

CARATTERISTICHE FISICHE DEL LEGNO

MASSA VOLUMICA

Si definisce massa volumica ρ la massa dell'unità di volume:

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

con: m massa del provino, in kg
 V volume del provino, in m^3

Spesso vengono usati anche il g/cm^3 ed il kg/dm^3 ; l'equivalenza tra le varie unità di misura è esprimibile tramite la relazione:

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \equiv 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \equiv 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Nel gergo comune si incontrano altri termini, con significati più o meno analoghi, che possono causare confusione:

- *densità*: (ingl.: "density") può essere considerato come sinonimo;
- *peso volumico*: (ingl.: "weight density") è il peso ($F = m \cdot G$) per unità di volume;
- *densità relativa*: (ingl.: "relative density") è il rapporto adimensionale fra la massa di un corpo e la massa di un eguale volume di acqua distillata a 4°C ; il suo valore è numericamente identico a quello della massa volumica se quest'ultimo viene espresso in g/cm^3 , visto che l'acqua a 4°C ha massa volumica esattamente uguale ad $1\text{g}/\text{cm}^3$.
- *peso specifico assoluto*: sinonimo di peso volumico;
- *peso specifico (relativo)*: sta alla densità relativa come il peso volumico sta alla massa volumica (si misura la forza-peso invece che la massa).

Per "volume del legno" intendiamo il volume geometrico (cioè quello apparente).

Se invece consideriamo soltanto la sostanza legnosa, ovvero il volume effettivo delle pareti cellulari, si può determinare la *massa volumica media della parete cellulare* ρ_p che (allo stato anidro) ha valore all'incirca costante indipendentemente dalla specie legnosa:

$$\rho_p = 1530 \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

Appare chiaro quindi che, ad umidità costante, la massa volumica del legno è funzione della percentuale di vuoti al suo interno riferita al volume geometrico del pezzo, ovvero alla cosiddetta *porosità* z del legno, definita come il rapporto percentuale tra il volume delle cavità presenti in un provino ($V_{cavità}$) ed il volume geometrico del provino stesso V :

$$z = \frac{V_{cavità}}{V} \cdot 100 \quad [\%]$$

essa si calcola con la formula:

$$z_0 = \left(1 - \frac{r_0}{1530}\right) \cdot 100 \quad [\%]$$

Il legno più leggero è quello di *Balsa* (*Ochroma lagopus* Sw.), con massa volumica allo stato anidro che può raggiungere valori minimi pari a $r_0 \approx 50 \text{ kg/m}^3$ e porosità $z \approx 96,7 \%$, mentre il legno più denso è probabilmente il *Guaiaco* (*Guaiacum officinale* L.) che, allo stato anidro, può arrivare anche a $r_0 \approx 1350 \text{ kg/m}^3$, con porosità $z \approx 11,8\%$.

Non ha senso parlare di massa volumica di un legno se non si precisa a quale umidità essa viene riferita

La massa di un provino cresce proporzionalmente all'umidità; quest'ultima tuttavia può aumentare fintanto che il legno non è completamente imbibito. Invece il volume del provino cresce fino al raggiungimento dell'umidità corrispondente al punto di saturazione delle pareti cellulari, per poi rimanere costante indipendentemente dall'ulteriore acqua penetrata nel legno.

Per ciascuno dei valori notevoli di umidità viene dunque definita una corrispondente massa volumica:

- *massa volumica allo stato fresco* $\rho_f = m_f / V_f$: importante ad es. per il trasporto o quando il legno deve essere fluitato: se $\rho_f \geq 1000 \text{ kg/m}^3$ il legno tende ad affondare;
- *massa volumica ad umidità normale* $\rho_{12} = m_{12} / V_{12}$: è la condizione di riferimento utilizzata nelle tabelle che riassumono le caratteristiche di densità dei vari legni, in modo da renderli confrontabili tra loro;
- *massa volumica allo stato anidro* $\rho_0 = m_0 / V_0$
- *massa volumica ad umidità commerciale* $\rho_{15} = m_{15} / V_{15}$

Si definisce invece **densità basale** quel particolare valore di massa volumica che si ottiene calcolando il rapporto tra la massa allo stato anidro ed il volume allo stato fresco di un dato pezzo di legno. Ovvero:

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_f} \quad [\text{kg/m}^3]$$

I vantaggi della densità basale risiedono nella facile e precisa determinazione sia del volume che della massa ed inoltre nella sua minore variabilità nel tronco rispetto agli altri valori notevoli di massa volumica.

Gli americani utilizzano comunemente la "specific gravity", che è il rapporto tra la massa anidra (oven-dry) ed il volume al 12% circa: tale riferimento è comodo da misurare ed il valore così espresso è intermedio tra i nostri riferimenti ρ_{12} e ρ_b .

Per uno stesso provino di legno i valori notevoli di massa volumica si possono disporre nel seguente ordine crescente:

$$r_b < r_0 < r_{12} < r_{15} < r_f < r_{u_{max}} < 1530 \text{ kg/m}^3$$

Anche prescindendo dal fattore umidità, la variabilità della massa volumica all'interno di una stessa specie legnosa resta elevata.

Tra i fattori che la influenzano vi sono:

1) all'interno di uno stesso tronco:

- la proporzione fra legno primaticcio e legno tardivo
- l'ampiezza degli anelli di accrescimento
- la presenza di estrattivi
- la posizione all'interno del tronco: il legno alla base del fusto di norma è più denso di quello verso il cimale ed il legno della parte interna è più denso di quello della parte periferica del tronco
- la presenza di legno di reazione o di legno giovanile sia a causa del diverso spessore della parete cellulare, sia per le variazioni nelle percentuali di cellulosa (densità relativa = 1,528) e di lignina (densità relativa = 1,335).

2) tra piante della stessa specie:

- la provenienza geografica: con i relativi fattori climatici, stagionali, ereditari ecc.
- la stazione: con i relativi fattori ambientali quali la fertilità del suolo, il regime pluviometrico, l'esposizione ecc..
- la posizione sociale dell'albero all'interno del popolamento, con tutte le implicazioni di carattere selvicolturale ed assestamentale che ciò comporta (forme di governo e di trattamento, cure colturali ecc.).

Considerando, a titolo di esempio, tre importanti specie legnose italiane si riscontrano i seguenti intervalli tipici di densità del legno:

Massa volumica (valori indicativi)			
[kg/m ³]			
	Abete bianco	Rovere	Pioppo ibrido
r_b	300÷400	600÷700	280÷300
r_{12}	310÷610	740	330
r_{15}	440	760	360
r_f	650÷1200	700÷1200	760-850

Metodi per la determinazione della massa volumica

Variano a seconda del tipo di provino:

- a) *provini prismatici*
- b) *provini piatti a sezione principale irregolare*
- c) *provini di forma qualsiasi*
 - *metodo dello xilometro*
 - *metodo della spinta di Archimede*
- d) *barrette lunghe e sottili*

PROPRIETA' MECCANICHE DEL LEGNO

Le proprietà meccaniche del legno esprimono la capacità di quest'ultimo di reagire alle sollecitazioni applicate (forze o coppie).

Si riconoscono due aspetti diversi (anche se tra loro collegati):

- la **deformabilità** del legno sotto l'azione di una forza applicata che è espressa in termini di moduli di elasticità e di coefficienti di scorrimento
- la **capacità portante** alle varie condizioni di carico (ad es. compressione, flessione, taglio ecc.; carichi di breve, media o lunga durata) che viene espressa in termini di resistenze (sollecitazioni che il legno può sopportare prima di rompersi).

Il principio fondamentale è che il legno è *anisotropo* nei confronti di tutte le proprietà meccaniche, che quindi variano con la direzione anatomica considerata.

Inoltre non è lecito attribuire ad un materiale *non omogeneo* quale il legno caratteristiche costanti o quasi; pertanto i valori di resistenza forniti devono essere intesi come "dati medi" largamente indicativi.

Un ulteriore punto da sottolineare è che le proprietà meccaniche di uno stesso provino di legno variano in funzione della temperatura e soprattutto della sua umidità, mentre provini diversi di uno stesso campione avranno proprietà meccaniche molto diverse tra loro in funzione soprattutto della difettosità e della massa volumica.

Infine sono importanti anche le variazioni di deformazione e di resistenza legate alla durata delle sollecitazioni applicate o delle deformazioni imposte, che inseriscono il legno nel novero dei materiali a comportamento **visco-elastico**.

Concetti di sollecitazione e tensione

Si definisce *forza* "qualsiasi azione su un corpo dotato di massa che tenda ad alterarne lo stato iniziale". L'unità di misura della forza è il Newton (N), equivalente a 0,102 kp (chilogrammi-peso).

In un corpo in quiete soggetto a sollecitazioni esterne, si instaurano i seguenti equilibri:

$$\text{sollecitazioni esterne (azioni+reazioni)} \Leftrightarrow \text{deformazioni} \Leftrightarrow \text{tensioni interne}$$

In statica si definisce *tensione* "la forza che si trasmette attraverso una superficie unitaria". Dimensionalmente le tensioni sono assimilabili alle pressioni, per cui vengono espresse in N/m², unità di misura che prende il nome di Pascal (Pa).

Dato però che le tensioni in un materiale come il legno possono assumere valori elevati, si utilizza in pratica il Megapascal (MPa), pari a 10⁶ Pa e cioè ad 1 N/mm² (circa uguale a 10 kg/cm²):

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MN/m}^2 \cong 10 \text{ kp/cm}^2$$

Esistono fondamentalmente due tipi di tensioni:

- le *tensioni normali*, indicate generalmente con la lettera greca σ ("sigma"), orientate perpendicolarmente all'elemento di superficie considerato;
- le *tensioni tangenziali*, indicate generalmente con la lettera greca τ ("tau"), orientate parallelamente all'elemento di superficie considerato.

Le σ possono essere di trazione oppure di compressione; in una trave esse possono essere generate sia da sollecitazioni di trazione o di compressione longitudinale (ed in tali casi si possono considerare costanti in tutta la sezione), sia da sollecitazioni di flessione (ed in tal caso sono distribuite in modo più complesso).

Le τ possono essere provocate da sollecitazioni di taglio oppure torsione e tendono a spostare il materiale in direzioni opposte, con l'elemento di superficie considerato che rappresenta il piano di scorrimento relativo.

Quando si vuole caratterizzare un materiale, cioè determinarne sperimentalmente le caratteristiche meccaniche, lo si sottopone a sollecitazioni accuratamente misurabili, e tali da determinare tensioni quanto più possibili semplici e calcolabili con buona precisione.

Diagramma tensioni-deformazioni per il legno

Per studiare quanto e come il legno si deforma sotto carico, si può esaminare un caso semplice quale ad es. quello della compressione assiale, realizzata in laboratorio mediante una macchina prova materiali.

Un provino di legno netto (cioè privo di difetti) a forma di parallelepipedo, con base rettangolare di lati a e b , ed altezza (lunghezza) l , avente la fibratura parallela alla lunghezza viene collocato in piedi tra due piatti di acciaio. Di questi uno è fisso (incudine) e l'altro è mobile (testa) e solidale allo stelo di un pistone oleodinamico, a sua volta collegato ad una pompa. L'apparato di prova è completato da un appoggio di contrasto per la base del pistone, da un sistema di rilevamento della forza esercitata dal pistone (ad es. un dinamometro elettronico interposto tra testa e pistone, od altro) e da un sistema di misurazione della lunghezza del provino (ad es. un comparatore al millesimo di millimetro piazzato tra due riferimenti individuati sul provino in modo da essere allineati in direzione perfettamente longitudinale, od altro).

L'olio messo in pressione dalla pompa spinge il pistone, il quale a sua volta comincia a comprimere il provino di legno.

In conseguenza del carico, il provino si deforma accorciandosi.

Per ogni valore di carico raggiunto, si possono definire allora due grandezze correlate alla deformazione subita dal provino :

- *l'accorciamento assoluto* Δl subito dal provino, espresso in mm;
- *l'accorciamento relativo* ϵ ("epsilon") che è una grandezza adimensionale definita dal rapporto tra l'accorciamento assoluto Δl e la lunghezza iniziale l del provino:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

ε esprime, in altri termini, la deformazione per unità di lunghezza iniziale.

Per ogni valore di carico P è anche possibile il calcolo immediato della tensione di compressione σ_c la quale, uniformemente distribuita sulla sezione del provino, fa equilibrio alla sollecitazione esterna; dalla definizione si ha infatti:

$$s_c = \frac{P}{A} = \frac{P}{a \cdot b} \quad [N / mm^2]$$

così ad es. se il provino ha dimensioni:

$$a = b = 20 \text{ mm}, \quad l = 40 \text{ mm}$$

ed il carico gravante su di esso è $P = 1500 \text{ N}$

la tensione di compressione sarà: $s_c = \frac{P}{A} = \frac{P}{a \cdot b} = \frac{1500}{20 \cdot 20} = 3,75 \text{ N/mm}^2$ (o Mpa),

equivalenti a circa $37,5 \text{ kp/cm}^2$ (esattamente $38,2 \text{ kp/cm}^2$).

Riportando su un diagramma cartesiano ortogonale le coppie di valori ε e σ_c corrispondenti a diversi valori del carico P applicato, si ottiene il cosiddetto *diagramma tensioni-deformazioni*.

La curva parte dall'origine degli assi e nel primo tratto OA è rettilinea, il che indica una proporzionalità diretta tra tensione e deformazione del provino. In questo tratto vale la cosiddetta *legge di Hooke*, che nel nostro semplice esempio unidimensionale può essere scritta come:

$$s = E \cdot e$$

La costante di proporzionalità E è un'importante caratteristica del materiale e prende il nome di *modulo di elasticità o modulo di Young* (nella letteratura anglosassone si trova spesso la sigla *MOE*, acronimo di "**m**odulus of **e**lasticity").

Geometricamente esprime la pendenza (cioè il coefficiente angolare) del tratto rettilineo della curva tensioni-deformazioni.

L'interpretazione intuitiva del modulo di elasticità è semplice: quanto più E è elevato, tanto più la retta iniziale si avvicinerà alla verticale e tanto più rigido sarà il legno (per ottenere la stessa deformazione relativa occorrerà sollecitare il provino con una forza maggiore).

Dalla relazione precedente si ha:

$$E = \frac{S}{e}$$

Da cui si evince che E ha le stesse dimensioni di una tensione, e quindi viene anch'esso espresso in N/mm².

Il punto A sulla curva individua il cosiddetto *limite di proporzionalità* del legno.

All'aumentare della tensione di compressione, la curva abbandona l'andamento lineare per assumere quello di una curva in cui l'andamento della deformazione è più che proporzionale all'incremento della tensione. La legge di Hooke in questo secondo tratto non vale più ed un aumento della compressione comincia a causare deformazioni permanenti nel provino: siamo dunque entrati in regime di plasticità.

Oltre il *limite di plasticità*, il comportamento del materiale diventa praticamente imprevedibile, e si giunge (dopo un'eventuale breve fase analoga allo "snervamento" dei metalli, che però nel legno non è tipica) al *limite di rottura*, oltre il quale il legno cede e la forza applicata diminuisce rapidamente mentre la deformazione continua ad aumentare fino all'interruzione della prova.

La tensione corrispondente al limite di rottura prende il nome di resistenza del legno (ingl.: "*strength*") a quel determinato tipo di sollecitazione: nel presente esempio si tratta di resistenza a compressione assiale, ma a seconda dei casi si parlerà di resistenza a trazione, resistenza a flessione ecc.

Macchine di prova

Lo studio delle caratteristiche meccaniche del legno richiede prove in cui pezzi opportunamente sagomati (detti provini) vengono sottoposte a sollecitazioni orientate secondo le singole direzioni anatomiche principali.

A seconda dello scopo che si vuole raggiungere, le prove possono essere condotte su provini di tipo nettamente diverso:

- su *provini piccoli e netti*, accuratamente realizzati e selezionati in modo che presentino la fibratura il più possibile diritta, siano esenti da legno anomalo ecc., quando è richiesta la *caratterizzazione del materiale* prodotto da una determinata specie legnosa (eventualmente anche in funzione delle diverse provenienze, trattamenti selvicolturali ecc.), senza includere la variabilità indotta dai difetti e senza prefigurare una sua destinazione d'uso specifica;
- su *provini in dimensione d'uso*, campionati all'interno di una popolazione statistica definita in base alla destinazione finale del materiale (popolazione che quindi non è necessariamente limitata ad una sola specie legnosa, bensì può comprendere l'insieme dei segati appartenenti a più specie, di data provenienza, classificati in base ad opportune regole), contenenti pertanto tutti i difetti caratteristici di quella stessa popolazione, quando è richiesta la determinazione della *qualità del materiale*, ovvero della sua conformità ad una normativa di riferimento predeterminata.

Le macchine dedicate alle prove sul legno vengono comunemente denominate "*macchine di prova universali*", in quanto ciascuna di esse è generalmente in grado, opportunamente attrezzata, di effettuare tutte le principali prove (compressione, trazione, flessione, taglio e durezza nelle diverse direzioni anatomiche) sfruttando una sola direzione di applicazione della forza (quindi una sola testa mobile). La versatilità di questo tipo di macchine ha raggiunto livelli considerevoli, avendo a disposizione fondo-scala diversi per le diverse prove (a cui corrispondono ovviamente risoluzioni inversamente proporzionali) e, nei modelli più recenti, la possibilità di impostare sofisticati cicli di carico e scarico controllando elettronicamente la velocità di spostamento della testa del pistone, oppure la velocità di incremento del carico e registrando nella memoria di un elaboratore elettronico tutti i parametri della prova, il diagramma carico-deformazione ecc. Soltanto l'esecuzione di alcune prove, quali ad es. la torsione e la resilienza (rottura dinamica o urto), richiedono macchine particolari.

Metodi di prova, resistenze

Per determinare sperimentalmente le caratteristiche fisico-meccaniche del legno e dei prodotti derivati (ad es. pannelli), occorre definire chiaramente non soltanto le proprietà in questione, ma anche i relativi metodi di prova; questi comprendono sia la forma, la dimensione e l'orientamento (quest'ultimo rispetto alle direzioni anatomiche) dei provini, sia le procedure da seguire per l'esecuzione delle prove (es. la velocità e la durata delle varie fasi della prova), sia le attrezzature necessarie, sia le modalità di calcolo dei risultati.

Tutto questo serve a garantire, nei limiti del possibile, l'obiettività e la riproducibilità dei risultati, rendendoli ragionevolmente indipendenti dall'operatore e dal luogo dove le prove vengono svolte.

Per il legno riveste particolare importanza l'influenza della sua umidità, cosicché a livello internazionale è stato concordato di riferire le caratteristiche del legno a ben precisi valori di umidità (in genere all' umidità normale del 12%).

Essenziale importanza riveste anche il **campionamento** del materiale da sottoporre a prova: se lo scopo è quello di ottenere valori rappresentativi della variabilità naturale di una determinata specie legnosa o provenienza, occorrerà prelevare il materiale seguendo particolari procedure che garantiscono l'affidabilità statistica dei risultati. Tali procedure si riferiscono in particolare modo alla numerosità del campione, alle modalità di estrazione degli assortimenti da cui i provini verranno tagliati ed infine alla posizione del provino all'interno del pezzo.

Rottura a compressione assiale

La resistenza (o tensione di rottura) a compressione assiale viene definita come il rapporto fra il carico ultimo e l'area della sezione trasversale.

Le modalità di rottura dei provini (di legno netto e stagionato) sottoposti a compressione assiale, sono sostanzialmente due:

- il legno cede con una sorta di scivolamento secondo piani inclinati di circa 60° rispetto alla direzione longitudinale, in corrispondenza dei quali le cellule del

legno evidenziano una doppia piegatura; questo scivolamento può avvenire secondo uno o più piani e la rottura può assumere aspetti diversi ed essere accompagnata o meno da fessurazioni longitudinali; in ogni caso, lo scivolamento tende ad avvenire in direzione tangente agli anelli di accrescimento;

- il provino non manifesta rotture evidenti, ma esaminando attentamente si potrà notare una sorta di sfrangiatura sul perimetro di una delle due testate; anche questa modalità di rottura deriva dal ripiegamento per instabilità laterale ad alcuni fasci di cellule.

Un'elevata resistenza a compressione assiale è utile negli elementi presso-inflessi (colonne, controventature) e negli appoggi degli imballaggi (pallets, casse).

Rottura a compressione trasversale

In questo caso all'aumentare del carico F non si arriva mai ad un limite netto di rottura, poiché il legno si schiaccia quasi subito e cede in modo progressivo, ripiegandosi quasi a fisarmonica su se stesso. Pertanto viene definita una resistenza limite convenzionale (detta anche resistenza al limite di proporzionalità) che viene determinata in base alla variazione di forma della curva carico-deformazione.

Un'elevata resistenza a compressione trasversale è utile agli appoggi trave-colonna e alle tavole nei pallets.

Rottura a trazione

Le prove a trazione assiale ed a trazione trasversale non presentano aspetti teorici sostanzialmente differenti da quelli a compressione: si inverte soltanto il segno della sollecitazione.

I provini per la prova di resistenza a trazione hanno forma molto diversa a seconda che si voglia procedere a determinare la resistenza assiale oppure quella trasversale.

Una buona resistenza a trazione è importantissima per le catene delle capriate.

Rottura a flessione

La sollecitazione di flessione può essere indotta ad esempio applicando uno o più carichi verticali su una trave appoggiata agli estremi o incastrata ad una sola estremità.

Essa è sempre associata ad una deformazione curvilinea del provino, ove si può senz'altro dire che dalla parte concava si è verificato un accorciamento del corpo, mentre dalla parte della convessità esso si è allungato.

Tenuto conto che la flessione può essere sempre ricondotta ad un'opportuna combinazione di sollecitazioni di trazione e compressione, nel legno privo di difetti sottoposto a flessione statica, è il lembo compresso a cedere per primo, ma la rottura visibile e decisiva avviene con inizio dal lato teso.

Orientativamente, il limite di proporzionalità è all'incirca pari al 25% del limite di rottura, mentre il limite di elasticità è pari a circa il 50% del limite di rottura.

La resistenza a flessione è importante, in generale, dove il rapporto luce libera/spessore del pezzo è elevato.

Rottura a flessione dinamica

La prova ad urto trasversale o flessione dinamica tende a determinare il lavoro necessario alla rottura di un provino mediante una speciale macchina fornita di un pesante martello a pendolo, chiamata "pendolo di Charpy".

La resistenza a questo tipo di sollecitazione è importante, soprattutto, per i pezzi sottoposti ad urti come le tavole sul fondo di un camion.

Rottura a taglio

La spiccata anisotropia del legno fa sì che in tale materiale le rotture per taglio possano avvenire soltanto secondo superfici parallele alla fibratura (*taglio longitudinale*): sottoponendo un provino a sollecitazioni di *taglio trasversale*, esso si deforma vistosamente per compressione trasversale e non si rompe a taglio.

La resistenza a questo tipo di sollecitazione assume particolare importanza per:

- i pannelli di legno compensato in cui possono sorgere sollecitazioni, dette di "scorrimento trasversale", ove una sorta di rotolamento delle fibre del legno (le une sulle altre) può portare alla rottura;
- le travi che presentano cipollature, o intrinseca debolezza a taglio del legno (ad es. in presenza di grossi raggi parenchimatici), quindi suscettibili a rottura per taglio longitudinale;
- gli elementi dove il rapporto fra luce libera/spessore è basso ed i carichi sono elevati.

Cedimento per carico di punta

Quando si comprime assialmente un elemento strutturale avente forma prismatica molto snella ed allungata (in pratica quando il rapporto fra la lunghezza assiale l e la minima dimensione trasversale d è maggiore di 11), anche se la sollecitazione viene mantenuta perfettamente centrata rispetto alla sezione trasversale, in corrispondenza di un certo carico critico l'elemento si inflette e si rompe ben prima che sia stato raggiunto il limite di rottura a compressione assiale del materiale.

Questo tipo di comportamento riveste un notevole interesse poiché è tipico di molti elementi strutturali tradizionali, quali i puntoni di una capriata, i pilastri di un edificio ecc.

Rottura per spacco (fissilità)

La *fissilità* del legno esprime la tendenza del legno a spaccarsi in seguito all'azione di un cuneo spinto nel materiale in direzione assiale. La lavorazione a spacco viene utilizzata per ottenere legna da ardere, doghe per botti ecc. La fissilità è legata alla presenza di una struttura cellulare ben ordinata, alla rettilineità della fibratura ed all'eventuale presenza di grossi raggi midollari; ad es., legni molto fissili sono il Larice e le Querce.

Modulo di elasticità

Solitamente si preferisce determinare il modulo di elasticità del legno sfruttando la più sensibile deformazione ottenibile mediante la prova di *flessione* e derivando con un'opportuna formula il valore di E (che, in prima approssimazione, è lo stesso sia a compressione, sia a trazione, sia a flessione).

$$E = k \frac{\Delta F}{\Delta w}$$

dove ΔF è la differenza di carico tra due punti scelti nel tratto rettilineo della curva carico-deformazione, Δw è il relativo incremento della freccia di inflessione, e k è una costante che dipende dal dispositivo di prova e dalle unità di misura utilizzate.

Ai fini della determinazione di E oppure di altre costanti elastiche, al posto della prova di flessione statica è possibile ricorrere a *metodi dinamici*, in cui viene studiata la risposta del legno a sollecitazioni periodiche di piccola intensità che si propagano al suo interno seguendo particolari leggi correlate appunto con l'elasticità del materiale.

Una possibilità è quella derivante dallo studio delle *vibrazioni*, naturali oppure forzate, longitudinali oppure flessionali, che possono ottenersi da un provino eccitandolo in vario modo (ad es. mediante una percussione singola, oppure tramite un'eccitazione sinusoidale di frequenza e ampiezza predeterminate). In base alla determinazione delle frequenze di risonanza proprie del provino variamente vincolato è possibile risalire al modulo di elasticità E anche senza sottoporre il provino ad un carico statico e misurarne la freccia di inflessione conseguente.

Un'altra possibilità è offerta dallo studio del *tempo di propagazione di onde d'urto* all'interno del legno: singoli "treni" di onde a frequenza sonica o ultrasonica (in quest'ultimo caso, tipicamente comprese nell'intervallo fra 10 e 60 MHz) vengono trasmessi ad una testata del provino mediante un opportuno eccitatore (ad es. un urto ben calibrato, oppure il segnale di una sonda piezoelettrica emettitrice di impulsi ultrasonici), per essere ricevuti da un trasduttore, posto ad es. all'estremità opposta del pezzo. Misurando con precisione il tempo che intercorre tra la partenza dell'impulso ed il suo arrivo al trasduttore, si può calcolare il rapporto fra questo tempo e la lunghezza del percorso effettuato, determinando così la *velocità di propagazione* c dell'onda d'urto nel legno. Questa velocità, nel caso di barrette assiali lunghe e sottili, è legata al modulo di elasticità E da una relazione semplice del tipo:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \Rightarrow \quad E = \rho \cdot c^2$$

Questo tipo di prove sono frequentemente impiegate per la determinazione di E su elementi strutturali in opera, oppure per determinare in modo relativamente semplice

il grado di anisotropia elastica di determinate specie legnose, o ancora per identificare zone di alterazione e degradamento del legno non visibili dall'esterno (il materiale alterato presenta infatti una notevole riduzione dei valori tipici delle varie costanti elastiche).

In genere, il modulo E determinato con metodi dinamici ha valori maggiori di quello determinato con la prova di flessione statica.

Durezza (Janka, Brinell, Chalais-Meudon) e prova di impronta per pavimenti

La *durezza* (ingl.: "*hardness*") è un indice della resistenza che il legno oppone alla penetrazione da parte di un punzone di acciaio di forma appropriata. Questa definizione dipende quindi dal metodo di prova usato e rende sostanzialmente non confrontabili i risultati ottenuti con metodi di prova diversi.

La durezza è una proprietà che sintetizza in sé caratteristiche importanti per vari impieghi del legno, quali pavimentazioni, attrezzi sportivi ecc.

I metodi di prova più usati sono tre:

- *durezza Brinell*: viene espressa, in N/mm^2 , in funzione del diametro d dell'impronta lasciata nel legno da una sfera di acciaio del diametro D di 10 mm, sotto l'azione di un carico F di circa 500, 1000 oppure 2000 N (esattamente di 50, 100 oppure 200 kp, rispettivamente per legni teneri, normali e durissimi), tramite una relazione che esprime il rapporto tra forza applicata e superficie della calotta sferica dell'impronta;
- *durezza Janka*: è data dal carico necessario per far penetrare nel legno, per una profondità pari al suo raggio, una sfera di acciaio avente area diametrica pari ad 1 cm^2 (ovvero diametro pari ad 11,284 mm); viene espressa in N;
- *durezza Chalais-Meudon* (o *durezza Monnin*): detta anche "*durezza di fianco*", consiste nel trasmettere al legno, attraverso un cilindro coricato sul fianco avente raggio di 15 mm e lunghezza pari alla larghezza del provino, un carico costante di circa 1000 N (esattamente di 100 kp) per ogni cm di larghezza del provino e per la durata di 5 secondi; la durezza viene espressa in funzione della profondità t di penetrazione del cilindro, che per motivi pratici viene calcolata in base alla larghezza dell'impronta lasciata sulla superficie del provino (resa più evidente ad es. interponendo un foglio di carta carbone tra punzone e legno) mediante la relazione seguente.

La durezza Chalais-Meudon viene espressa come l'inverso della profondità di penetrazione (in modo da avere valori crescenti al crescere della durezza):

Correlate almeno in parte alla durezza sono anche altre prove che in realtà cercano di evidenziare l'idoneità di una specie legnosa a determinati impieghi finali, quali ad es. la *prova di usura con il metodo Taber* (viene misurato il consumo di legno dovuto al passaggio ripetuto di una mola rotolante unificata), la *resistenza all'impronta* (con la

cosiddetta "prova del tacco a spillo", in cui viene misurata l'impronta rimasta nel legno dopo 24 ore dal momento del rilascio di un particolare punzone -avente appunto la forma di un tacco a spillo- mantenuto premuto contro il legno con una forza e per un tempo prestabiliti), la *resistenza alla penetrazione dinamica* (in cui si misura il diametro delle impronte lasciate sul legno da una sfera di acciaio di 25 mm di diametro lasciata cadere da un'altezza di 500 mm) ecc.

Fattori che influenzano le resistenze meccaniche del legno

Per uno stesso provino; coefficienti correttivi

In un determinato provino possono essere riscontrati valori significativamente diversi delle caratteristiche meccaniche in funzione delle condizioni del materiale. In particolare i parametri essenziali sono:

- la *temperatura*: si può in generale affermare che ad un aumento di temperatura corrisponde (a parità di tutto il resto) una diminuzione di resistenza; anche la durata dell'esposizione ad una temperatura elevata (ad es. un *trattamento termico*) può sortire effetti negativi sulla resistenza del materiale: a 200 °C si ha un peggioramento delle caratteristiche meccaniche dopo pochi minuti, a causa del parziale degradamento chimico di alcuni costituenti della parete cellulare, ma già a partire da 65 °C si possono avere effetti negativi permanenti in seguito a lunghe esposizioni (ad es. cicli di essiccazione prolungati); il legno saturo d'acqua e congelato appare più resistente a flessione, ma meno duro del legno stagionato all'aria a temperatura normale;
- la *durata del carico*: se per portare a rottura un provino in 5 minuti occorre un carico uguale a 100, per portare quello stesso provino a rottura in 1 solo minuto sarà necessario un carico pari a 107, mentre per portarlo a rottura in 1 giorno basterà un carico pari a 82;

l'umidità del legno: è questo il parametro in funzione del quale si registrano le più sensibili variazioni di resistenza in uno stesso provino; in generale, le variazioni sono in diminuzione all'aumentare dell'umidità e viceversa, cosicché le massime caratteristiche meccaniche del legno (ad eccezione della resistenza) si riscontrano allo stato anidro, mentre quelle minime si rilevano allo stato fresco. In primissima approssimazione, fatta uguale a 100 la resistenza di un pezzo ad umidità normale, per lo stesso pezzo possiamo trovare una resistenza pari a 130÷190 allo stato anidro, e pari a 40÷60 allo stato fresco. Per tale motivo tutte le prove esaminate nei paragrafi precedenti, per dare risultati confrontabili, devono essere sempre effettuate su provini rigorosamente equilibrati ad umidità normale. Per venire incontro all'oggettiva difficoltà di conseguire una tale condizione, nelle norme viene prevista l'introduzione di opportuni *coefficienti di correzione* dei risultati di prova in base agli scostamenti tra l'umidità effettiva del provino e l'umidità normale di riferimento.

Per provini diversi (specie, massa volumica, difetti)

Nonostante la variabilità, dovuta all'influenza di molteplici fattori, delle caratteristiche meccaniche tra provini di legno diversi, si possono dare le seguenti indicazioni orientative di larghissima massima sull'entità delle principali proprietà per legno al 12% di umidità:

- **resistenza a compressione assiale: $25\div 95 \text{ N/mm}^2$ (ordine di grandezza: $\sim 50 \text{ N/mm}^2$);**
- **resistenza a compressione trasversale: $1\div 20 \text{ N/mm}^2$ (ordine di grandezza: $\sim 1/15$ della resistenza a compressione assiale);**
- **resistenza a trazione assiale: circa 2 volte la resistenza a compressione assiale (ordine di grandezza: $\sim 100 \text{ N/mm}^2$);**
- **resistenza a flessione statica: $55\div 160 \text{ N/mm}^2$ ovvero circa pari alla resistenza a trazione assiale (ordine di grandezza: $\sim 100 \text{ N/mm}^2$);**
- **lavoro di rottura ad urto: $4\div 6 \text{ Nm}$;**
- **modulo di elasticità: $2500\div 17000 \text{ N/mm}^2$ (ordine di grandezza: $\sim 10000 \text{ N/mm}^2$, pari a circa 10 volte il valore della resistenza a flessione e 20 volte quello della resistenza a compressione assiale).**

Questi valori indicativi variano in funzione dei seguenti fattori principali:

- la specie legnosa;
- la massa volumica: esiste una relazione quasi lineare tra la massa volumica e la resistenza (ad umidità costante, ovviamente), per cui i legni più pesanti sono anche i più resistenti; un'eccezione è costituita dalla resilienza, poiché molti legni pesanti sono anche piuttosto fragili;
- lo spessore degli anelli e la percentuale di legno tardivo;
- la presenza di difetti o alterazioni: in genere tendono a peggiorare le caratteristiche di resistenza e rigidità del provino, ma non è agevole determinarne l'influenza rispetto alle caratteristiche determinate sul legno netto; per questa ragione le moderne tecniche di classificazione del materiale strutturale rinunciano in partenza ad adottare coefficienti correttivi delle resistenze da applicare ai valori determinati su provini piccoli e netti, ed utilizzano invece dati ricavati direttamente da prove su semilavorati in dimensione d'uso;
- l'inclinazione della fibratura: l'anisotropia del legno nei confronti delle caratteristiche meccaniche (si vedano le differenze poco sopra elencate tra le

resistenze assiali e trasversali) comporta necessariamente che all'aumentare dell'inclinazione della fibratura le resistenze si abbassino sensibilmente e che anche il comportamento deformativo subisca alterazioni sensibili; nella tabella seguente sono riportate le diminuzioni della resistenza a flessione in funzione dell'angolo tra la direzione della fibratura e l'asse longitudinale del provino (da GIORDANO):

Variazione percentuale della resistenza a flessione in funzione dell'angolo di inclinazione della fibratura rispetto all'asse longitudinale del provino						
Angolo θ	0°	10°	30°	45°	60°	90°
$\frac{f_{m,0}}{f_{m,a}} \cdot 100$	100 %	87 %	51 %	14 %	7 %	6 %

Allegati:

