e nelle nuove costruzioni (ad es. coperture di impianti sportivi), ma sempre e solo per strutture orizzontali e telai

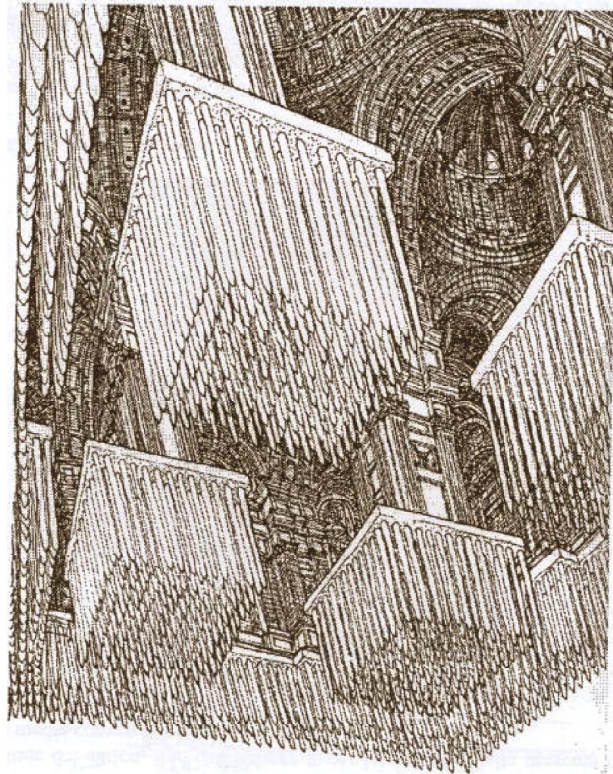
Nel seguito si riportano alcuni esempi di applicazione del legno nelle costruzioni del passato e del presente, suddivisi per semplici funzioni strutturali partendo dalle fondazioni fino in copertura.

### 5.2.1. Applicazione del legno nelle costruzioni del passato

#### FONDAZIONI

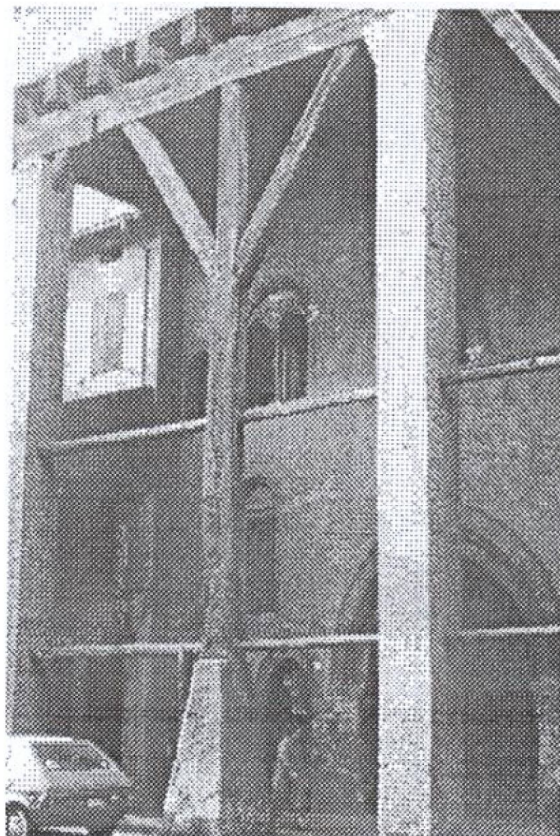
I pali in legno sono stati usati nel passato per la realizzazione di fondazioni profonde (di lunghezza limitata 5-6 m) a sostegno di grandi edifici e/o cattedrali.

Ad esempio, il ponte Santa Trinità di Firenze (1570 circa) e gran parte dei palazzi veneziani.



#### PILASTRI

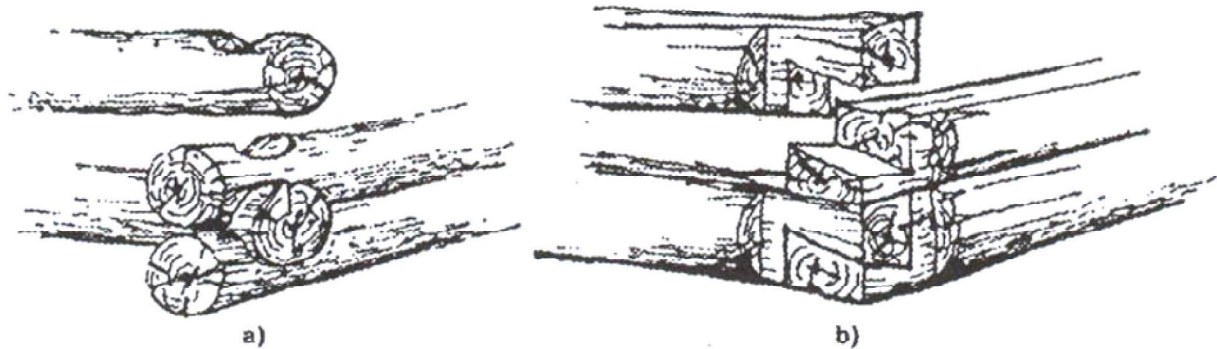
Un classico esempio sono i pilastri in rovere di “Palazzo Isolani” (XIII secolo) a Bologna



## PARETI

Edifici realizzati con tronchi di legno massiccio disposti orizzontalmente e riconducibile come comportamento strutturale agli edifici in muratura portante. La stabilità strutturale di tale tecnica costruttiva dipende dall'abilità e precisione con cui sono realizzati i giunti fra gli elementi (intagli o connessioni in carpenteria).

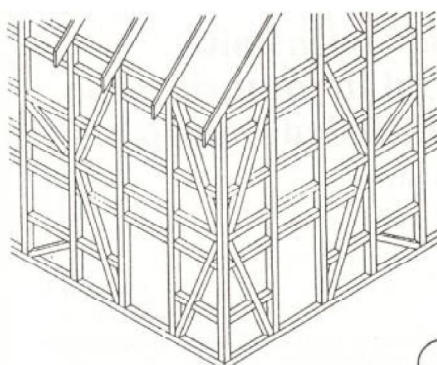
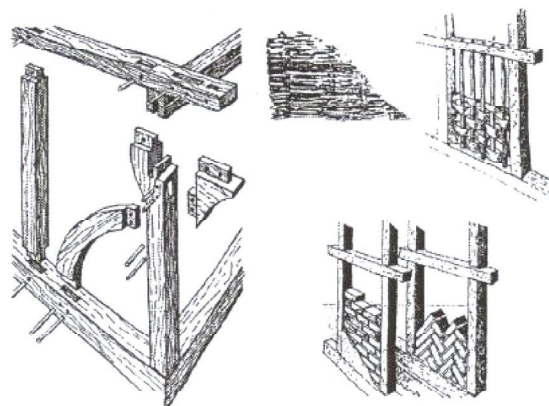
In Svizzera (nel Vallese) si possono osservare esempi di costruzioni interamente in legno di 4 secoli fa, anche di notevoli dimensioni (5 – 6 piani)



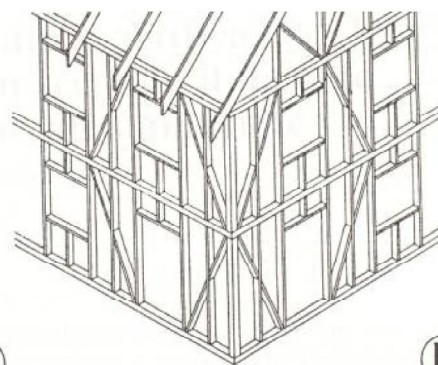
## SISTEMI INTELAIATI

Rappresentano un valida alternativa alle pareti in legno massiccio, con notevole risparmio di materiale legnoso.

Stabilità della struttura è garantita da appositi elementi di controvento o più semplicemente dal materiale di riempimento, inserito fra l'ossatura strutturale.



I

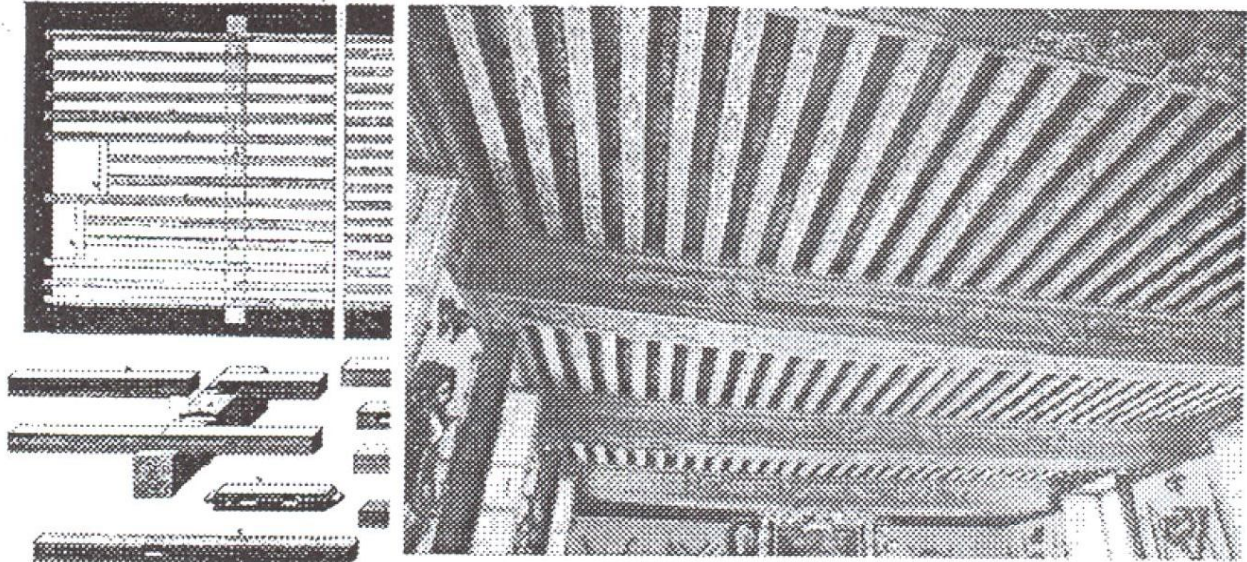


II

## SOLAI PIANI

Fino all'avvento delle travi in acciaio, le travi in legno rappresentavano un buon sistema costruttivo per la realizzazione di impalcati piani, anche di notevole luce.

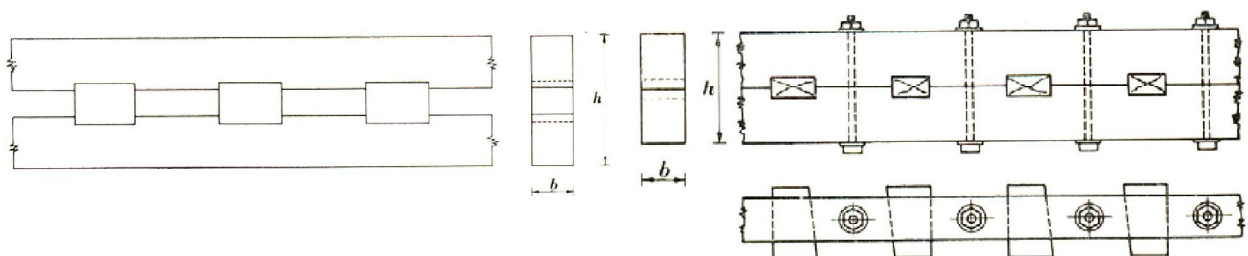
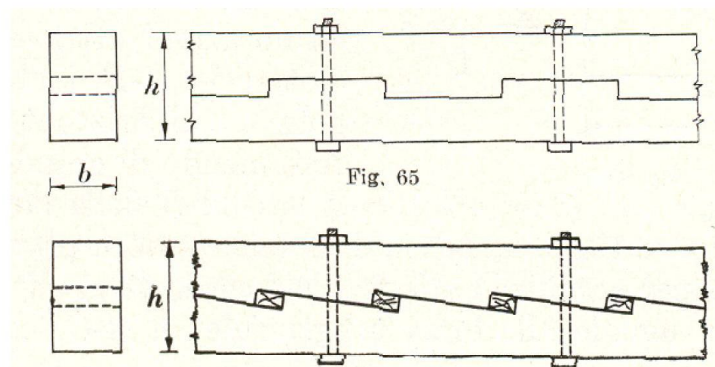
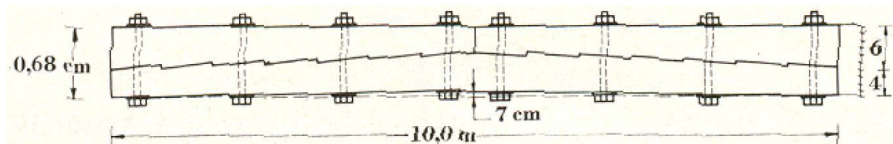
La maggior parte dei solai erano suddivisibili in due tipologie: solai a travi accostate semplicemente appoggiate su murature portanti, solai a travi principali e travi secondarie.



## Strutture in legno

### TRAVI COMPOSTE

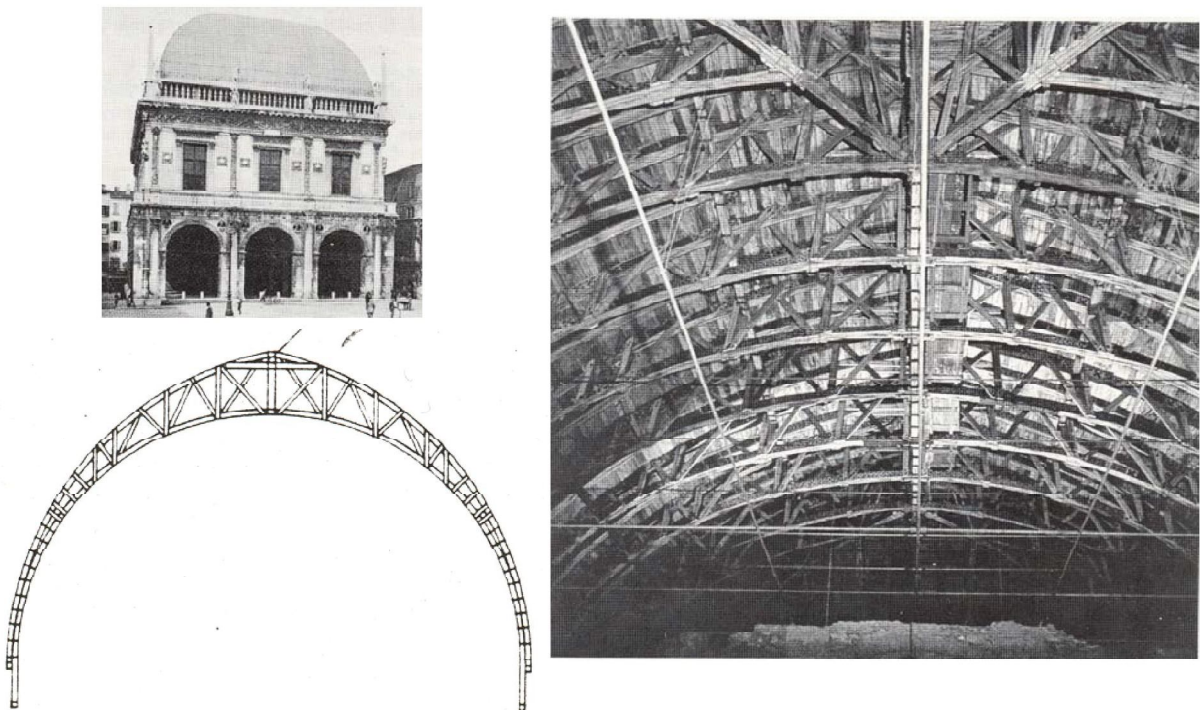
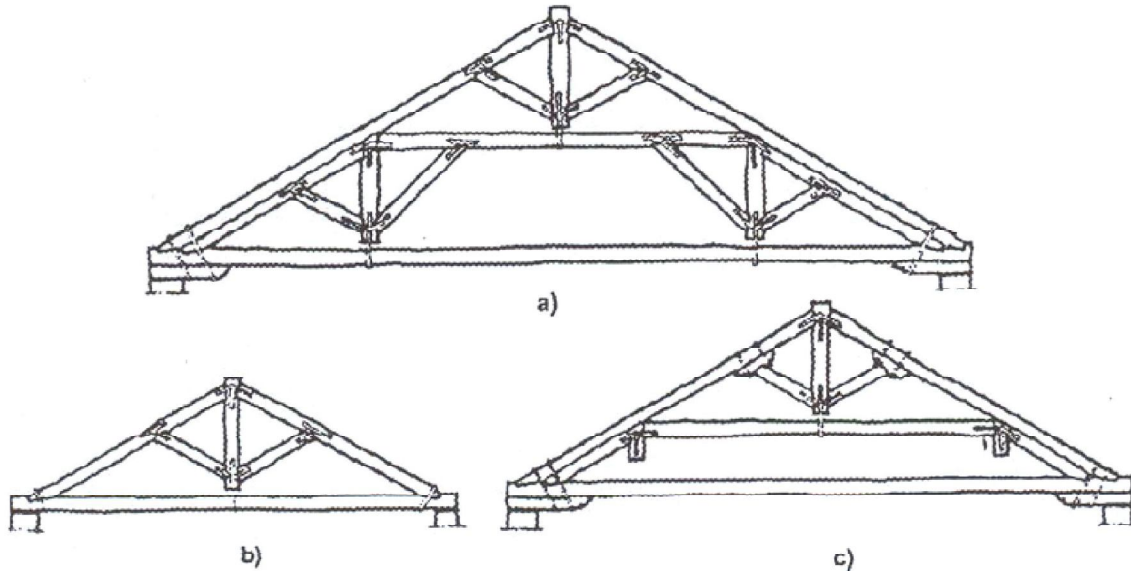
Per la copertura di grandi luci venivano usate travi composte, costituite da due o più elementi lineari combinati con ingegnosi intagli, biette, staffe o chiavarde a vite, ottenendo elementi più lunghi di quelli reperibili in natura e sezioni con inerzie via via maggiori.



## COPERTURE

La capriata in legno costruisce certamente la più famosa ed ingegnosa applicazione di ingegneria.

La capriata consente infatti di sorreggere le travi della copertura *scaricando agli appoggi solamente azioni verticali attraverso un funzionamento ad arco con catena inferiore*; questa tecnica permette di coprire ampie luci e lascia completamente liberi gli spazi sotto la copertura



### 5.2.2. Applicazione del legno nelle costruzioni attuali

## ILLUSTRAZIONE DI IMMAGINI DI STRUTTURE IN LEGNO MASSICCIO E LAMELLARE

### EDIFICI IN LEGNO MASSICCIO (COMPENSATO DI TAVOLE)

Le costruzioni di tipo massiccio con legno compensato di tavole sono caratterizzate dall'impiego di elementi massicci piani multistrato con funzione portante, nei quali le dimensioni lungo entrambi gli assi principali sono di gran lunga maggiori dello spessore.

Gli elementi piani portanti di compensato di tavole assumono, in base alle condizioni di carico, funzione portante di piastre e/o lastre. La struttura della sezione trasversale del compensato di tavole (pannelli monostrato disposti di solito alternativamente ad angolo retto l'uno rispetto all'altro) permette di ottenere con un unico pannello una capacità portante nelle due direzioni principali del loro piano.

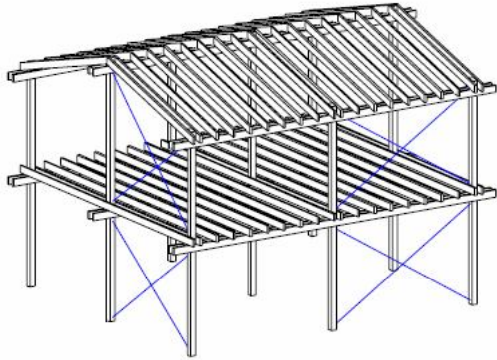
A seguito della capacità di ripartizione trasversale dei carichi, che dipende dalla struttura della sezione, è possibile in ogni punto l'assorbimento di carichi concentrati.



Abitazione unifamiliare – Wörschach (A)

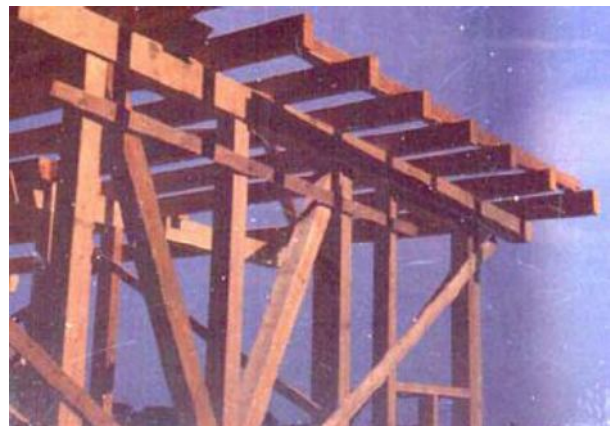
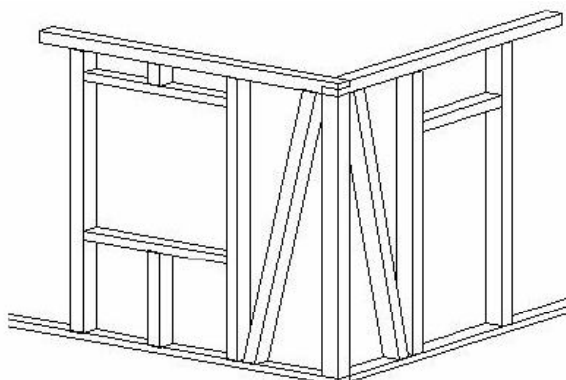
## EDIFICI AD OSSATURA PORTANTE IN LEGNO

Le moderne costruzioni ad ossatura portante sono state realizzate sin dalla fine degli anni '60 per lo più in Europa, ed in Giappone dall'inizio degli anni '80. Dimensioni del reticolo in pianta grandi a piacimento, rese possibili dallo sviluppo del legno lamellare incollato, aprivano, grazie all'aumento dei possibili interassi di travi e colonne, ampi spazi per la concezione dello spazio interno ed il suo utilizzo.



## SISTEMA COSTRUTTIVO A TRALICCI DI LEGNO

Le costruzioni a traliccio si sono sviluppate in quelle Regioni dove il legno non era disponibile nella quantità necessaria, ad esempio, per le costruzioni massicce. Senza le attuali capacità di trasporto l'impiego dei materiali da costruzione si orientava generalmente secondo la loro provenienza geografica. Perciò esistono molte costruzioni a traliccio in Europa dell'est e centrale, ma anche in Inghilterra, Germania settentrionale, Danimarca e Olanda.

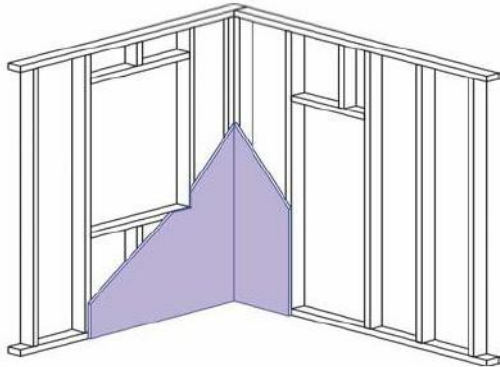




## SISTEMA COSTRUTTIVO AD INTELAIATURA DI LEGNO

Mentre nelle costruzioni a traliccio e ad ossatura portante i carichi vengono assorbiti da elementi di tipo lineare, nelle costruzioni intelaiate ci si trova di fronte ad un sistema costruttivo a lastre, per il quale gli elementi portanti non sono separati da quelli di irrigidimento e tamponamento.

La definizione di “costruzione intelaiata di legno” deriva dall’inglese "timber frame", ossia telaio di legno. L’ossatura portante, con montanti disposti a distanza piuttosto ravvicinata, il telaio di legno appunto, viene rivestito con pannelli per costituire così una lastra. Vengono impiegate sezioni e materiali di rivestimento standard, connessi mediante semplici mezzi di collegamento come chiodi, cambrette e bulloni.



### 5.3. Caratteristiche fisico-meccaniche del materiale legno

Il legno è un materiale di *origine biologica*, si ricava dai tronchi degli alberi e viene utilizzato sia nella forma originaria (pali), sia dopo apposite lavorazioni sottoforma di prodotti derivati dal legno (travi, pannelli di fibra, di particelle).

Tipiche lavorazioni:

- **SEGAGIONE** (travi, listelli, tavole)
- **SFOGLIATURA** (compensati)
- **SFIBRATURE** (pannelli di fibre)

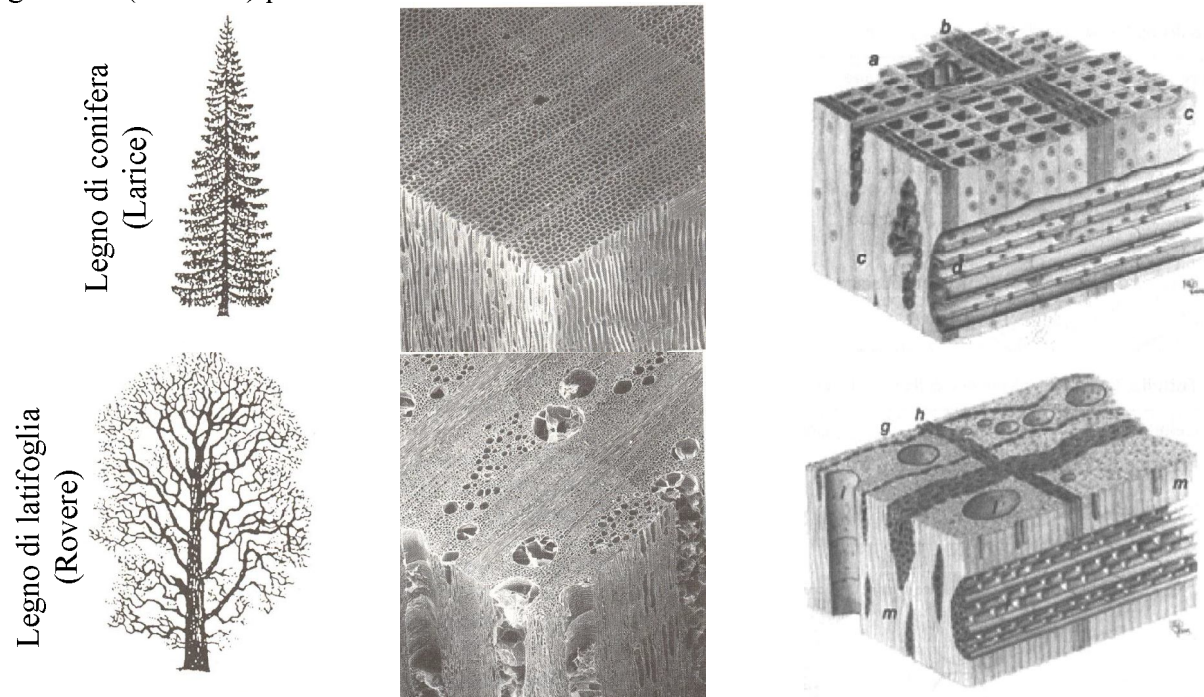
I legnami vengono identificati in base alla specie legnosa (classificazione botanica):

- **LATIFOGLIE** (“**HARDWOODS**”):  
faggio, castagno, quercia e pioppo
- **CONIFERE** (“**SOFTWOODS**”):  
abeti, pini, larici, douglas



5.3.1. La microstruttura del legno: l'anisotropia

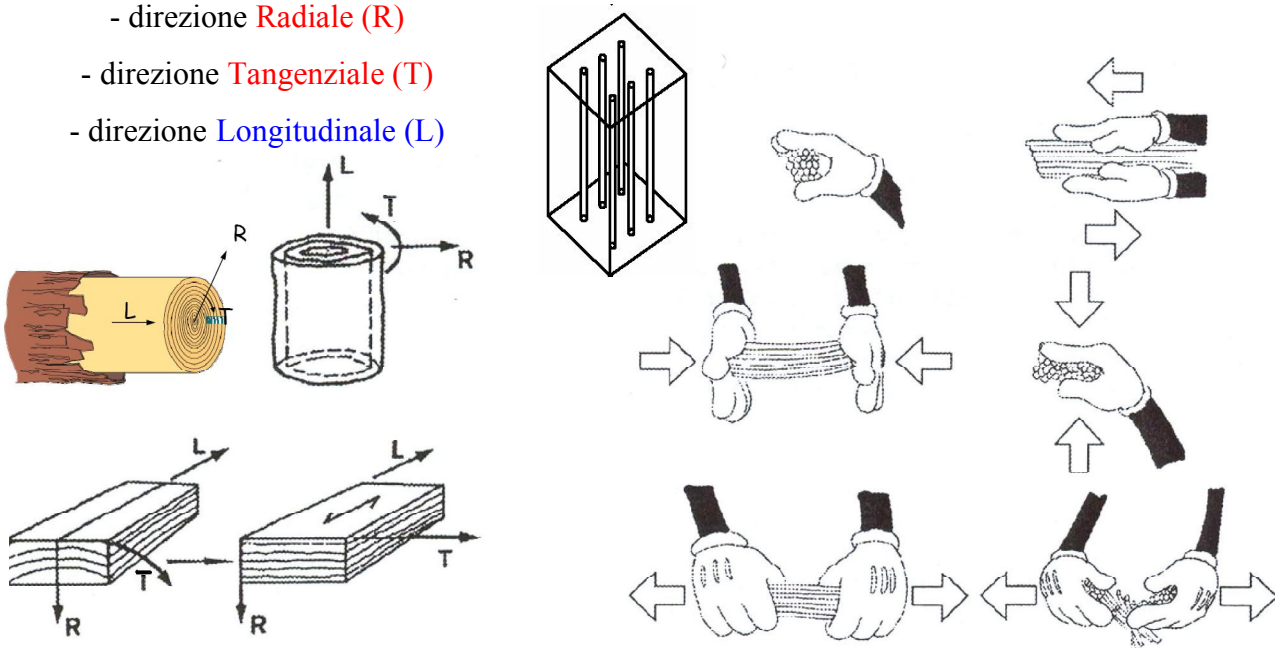
La struttura del legno è costituita da elementi cellulari sottili ed allungati con orientamento generale (fibratura) parallelo all'asse del tronco.



La struttura fibrosa orientata conferisce una spiccata ortotropia delle caratteristiche meccaniche, infatti si può pensare ad un insieme di filamenti immersi in una matrice meno resistente.

Idealizzando il tronco come un cilindro, si possono identificare 3 direzioni anatomiche principali:

- direzione **Radiale (R)**
- direzione **Tangenziale (T)**
- direzione **Longitudinale (L)**



Generalmente si assume per semplicità che le proprietà nelle direzioni Tangenziali e Radiali presentino le caratteristiche meccaniche paragonabili, ottenendo così un materiale ortotropo a simmetria cilindrica con due direzioni principali:

- direzione longitudinale L, parallela alla fibratura, indicata con il **pedice 0**, che rappresenta l'angolo di inclinazione rispetto all'asse longitudinale. (ad es:  $f_{c,0}$ )
- direzione trasversale T, ortogonale alla fibratura, indicata con il **pedice 90**, che rappresenta l'angolo di inclinazione rispetto all'asse longitudinale. (ad es:  $f_{c,90}$ )

Si possono così individuare diverse caratteristiche meccaniche che interessano l'ambito dell'ingegneria:

- |   |  |
|---|--|
| - compressione parallela $\sigma_{c,0}$   | - trazione parallela $\sigma_{t,0}$        |
| - compressione ortogonale $\sigma_{c,90}$ | - trazione ortogonale $\sigma_{t,90}$      |
| - flessione (compressione) $\sigma_{f,c}$ | - flessione (trazione) $\sigma_{f,t}$      |
| - taglio (scorrimento long.) $\tau$       | - taglio ortogonale (rolling shear) $\tau$ |

### 5.3.2. La macrostruttura del legno: i difetti del legno

Macroscopicamente il legno è caratterizzato da:

- **colore**
- **venatura** (tracce degli anelli annuali di accrescimento)
- **tessitura** (dimensioni dei più grandi elementi cellulari)
- **fibratura** (direzione generale dell'asse longitudinale degli elementi cellulari)

Il legno è un materiale **altamente eterogeneo** e presenta delle caratteristiche che noi chiamiamo "difetti" perché peggiorano le prestazioni del materiale

- **nodi** (residui di rami rimasti inclusi)
- **cipollature** (fessure anulari)
- **fibratura spiralata o torta** (causata dal vento)
- **fessure da ritiro** (per la riduzione dell'umidità)
- **fratture da vento** (rottture parziali di fibre)
- **tasche di resina** (cavità schiacciate tra due anelli)

La presenza di difetti non alterano solamente i valori delle caratteristiche meccaniche a rottura, ma anche la tipologia o la modalità di rottura. Ad esempio in una prova a flessione, la presenza di un difetto (nodo) in zona tesa può innescare una prematura rottura fragile a trazione.

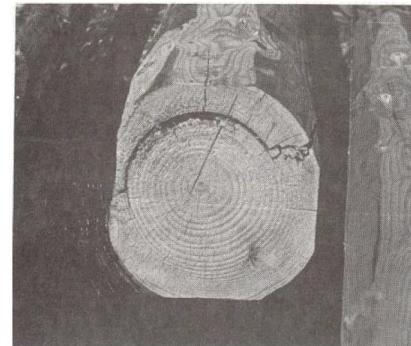
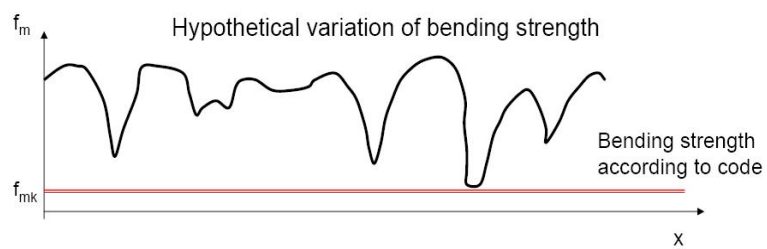
presenza di nodi:



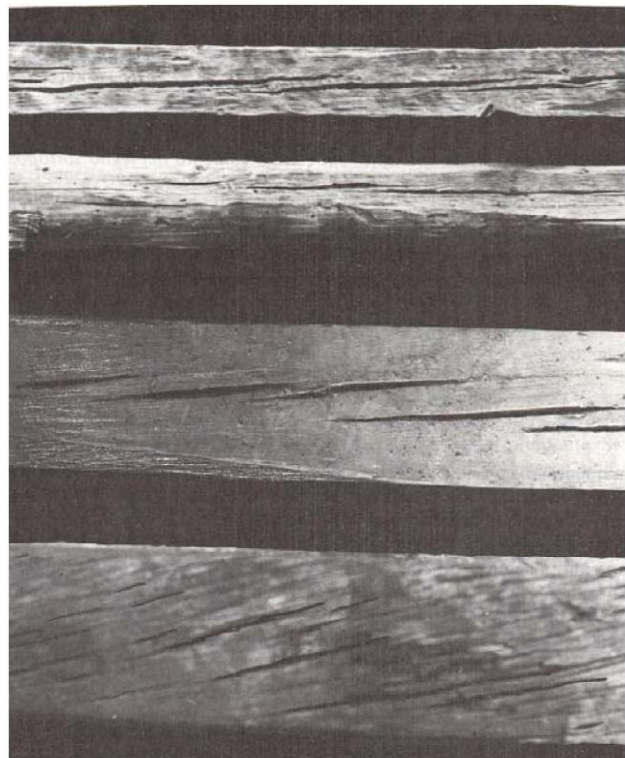
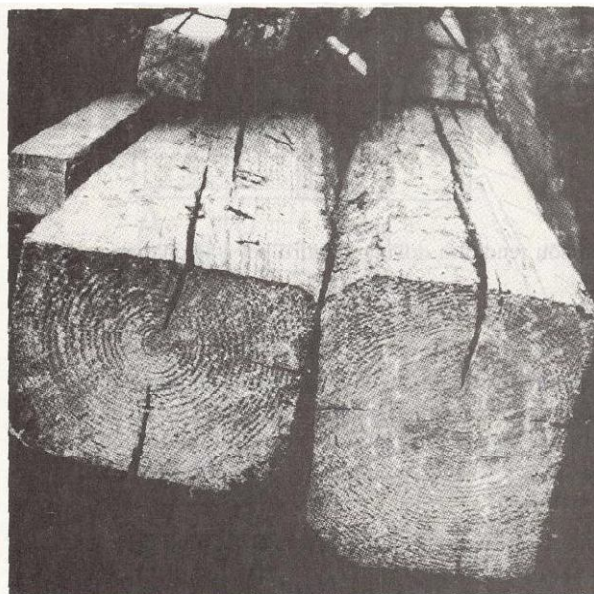
Sawn timber beam with knots

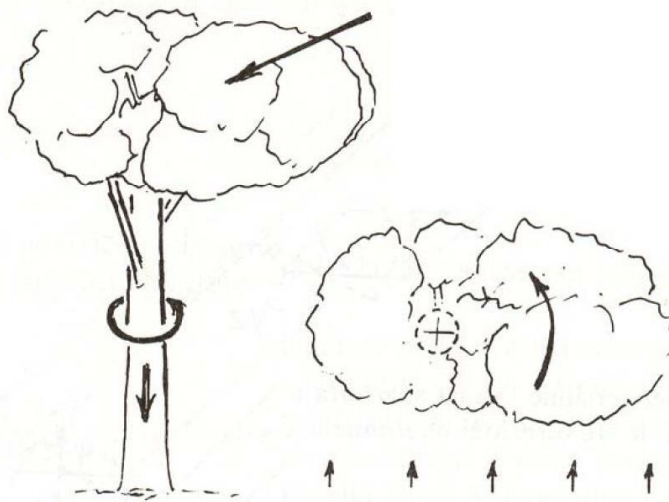


presenza di cipollature:



presenza di fessure da ritiro:



fibratura spiralata:

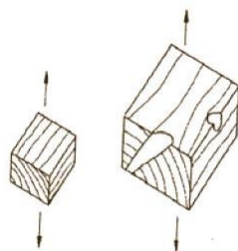
La presenza di difetti influisce sensibilmente sui parametri meccanici del materiale.

Va sottolineato che l'innesco della rottura in una membratura lignea avviene generalmente in corrispondenza dei difetti naturali (nodi, zone a fibratura inclinata), con modalità di tipo fragile.

Appare evidente quindi che prove su piccoli campioni privi di difetti (appositamente ricavati senza difetti dalla massa legnosa e chiamati legno netto) diano resistenze molto più elevate di prove su campioni grandi di legno strutturale (con difetti).

Al crescere della dimensione del campione di prova si riduce la resistenza del materiale (effetto volume); tale effetto è maggiormente evidente per prove di trazione perpendicolare alla fibratura.

In conclusione più grande è il volume sollecitato, maggiore sarà la probabilità di trovare un difetto riduttore della resistenza.



Per tale ragione nei calcoli, si dovrà fare riferimento ad una resistenza di progetto, funzione del valore ricavato dalle prove sperimentali, ma adeguatamente corretto a seconda delle dimensioni del volume.

### EFFETTO VOLUME - Legno Massiccio

La normativa permette di considerare “l'effetto volume”, prevedendo un valore di resistenza maggiore per sezioni alquanto limitate.

Per elementi di legno massiccio sottoposti a flessione o a trazione parallelamente alla fibratura che presentino una altezza o, rispettivamente, una larghezza della sezione trasversale **minore di 150 mm**, i valori caratteristici  $f_{m,k}$  ed  $f_{t,0,k}$  possono essere aumentati tramite il coefficiente moltiplicativo  $k_h$ , così definito:

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{150}{h} \right)^{0.2} \\ 1.3 \end{array} \right.$$

essendo h, in millimetri, l'altezza della sezione trasversale dell'elemento inflesso oppure la larghezza della sezione trasversale dell'elemento sottoposto a trazione.

### EFFETTO VOLUME - Legno Lamellare

Per elementi di legno lamellare incollato sottoposti a flessione o a trazione parallelamente alla fibratura che presentino una altezza o, rispettivamente, una larghezza della sezione trasversale **minore di 600 mm**, i valori caratteristici  $f_{m,k}$  ed  $f_{t,0,k}$  possono essere aumentati tramite il coefficiente moltiplicativo  $k_h$ , così definito:

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{600}{h} \right)^{0.1} \\ 1.1 \end{array} \right.$$

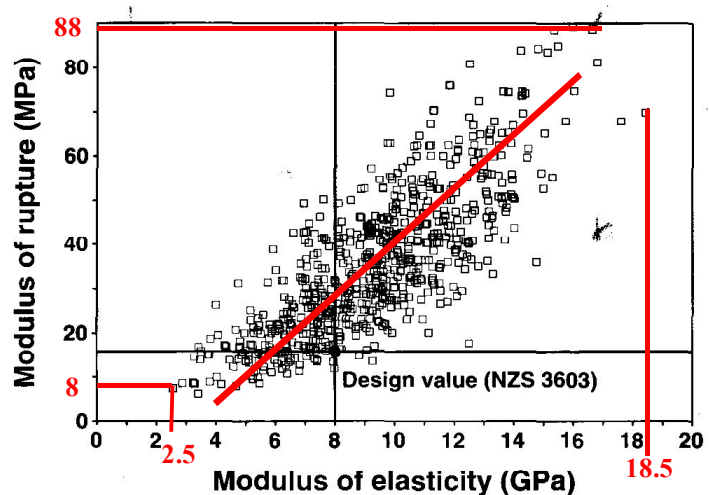
essendo h, in millimetri, l'altezza della sezione trasversale dell'elemento inflesso oppure la larghezza della sezione trasversale dell'elemento sottoposto a trazione.

### 5.3.3. La variabilità del legno

A causa della sua origine naturale biologica, il legno presenta una elevata variabilità di tutte le sue caratteristiche; queste dipendono essenzialmente da:

- **Specie legnosa** (ad es: la quercia è più resistente di un abete)
- **Provenienza** (ad es: l'abete finlandese è più resistente di uno italiano)
- **Difettosità** (categoria) (ad es: un abete con pochi nodi è più resistente di uno con molti)

Eseguendo prove su numerosi campioni di legno della stessa specie e provenienza si ottiene che il rapporto fra la resistenza del campione più resistente e quella del più debole può raggiungere valori pari a 3-4.



E' quindi indispensabile, per garantire la sicurezza e l'economicità dell'opera, selezionare gli elementi migliori da quelli peggiori.

In particolare si possono distinguere tre “gruppi”:

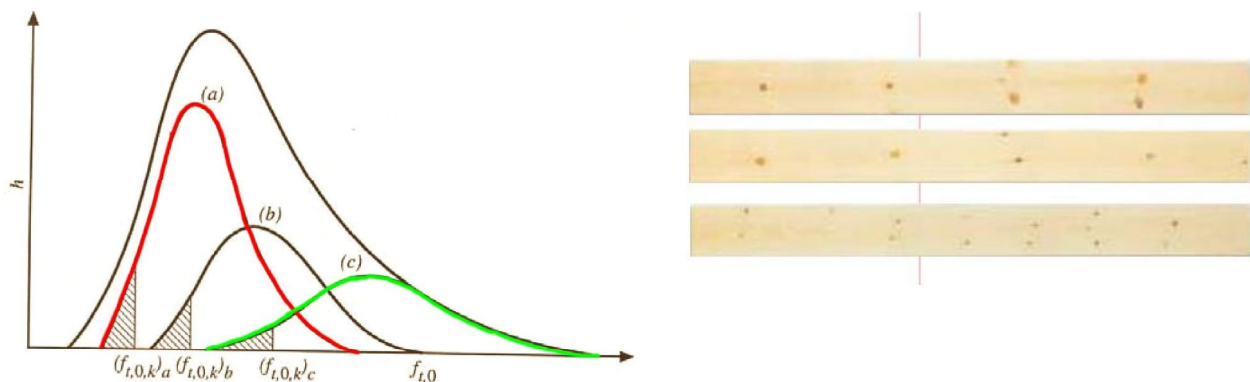
peggiori (a),

intermedi (b),

migliori (c);

inoltre ci potrebbe essere un quarto gruppo costituito da elementi con troppi difetti, che vanno necessariamente scartati.

Si ottengono valori caratteristici diversi per gli elementi dei tre gruppi.



**OSS:** tale selezione veniva già operata dai vecchi carpentieri (“maestri”) che usavano collocare i pezzi migliori nelle zone più sollecitate e quelli con i difetti più vistosi nelle zone meno caricate.

#### 5.3.4. Le alterazioni biologiche del legno

A causa della sua origine biologica e della sua costituzione chimica, il legno viene degradato da:

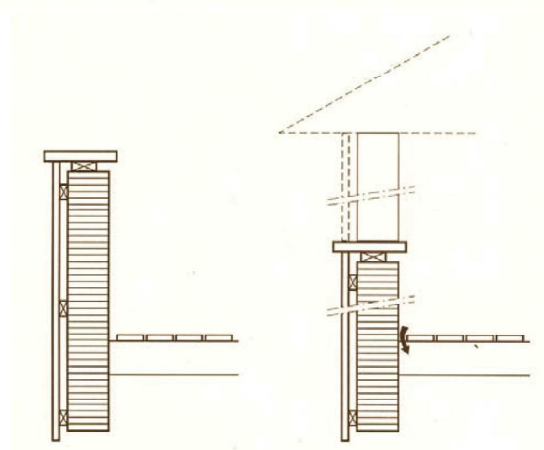
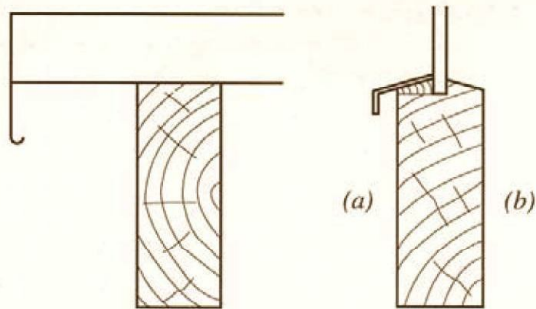
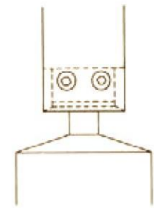
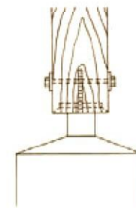
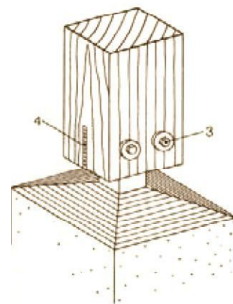
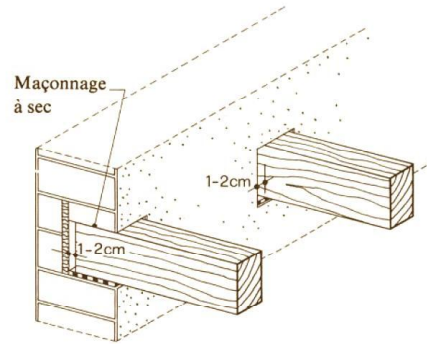
- agenti ambientali (attacchi abiotici): fuoco, esposizione alle intemperie.

Gli effetti di tali attacchi, non compromettono di per sé in maniera grave la funzionalità strutturale dell'elemento ligneo, ad esclusione dell'incendio. Vanno comunque tenuti in considerazione in quanto possono rappresentare la causa di innesco di altri fenomeni di degrado.

Il legno è molto resistente agli agenti chimici (è stato usato per anni come materiale per contenitori di sostanze aggressive), è invece sensibile all'azione del sole (raggi solari) che combinato con l'azione dell'umidità, della pioggia e del gelo, può dar luogo ad un complesso di fenomeni chiamato *invecchiamento da fotolisi*: demolizione della lignina e della cellulosa.

- agenti biologici (attacchi biotici): insetti che lo utilizzano come nutrimento o abitazione (le cui gallerie indeboliscono la struttura), funghi che causano marciume e generalmente richiedono condizioni di umidità elevata.

Il legno in condizioni di umidità superiore al 20% marcisce e quindi va protetto dal contatto con l'acqua.





## 5.4. Comportamento igroscopico

Il legno è un materiale estremamente sensibile all'umidità.

Al variare delle condizioni ambientali il legno continua indefinitamente ad adsorbire e desorbire l'umidità dell'atmosfera tendendo ad equilibrarsi con le condizioni termoigrometriche dell'ambiente circostante. In altre parole, può tendere a seccarsi (diminuendo il volume) o a impregnarsi (gonfiandosi).

Il legno è infatti un **MATERIALE POROSO-CAPILLARE**. A seconda della massa volumica del legno, la percentuale dei pori è mediamente pari a 50-60%. Questo sistema costituito prevalentemente da cavità, come tutti i materiali porosi, può assorbire vapore acqueo dall'aria circostante oppure altri liquidi (ad es. soluzioni di sostanze protettive del legno, adesivi). L'assorbimento dipende dall'umidità relativa dell'aria, dalla temperatura, dalla specie legnosa, alla modalità di taglio, dal senso della fibratura, dalle dimensioni della sezione.

La presenza di acqua in quantità variabile nel legno si riflette ovviamente sulla densità o massa volumetrica  $\rho$ .

### 5.4.1. La densità o massa volumetrica del legno

La densità è la più importante proprietà fisica: molte proprietà meccaniche (resistenza, moduli elastici) possono essere espresse in funzione della densità: in generale queste proprietà aumentano all'aumentare della densità.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \text{kg/m}^3 \right]$$

La massa volumica delle pareti cellulari è praticamente costante per tutte le specie, e vale

$$\text{circa } 1,53 \text{ g/cm}^3 = 1530 \text{ kg/m}^3.$$

La massa volumica apparente del legno invece dipende dalla percentuale di volume occupata dalla parete cellulare e può variare da specie a specie, oltre che dall'umidità.

SPECIE LEGNOSA		VALORE MEDIO DELLA MASSA VOLUMICA E RELATIVO CAMPO DI VARIAZIONE
CONIFERE	ABETE ROSSO	450 300 - 620
	ABETE BIANCO	440 310 - 610
	LARICE	650 380 - 930
	PINO SILVESTRE	550 380 - 660
	DOUGLASIA	510 390 - 720
LATIFOGIE	QUERCO FAGGIO	760 500 - 1000
	ROBINIA	750 600 - 870
	CASTAGNO	580 370 - 700
	PIOPPO	500 400 - 630

### 5.4.2. L'umidità del legno

L'umidità del legno (detta anche tenore di umidità o contenuto di umidità) influenza praticamente tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e tecnologiche.

Inoltre i parassitari del legno, animali e vegetali, necessitano per la sopravvivenza di un determinato contenuto minimo di umidità; è quindi possibile ottenere una buona protezione del legno semplicemente mantenendo sufficientemente bassa la sua umidità.

Nella tecnologia del legno, l'umidità viene definita come rapporto fra il contenuto d'acqua e il peso anidro del campione ed è espressa generalmente in termini percentuali:

$$U\% = \frac{P_u - P_o}{P_o} \cdot 100$$

dove:

$P_u$         è il peso del campione umido  
 $P_o$         è il peso del campione secco

Secondo questa definizione l'umidità del legno  $U$  può superare il 100%. Per esempio, l'umidità nell'alburno di legni di conifere è pari a  $120 \div 150\%$  o anche più.

Valori tipici per il legno ordinario sono:  $8\% < U\% < 20\%$

L'umidità si determina usualmente tramite essiccazione: il campione viene posto in un forno ventilato a pressione ambiente e temperatura costante di  $103^\circ\text{C}$  per un tempo sufficiente al raggiungimento della costanza di massa (**stato anidro del legno**)

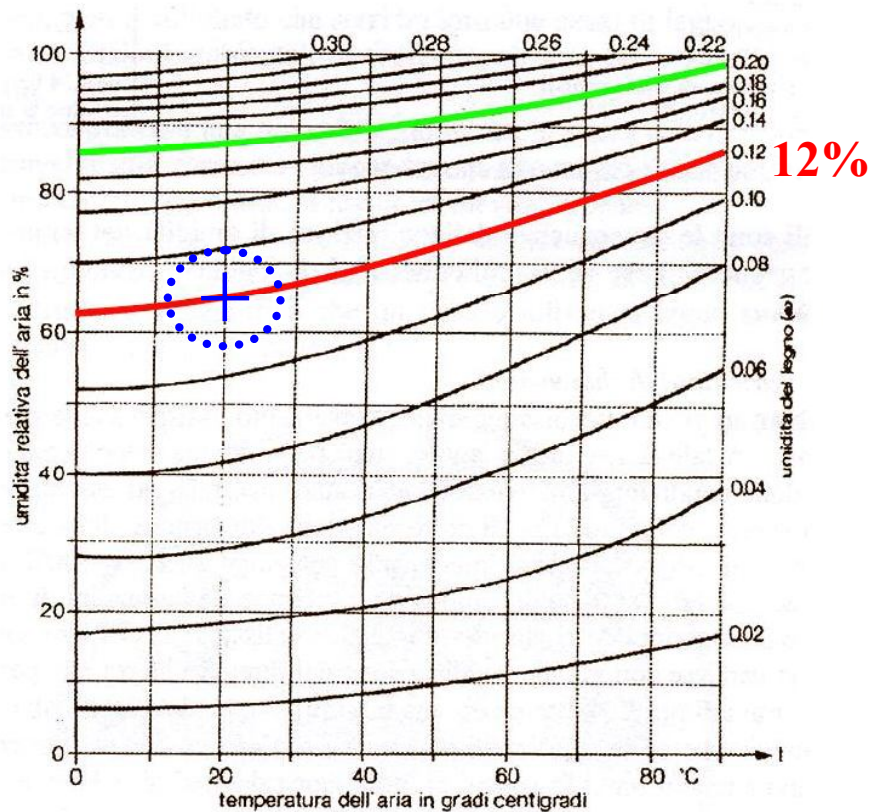
Il contenuto d'acqua può essere calcolato anche in modo meno distruttivo (per esempio in situ): esistono strumenti di misura che determinano l'umidità del legno in base alla conducibilità elettrica (favorita dall'acqua presente nei pori).

Come detto, il contenuto d'acqua è strettamente correlato alle condizioni climatiche dell'ambiente circostante, più precisamente alla coppia temperatura / umidità relativa dell'aria.

Il legame esistente fra queste grandezza (**curva di equilibrio igroscopico**) è espresso dal grafico che segue.

Si definisce convenzionalmente "condizione normale per il legno", l'umidità **pari al 12% che corrisponde al punto di equilibrio igroscopico con l'ambiente alla temperatura dell'aria di  $20^\circ\text{C}$  e umidità relativa del 65% .**

Per un corretto impiego del legno è importante (fondamentale) che il legno subisca un processo di stagionatura o essiccazione graduale atto a portarlo all'umidità media di equilibrio con l'ambiente in cui saranno utilizzati i manufatti.



## Umidità media (%) della sezione e possibili variazioni

**Livelli critici**

inizio di ritiri significativi	~ 30
valore minimo ottenibile con stagionatura naturale (*)	~ 15
livello (massimo) di sicurezza contro attacchi fungini	~ 20

**Elementi protetti contro le intemperie**

locali areati e ben riscaldati in inverno	10 ± 2
locali areati e poco riscaldati in inverno	13 ± 2
locali areati e non riscaldati	15 ± 3
al riparo, all'aperto	17 ± 5

**Elementi parzialmente protetti contro le intemperie**

sezioni piccole, forte irraggiamento solare	14 ± 5
sezioni piccole, debole irraggiamento solare	16 ± 4
sezioni medie, forte irraggiamento solare	12 ± 4
sezioni medie, debole irraggiamento solare	15 ± 4

**Elementi direttamente esposti alle intemperie**

sezioni grosse, in media	18 ± 6
sezioni grosse, in superficie	20 ± 8

(\*) nei nostri climi

### 5.4.3. Le variazioni dimensionali del legno: ritiro e rigonfiamento

L'albero in vita è ricchissimo d'acqua. Una volta abbattuto tale acqua viene persa più o meno velocemente a seconda del tipo di stagionatura (naturale, artificiale).

Non si ha alcuna variazione dimensionale al di sopra del 30% di umidità; sotto tale valore si ha riduzione dimensionale o ritiro.

Nel legno, l'assorbimento o il desorbimento dell'acqua legata per un'umidità inferiore al valore di saturazione ( $U \leq U_s$ ), porta a delle variazioni di volume:

- in assorbimento

aumento di umidità  $\Rightarrow$  aumento di volume  $\Rightarrow$  rigonfiamento ( $\Delta U\% > 0$ ).

- in desorbimento

riduzioni di umidità  $\Rightarrow$  diminuzione di volume  $\Rightarrow$  ritiro ( $\Delta U\% < 0$ );

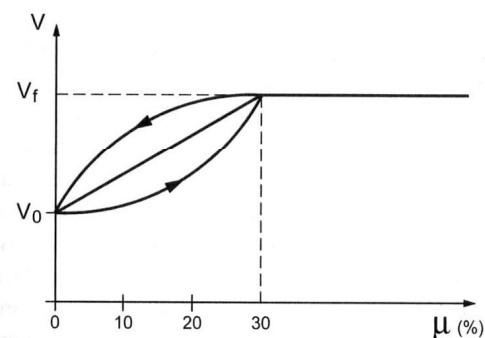
Si definisce Umidità di Saturazione  $U_s$  quel valore in % di umidità del legno per la quale tutte le pareti cellulari (ossia l'intero sistema capillare all'interno di esse) sono completamente sature di acqua. Assume valori pari a 25-30% a seconda della specie legnosa e di altri fattori.

Cicli di assorbimento e desorbimento tra lo stato fresco e quello anidro, sono caratterizzati da cicli d'isteresi igroscopica, che ai fini pratici può essere comunque trascurata.

Le grandezze caratteristiche per la valutazione del ritiro e del rigonfiamento del legno sono:

- il coefficiente di rigonfiamento  $\alpha$
- il coefficiente di ritiro  $\beta$ .

ciascuno espresso per variazioni percentuali di umidità.



Per la sua struttura anisotropa, il legno subisce variazioni di forma differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali: tangenziale (indice t), radiale (indice r) e longitudinale (indice l).

Da esse risultano i valori di ritiro e di rigonfiamento volumetrico (indice V).

## RIGONFIAMENTO LINEARE

“Il coefficiente di rigonfiamento lineare  $\alpha$  rappresenta la variazione di lunghezza del campione ( $\Delta l$ ) per un aumento di umidità  $\Delta U\%$ ” :

$$\Delta l = \alpha \cdot \frac{\Delta U\%}{100} \cdot l$$

Valori tipici:

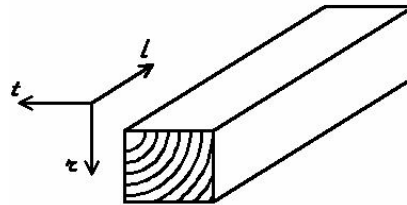
$$\alpha_l = 0.003 \div 0.005$$

$$\alpha_r = 0.03 \div 0.05$$

$$\alpha_t = 0.06 \div 0.09$$

$$\alpha_r \cong 10\alpha_l$$

$$\alpha_t \cong 20\alpha_l$$



## ESEMPIO:

Si prenda una trave lunga 4 metri soggetta ad un incremento di umidità del 6%.

Si consideri un coefficiente di rigonfiamento  $\alpha$  longitudinale di 0.004.

L'allungamento della trave dovuto alla variazione di umidità è pari a

$$\Delta l = 0.004 \cdot \frac{6\%}{100} \cdot 400 = 0.096 \approx 0.1 \text{ cm}$$

Da un punto di vista ingegneristico ha senso parlare di un unico **coefficiente di ritiro e rigonfiamento**  $\alpha$  **espresso per variazioni percentuali di umidità**, al di sotto del valore di saturazione:

$$\Delta l = \alpha \cdot \frac{\Delta U\%}{100} \cdot l$$

Valori medi del coefficiente nelle direzioni longitudinale, tangenziale e radiale sono riportati nelle seguente tabella:

Specie legnosa	Tangenziale $\alpha_T$	Radiale $\alpha_R$	Longitudinale $\alpha_L$
Conifere Europee	0.24	0.12	0.01
Quercia e Faggio	0.40	0.20	0.01

## OSS:

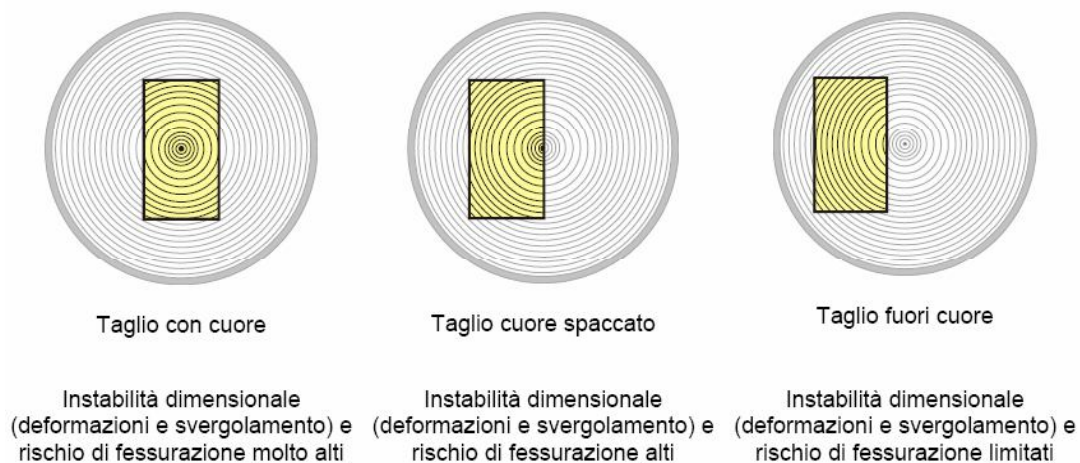
Ritiro e rigonfiamento del legno dovuti a variazioni di umidità, se impediti, producono delle tensioni interne, che possono portare all'apertura di grosse fessure, **soprattutto per sezioni molto grosse (attenzione ai collegamenti)**.

Dalla tabella precedente appare evidente la spiccata anisotropia del materiale legno, in particolare il ritiro tangenziale è mediamente il doppio di quello radiale, mentre quello longitudinale è di un ordine di grandezza inferiore.

- ritiro tangenziale: tende ad accorciare la circonferenza degli anelli annuali;
- ritiro radiale: tende ad avvicinare gli anelli al centro diminuendo lo spessore;
- ritiro longitudinale: tende ad accorciare longitudinale le fibre legnose.

L'anisotropia del ritiro, implica differenze nelle variazioni dimensionali dei manufatti che comportano alcuni fenomeni fisiologici come:

- **tensioni interne e conseguenti fessure da ritiro**
- **deformazioni del segato**



### Fessurazione:

Quando all'interno del segato è presente il cuore del tronco (midollo) la differenza fra il ritiro tangenziale ed assiale provoca inevitabilmente delle fessure (figura a), infatti ci troviamo ad avere una circonferenza troppo corta per il raggio a disposizione: la differenza è proprio pari all'apertura della fessura.



Figura a

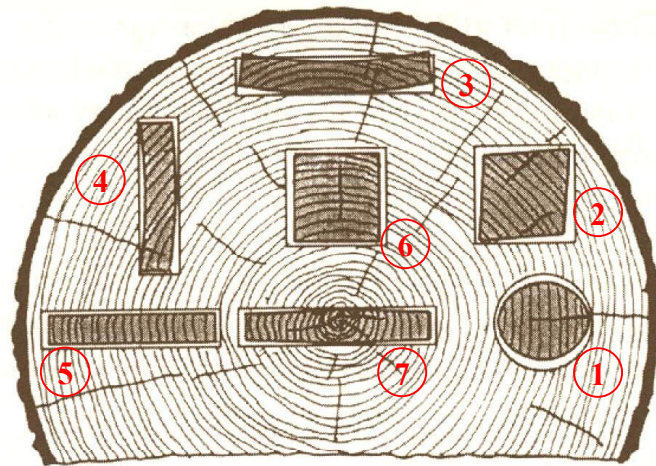


Figura b

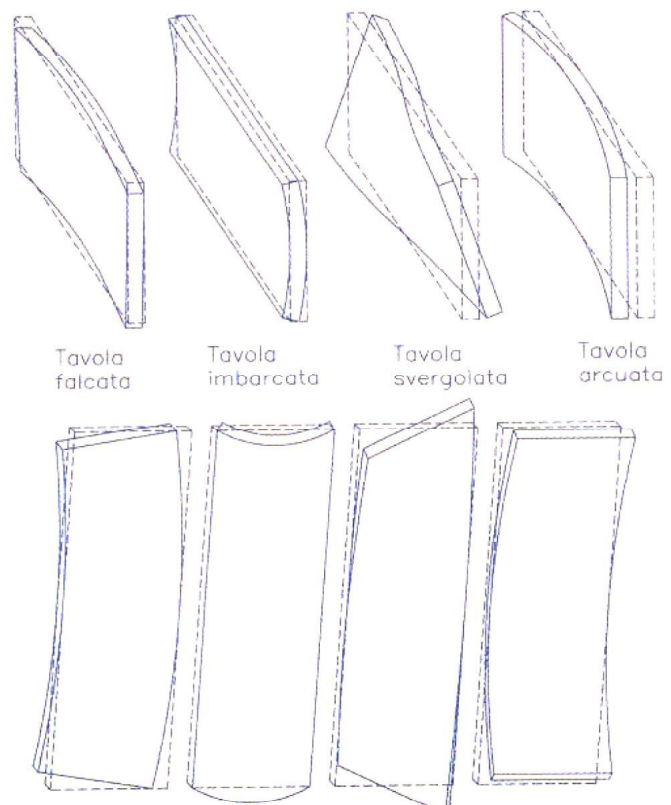
### Deformazioni:

Se il segato non contiene il midollo si ha distorsione della sezione stessa (figura b):

- |   |  |
|---|--|
| 1) ovalizzazione delle sezioni circolari; | 2) distorsione della sezione rettangolare; |
| 3) tavola tangenziale imbarcata;          | 4) tavola imbarcata;                       |
| 5) tavola radiale;                        | 6) elemento fuori cuore;                   |
| 7) tavola con cuore;                      |  |

### Possibili deformazioni del legno:

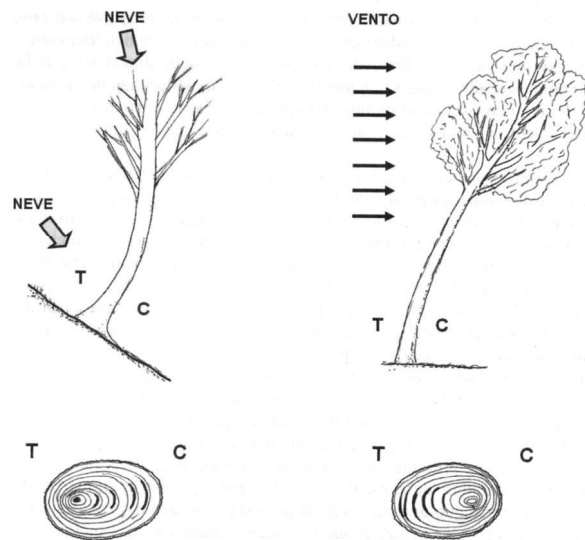
- **falcatura:** curvatura del segato in direzione della lunghezza, in un piano parallelo alla faccia;
- **imbarcatura:** curvatura del segato in direzione della larghezza
- **svergolatura:** deformazione elicoidale del segato in direzione della lunghezza;
- **arcuatura:** curvatura del segato in direzione della lunghezza, semplice o multipla, in un piano perpendicolare alla faccia.



### Tavole arcuate, falcate o svergolare

In questo caso, i fenomeni sono essenzialmente legati alla presenza di anomalie / difetti nel legno (ad esempio legno di reazione o fibratura spiralata).

Il legno di reazione è un particolare tessuto legnoso che si origina in conseguenza di carichi trasversali persistenti agenti sulla pianta in piedi; tale presenza comporta una forte disomogeneità di comportamento meccanico e deformativo: fessure e deformazioni indesiderate legate al diverso ritiro delle due facce.



#### 5.4.4. La stagionatura ed essiccazione del legno

Per evitare l'apertura delle fessure bisogna:

- far **STAGIONARE** bene il legno per ridurre la percentuale di umidità;
- nelle **UNIONI**, ridurre il numero dei bulloni o chiodi in modo di consentire al legno di muoversi;
- qualora il legno venga impiegato direttamente all'esterno, senza protezione, è necessario trattarlo usando particolari sostanze impregnanti per renderlo **impermeabile e ridurre le variazioni di umidità**.

### PROCESSO DI ESSICCAZIONE

Il legno nell'albero contiene una quantità di acqua che in taluni casi può arrivare al 75% del suo peso umido. Dopo il taglio e la riduzione in tavole, esso perde gradatamente la sua umidità iniziale fino a equilibrarla con quella dell'ambiente in cui viene a trovarsi permanentemente. Durante questo processo di essiccazione il legno subisce notevoli variazioni di volume per cui è impossibile usarlo come materiale da lavoro prima della sua adeguata stagionatura.

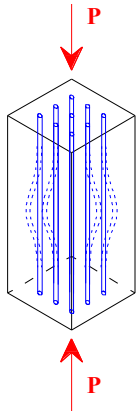




Le proprietà meccaniche del legno sono definite in base a: “ prove sperimentali effettuate con una durata di 300 secondi (5min) su provini all’umidità di equilibrio del legno corrispondente alla temperatura di  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  ed umidità relativa dell’aria del  $65 \pm 5\%$  “

La **curva  $\sigma - \varepsilon$**  rappresentata in figura è ricavata da una prova di rottura per sollecitazione parallela alle fibre su provini / su elementi strutturali reali:

- La **resistenza** a trazione a fibre parallele risulta essere superiore alla resistenza a compressione a fibre parallele;
- Il **modulo elastico E** a trazione a fibre parallele è maggiore del modulo elastico E a compressione a fibre parallele;
- La **modalità di collasso** a trazione è di tipo fragile, a compressione risulta essere più duttile.

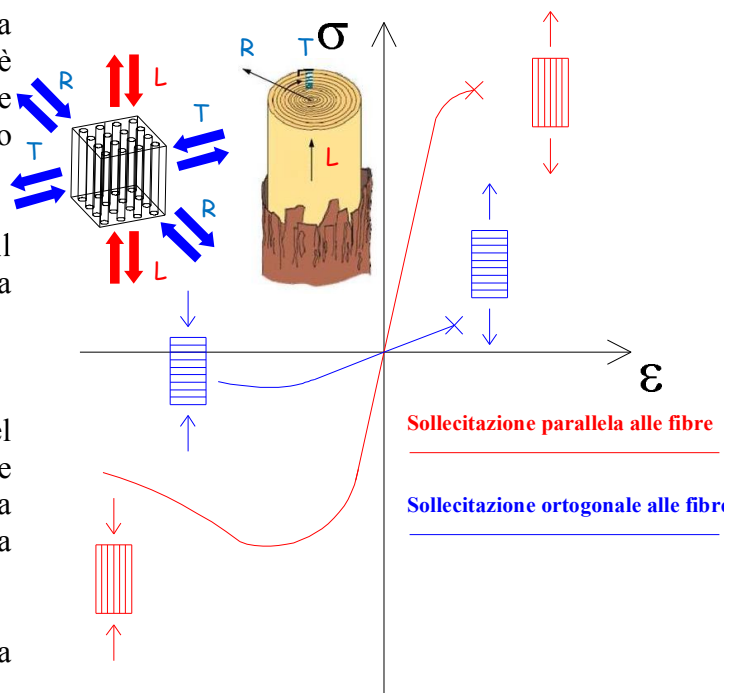


Il legno può essere considerato come costituito da un insieme di filamenti immersi in una matrice meno resistente.

A compressione i filamenti, che costituiscono la parte più resistente, cedono per **instabilità**. Ovviamente ciò non avviene sotto forze di trazione. Per tale ragione la resistenza a compressione è minore di quella a trazione.

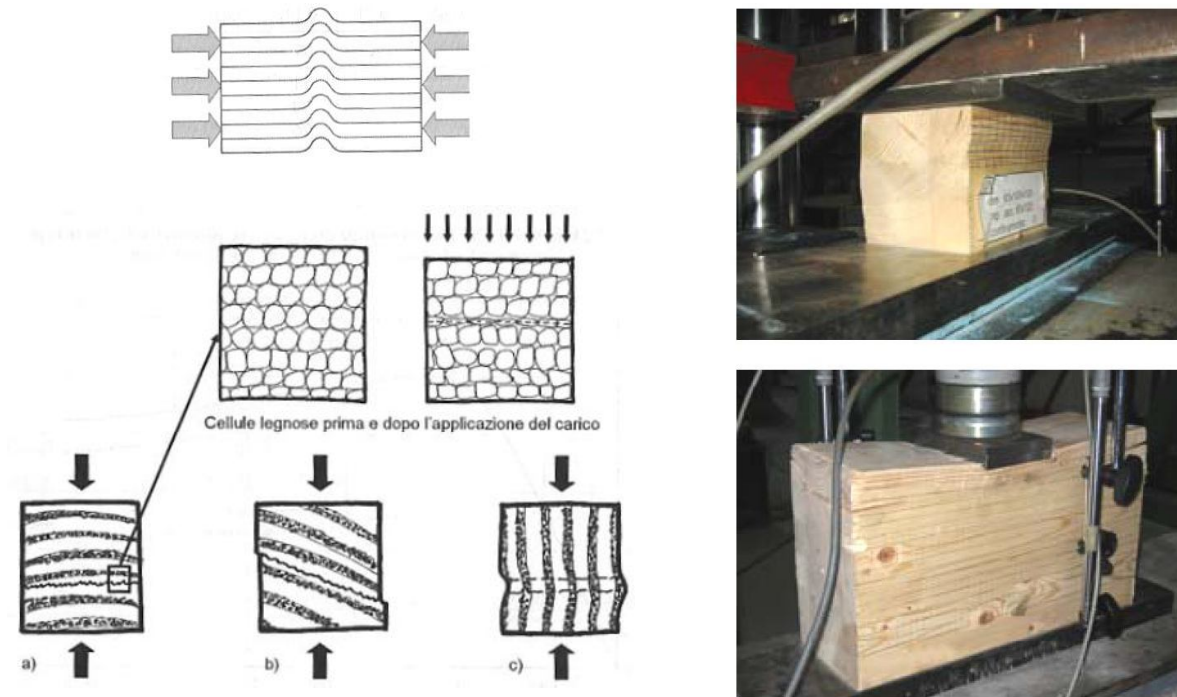
Osservando il comportamento nelle due direzioni anatomiche del legno (parallelo e ortogonale):

- Forte anisotropia: il comportamento a compressione e trazione del provino è fortemente influenzato dalla direzione della sollecitazione, ortogonale o parallela alle fibre del legno;
- C'è una significativa differenza fra il comportamento a trazione e a compressione;
- La resistenza e il modulo elastico del legno nella direzione parallela alle fibre risulta maggiore (di molto) alla resistenza e al modulo elastico nella direzione ortogonale;
- Il collasso a trazione è fragile, mentre a compressione è più duttile.

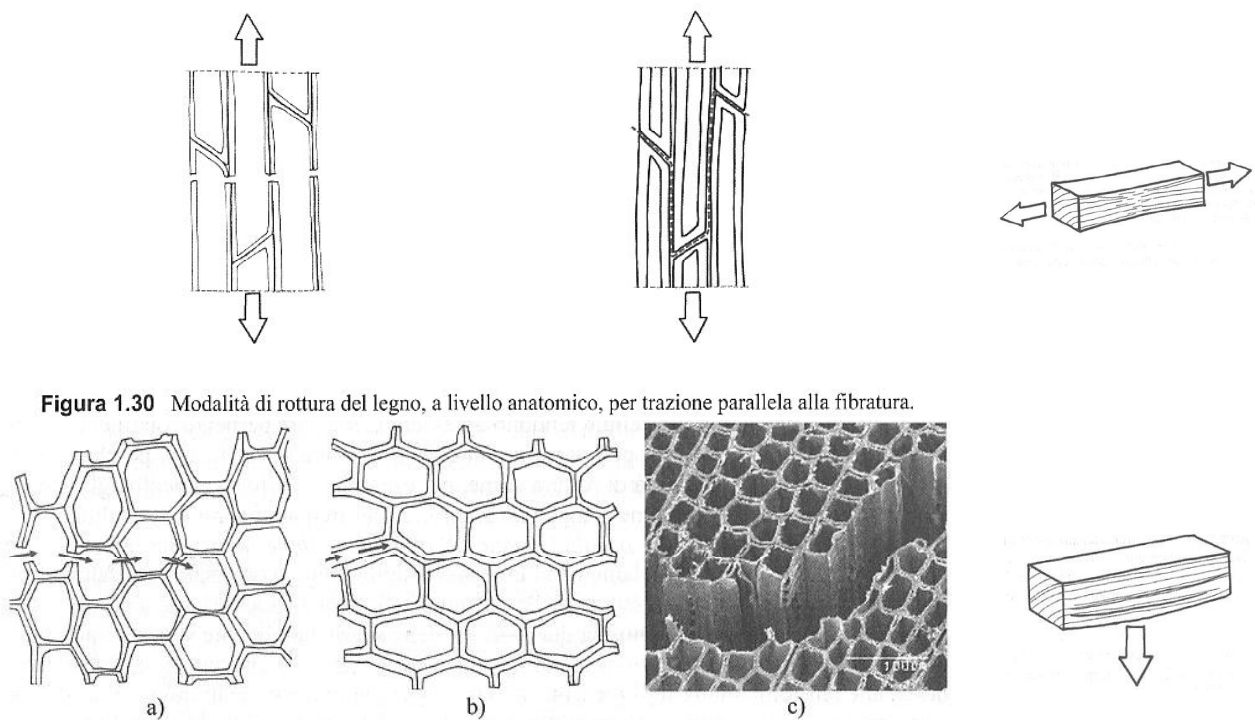


Di seguito si riportano alcune figure illustranti il comportamento di un provino di legno soggetto alle diverse azioni sollecitanti.

Sforzi assiali (compressione).



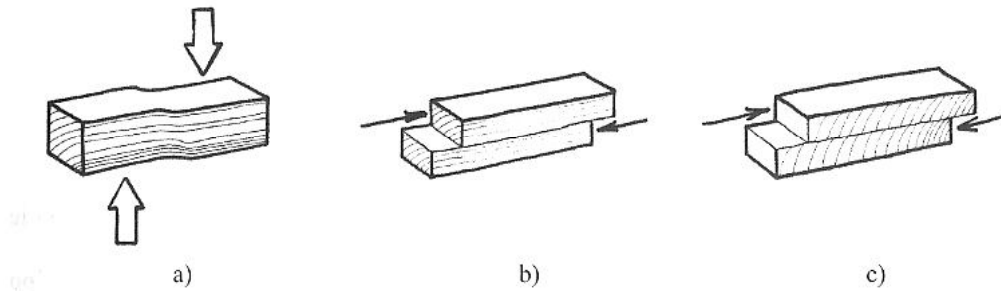
Sforzi assiali (trazione)



**Figura 1.30** Modalità di rottura del legno, a livello anatomico, per trazione parallela alla fibratura.

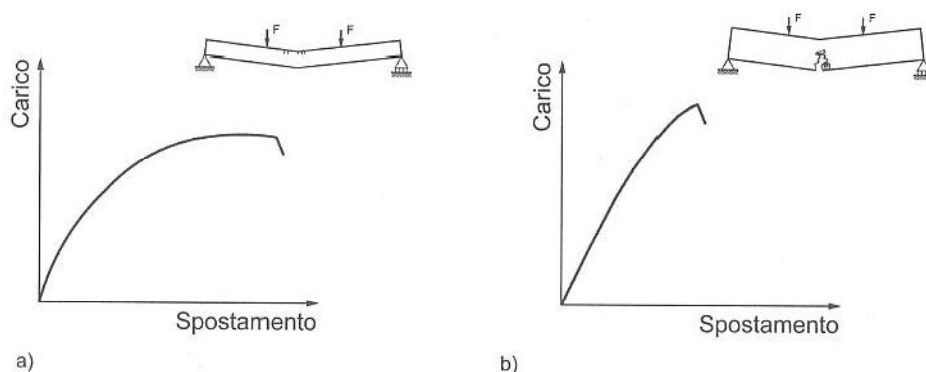
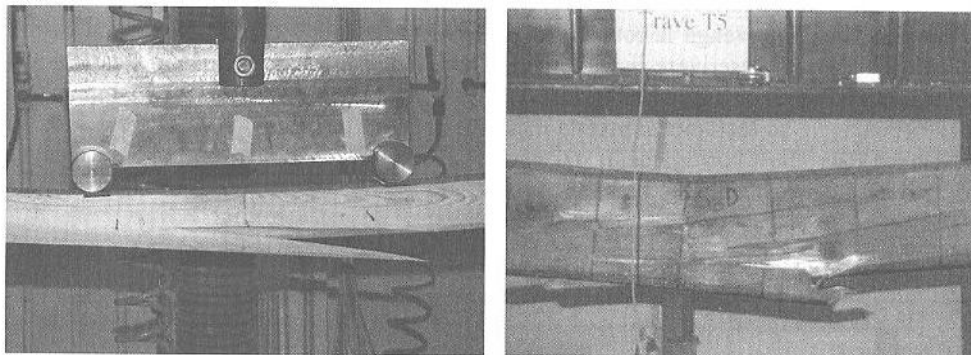
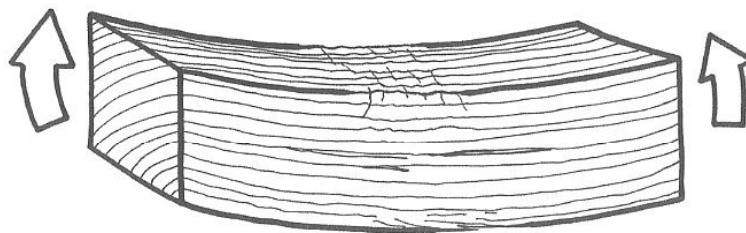
**Figura 1.31** Modalità di rottura a livello anatomico del legno per trazione ortogonale alla fibratura:  
a) frattura delle pareti cellulari; b) frattura per delaminazione tra fibre adiacenti;

Sollecitazioni taglienti.



**Figura 1.33** Proprietà meccaniche del legno sottoposto a taglio: a) nel taglio perpendicolare tendono a deformarsi le cellule perpendicolarmente al loro asse; b) nel taglio longitudinale si ha lo slittamento di cellule adiacenti longitudinalmente al loro asse; c) nel "rolling shear" le cellule tendono a separarsi ruotando una sull'altra.

Sollecitazioni flessionali



**Figura 1.37** Comportamento carico spostamento a) "pseudoduttile" per un provino di legno netto; b) fragile per un provino di legno in dimensioni d'uso, con presenza di difetti.

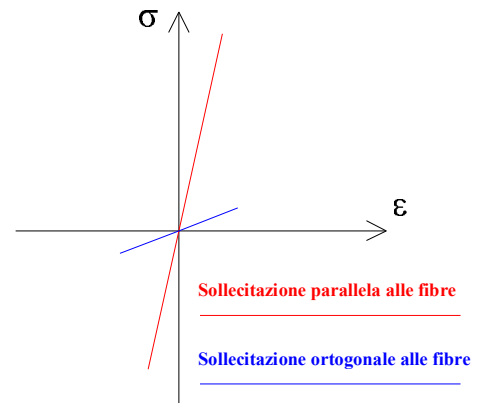
La resistenza del materiale dipende da diversi fattori:

- SPECIE LEGNOSA
- PROVENIENZA
- PARTE DELLA PIANTA da cui è estratto il provino
- INCLINAZIONE DELLE FIBRE: la resistenza è massima se le fibre sono parallele al carico, minima se le fibre sono ortogonali
- UMIDITÀ: la resistenza si riduce se l'umidità aumenta;
- DURATA DEL CARICO: la resistenza si riduce se la durata aumenta a causa del fenomeno del CREEP

L'analisi strutturale viene effettuata utilizzando i risultati della teoria dell'elasticità, riguardando il legno come un materiale:

- OMOGENEO (vero solo per il legno lamellare)
- ISOTROPO (mai nella realtà)
- A COMPORTAMENTO ELASTICO-LINEARE

distinguendo il caso di tensioni parallele alle fibre e ortogonali alle fibre.



### 5.5.2. La variazione del modulo elastico con l'umidità

Il legno umido è più deformabile, dato che il modulo elastico istantaneo decresce all'aumentare dell'umidità.

La deformabilità effettiva di un elemento strutturale non aumenta proporzionalmente al diminuire del modulo elastico ma molto meno perché varia la sezione.



$U_1, E_1$



per  $U > U_1, E < E_1$

aumento di umidità



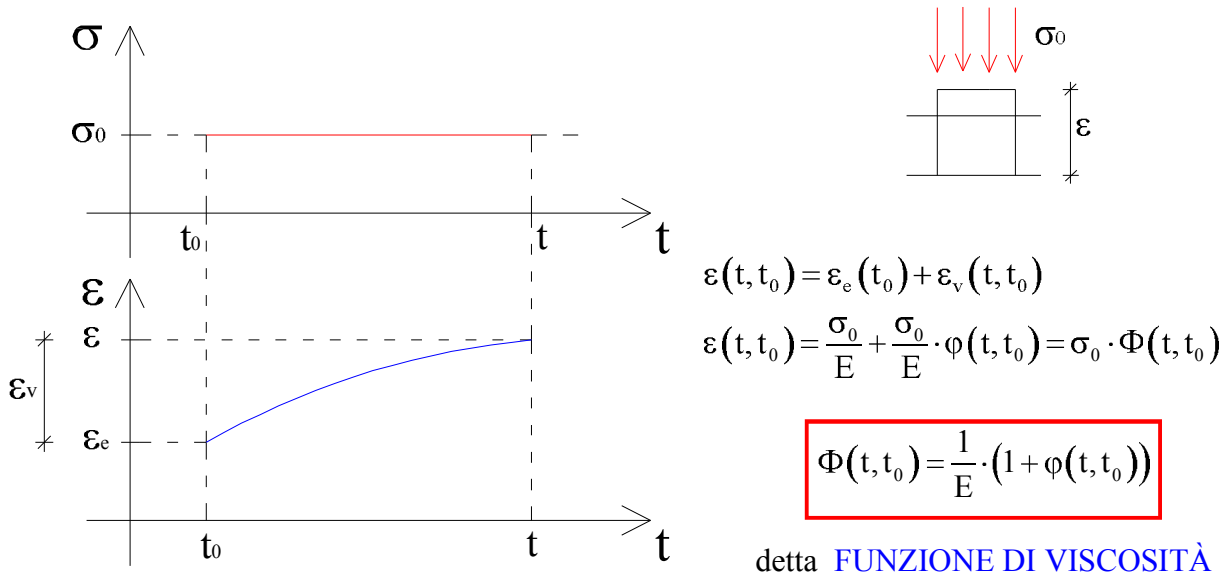
diminuzione del modulo elastico istantaneo

Si ha inoltre anche una modesta riduzione di resistenza all'aumentare dell'umidità.

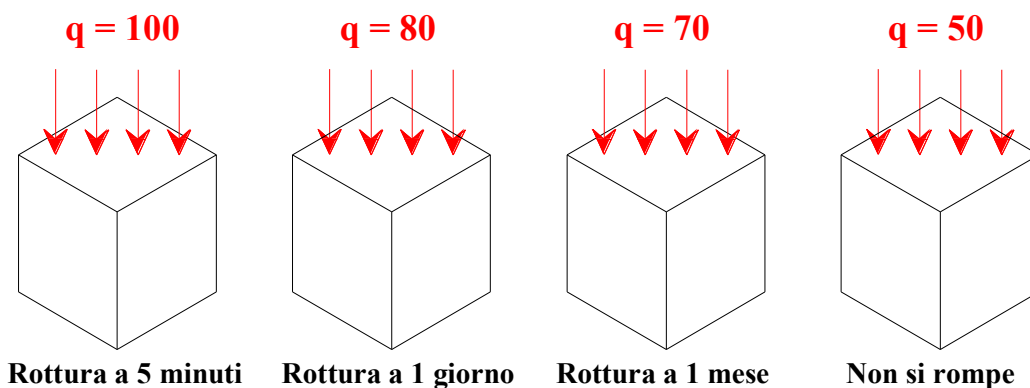
### 5.5.3. La viscosità del legno

Il legno è un materiale viscoso e la viscosità è fortemente influenzata dall'umidità.

Il fenomeno del creep, o fluage o viscosità consiste nell'aumento della deformabilità nel tempo a carico costante e umidità costante.



Per effetto della viscosità, si ha che all'aumentare del tempo di applicazione del carico, il collasso viene raggiunto per valori inferiori di carico:

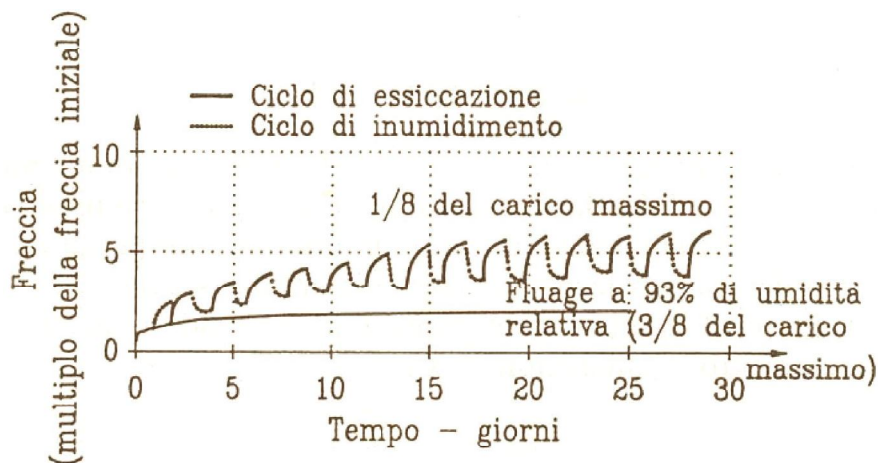


Nelle prove a rottura su campioni di legno, il tempo di carico è di 5 min; pertanto il “carico di esercizio” sulla struttura reale deve essere quantomeno dimezzato.

Come già evidenziato, nelle prove di rottura a breve termine (5 minuti) su strutture in legno di dimensioni reali (ad es. trave) si osserva una riduzione delle tensioni di collasso rispetto al caso di prove su campioni molto piccoli (legno netto), dovuta alla presenza di difetti nel legno (nodi, tasche di resina, fessure, etc.). Tale riduzione è importante soprattutto nel caso della trazione.

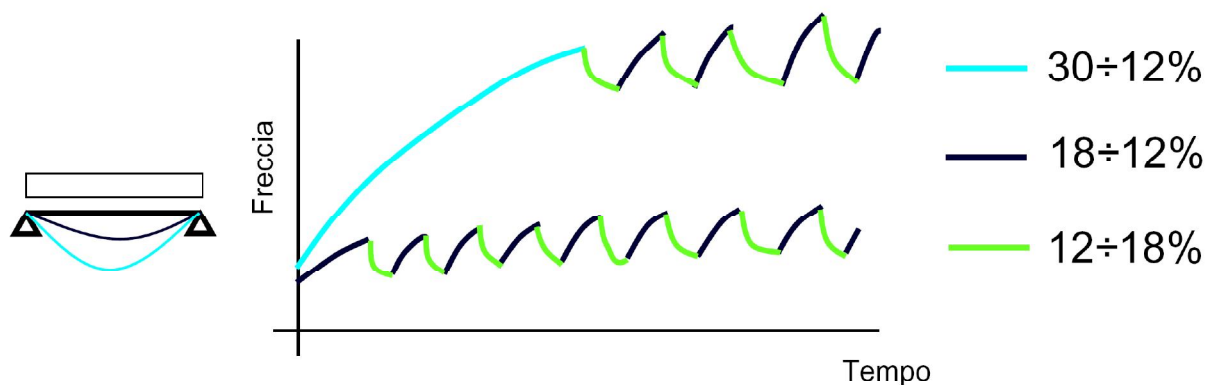
Nel caso in cui anche l'umidità vari nel tempo (caso più realistico), si ha un ulteriore aumento delle deformazione nel tempo (fenomeno chiamato viscosità meccanico-sorbitiva).

In particolare: se l'elemento inflesso si essicca sotto carico costante la freccia cresce mentre se l'elemento si umidifica la freccia diminuisce.



Ciò può sembrare anomalo sapendo che al crescere dell'umidità diminuisce il modulo E, ma bisogna tener conto che le fibre più esterne sono più sensibili alla variazione di umidità e si generano necessariamente delle coazioni interne che contribuiscono ad alterare le deformazioni dell'elemento.

Ad esempio, consideriamo la messa in opera di un elemento molto umido.



Assemblare elementi ancora molto umidi e lasciarli essiccare sotto carico, può portare a deformazioni viscosi fuori controllo. È quantomeno auspicabile puntellare a lungo la struttura.

È necessario quindi mettere in opera legname sufficientemente stagionato.

#### 5.5.4. Classi di durata del carico

La deformazione e la resistenza sono influenzate dalla **durata del carico** per cui si considerano cinque diverse classi di durata del carico (NTC 2008 / EC5 / CNR-DT206/2007)

Classe di durata del carico	Durata accumulata del carico caratteristico	Esempi di carico
Permanente	più di 10 anni	peso proprio
Lunga durata	6 mesi -10 anni	carico di esercizio nei locali adibiti a deposito
Media durata	1 settimana - 6 mesi	carichi di esercizio in generale
Breve durata	meno di 1 settimana	neve (*)
Istantaneo	--	vento e carichi eccezionali

\* In aree dove si registrano elevati carichi di neve per prolungati periodi di tempo è opportuno considerare una parte del carico come carico di media durata.

#### 5.5.5. Classi di servizio della struttura

La deformazione e la resistenza sono influenzate dalle **caratteristiche di esercizio della struttura** per cui si considerano tre diverse classi di servizio della struttura, secondo le NTC 2008.

Classe di servizio	Caratteristiche
<b>1</b>	Umidità legno in equilibrio con ambiente a 20°C ed umidità relativa aria che supera il <u>65% poche settimane all'anno (umidità media &lt;12%)</u>
<b>2</b>	Umidità legno in equilibrio con ambiente a 20°C ed umidità relativa aria che supera <u>l'85% poche settimane all'anno (umidità media &lt;20%)</u>
<b>3</b>	Condizioni climatiche che prevedono <u>umidità più elevate di quelle della classe di servizio 2</u>

In generale nella **classe di servizio 1** rientrano tutti gli elementi che si trovano interamente all'interno di una costruzione dotata di riscaldamento; della **classe di servizio 2** fanno parte tutti gli elementi che, pur non essendo all'interno di una costruzione chiusa, non sono esposti al contatto diretto con gli agenti atmosferici; della **classe di servizio 3** fanno parte tutti gli elementi di legno che non rientrano nelle altre due classi di servizio o che sono esposti al contatto diretto con l'acqua.

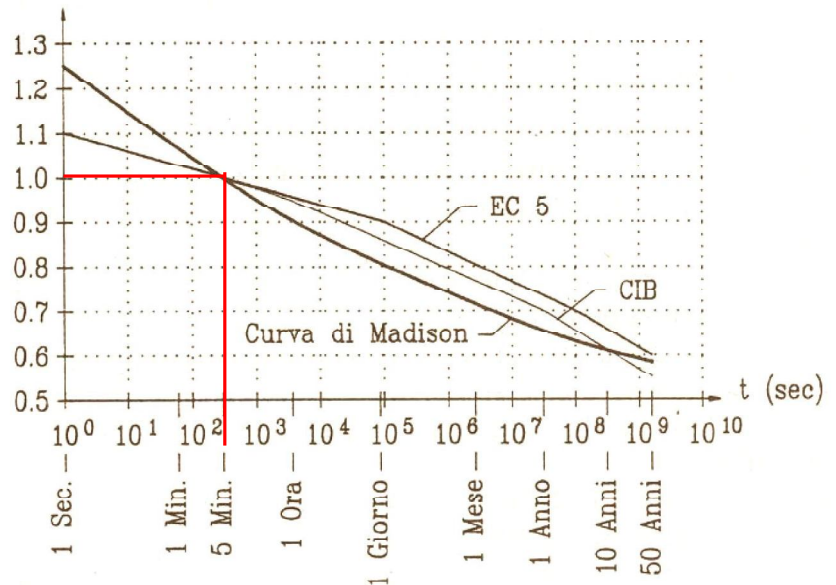


### 5.5.6. Il coefficiente $K_{mod}$

Da quanto detto in precedenza, le proprietà meccaniche del legno sono definite sulla base di prove sperimentali della durata di circa 5 minuti; se la prova viene condotta più lentamente, la rottura viene raggiunta per un valore del carico inferiore: il legno infatti inizia a danneggiarsi irreversibilmente già per valori del carico prossimi al 60% della resistenza a 5 min.

Il diagramma riporta l'andamento della resistenza **nel tempo** (adimensionalizzata rispetto al valore di resistenza della prova sperimentale a 5 min); si osserva che carichi superiori al 60% del valore del test, porterà nel tempo al collasso della struttura.

Viceversa per un carico istantaneo si ha un incremento di resistenza pari al 10%.



Nelle verifiche di resistenza è quindi necessario tenere conto della effettiva durata del carico che agisce sulla membratura in questione (classe di durata del carico).

Inoltre, siccome la resistenza del materiale varia al variare dell'umidità del materiale è necessario tener conto anche della classe di servizio della struttura.

Si introduce quindi un coefficiente correttivo  $k_{mod}$  che va a moltiplicare i valori di resistenza caratteristici ricavati da prove della durata di 5 min ed espresso in funzione della durata del carico e della classe di servizio (umidità).

**Se una combinazione di carico comprende azioni appartenenti a differenti classi di durata del carico si dovrà scegliere un valore di  $k_{mod}$  che corrisponde alla azione di minor durata.**

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_m}$$

dove:

$X_k$  è il valore caratteristico della proprietà del materiale;

$k_{mod}$  è il coeff. di correzione che tiene conto dell'effetto, sui parametri di resistenza, sia della durata del carico sia dell'umidità della struttura;

$\gamma_m$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale

I valori del  $k_{mod}$  sono riportati nella seguente tabella: ([NTC 2008 / EC5 / CNR-DT206/2007](#))

Materiale	Riferimento		Classe di servizio	Classe di durata del carico				
				Permanente	Lunga	Media	Breve	Istantanea
Legno massiccio Legno lamellare incollato	EN 14081-1 EN 14080		1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
			2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
			3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Compensato	EN 636	Parti 1, 2, 3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
		Parti 2, 3	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
		Parte 3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Pannello di scaglie orientate (OSB)	EN 300	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,00
		OSB/3 - OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,00
			2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Pannello di particelle (truciolare)	EN 312	Parti 4, 5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,00
		Parte 5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
		Parti 6, 7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,00
		Parte 7	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Pannello di fibre, alta densità	EN 622-2	HB.LA, HB.HLA 1 o 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,00
		HB.HLA 1 o 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Pannello di fibre, media densità (MDF)	EN 622-3	MBH.LA1 o 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
		MBH.HLS1 o 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
	EN 622-5		MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80
		2		-	-	-	0,45	0,80
		MDF.HLS	2	-	-	-	0,45	0,80

### 5.5.7. Il valore della resistenza di calcolo

Il valore di calcolo della proprietà del materiale viene ricavato con la relazione:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_m}$$

dove:

- $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà del materiale;  
 $k_{mod}$  è il coeff. di correzione che tiene conto dell'effetto, sui parametri di resistenza, sia della durata del carico sia dell'umidità della struttura;  
 $\gamma_m$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale

D.M. 14/01/2008 -  
NTC2008

Stati limite ultimi	$\gamma_M$
<b>- combinazioni fondamentali</b>	
legno massiccio	1,50
legno lamellare incollato	1,45
pannelli di particelle o di fibre	1,50
compensato, pannelli di scaglie orientate	1,40
unioni	1,50
<b>- combinazioni eccezionali</b>	1,00

Di seguito sono riportati i coefficienti  $\gamma_m$  secondo l'EC 5-2005 e la CNR-DT206/2007

## EC5 – 2005

Fundamental combinations:	
Solid timber	1,3
Glued laminated timber	1,25
LVL, plywood, OSB,	1,2
Particleboards	1,3
Fibreboards, hard	1,3
Fibreboards, medium	1,3
Fibreboards, MDF	1,3
Fibreboards, soft	1,3
Connections	1,3
Punched metal plate fasteners	1,25
Accidental combinations	1,0

## CNR-DT206/2007

Stati limite ultimi	$\gamma_m$
- combinazioni fondamentali	
legno massiccio	1,30
legno lamellare incollato	1,25
pannelli di particelle o di fibre	1,30
LVL, compensato, OSB	1,20
unioni	1,30
- combinazioni eccezionali	1,00
<b>Stati limite di esercizio</b>	1,00

### 5.5.8. Il coefficiente $K_{def}$

Il calcolo della freccia di una struttura inflessa deve tenere in considerazione sia la deformazione istantanea sia quella viscosa (deformazione a lungo termine).

Le normative, per semplificare, contemplano i tre fenomeni legati alla viscosità e all'umidità

- viscosità a umidità costante o creep,
- deformabilità al variazione dell'umidità o viscosità meccanico-sorbitiva
- variazione del modulo elastico

tramite un unico coefficiente  $k_{def}$ , che rappresenta il rapporto fra la deformazione viscosa e quella istantanea iniziale:

$$u_{fin} = u_{ist} + u_{dif}$$

$$u_{dif} = u_{ist}' \cdot k_{def}$$

Dove:

- $u_{ist}$  è la freccia elastica istantanea nella combinazione di carico rara;
- $u_{dif}$  è la freccia dovuta alla deformazione viscosa;
- $u_{ist}'$  è la freccia elastica istantanea nella comb. di carico quasi permanente.

Secondo il D.M. 14/01/2008 - NTC2008 (coerente con EC5 e CNR-DT206/2007) si ha

Materiale	Riferimento	Classe di servizio			
		1	2	3	
Legno massiccio	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00	
Legno lamellare incollato	EN 14080	0,60	0,80	2,00	
Compensato	EN 636	Parte 1	0,80	-	-
		Parte 2	0,80	1,00	-
		Parte 3	0,80	1,00	2,50
Pannelli di scaglie orientate (OSB)	EN 300	OSB/2	2,25	-	-
		OSB/3 OSB/4	1,50	2,25	-
Pannello di particelle (truciolare)	EN 312	Parte 4	2,25	-	-
		Parte 5	2,25	3,00	-
		Parte 6	1,50	-	-
		Parte 7	1,50	2,25	-
Pannelli di fibre, alta densità	EN 622-2	HB.LA	2,25	-	-
		HB.HLA1, HB.HLA2	2,25	3,00	-
Pannelli di fibre, media densità (MDF)	EN 622-3	MBH.LA1, MBH.LA2	3,00	-	-
		MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00	4,00	-
	EN 622-5	MDF.LA	2,25	-	-
		MDF.HLS	2,25	3,00	-

Per legno massiccio posto in opera con umidità prossima al punto di saturazione, e che possa essere soggetto a essiccazione sotto carico, il valore di  $k_{def}$  dovrà, in assenza di idonei provvedimenti, essere aumentato a seguito di opportune valutazioni, sommando ai termini della tabella un valore comunque non inferiore a 2,0.