

1 La struttura del legno

1.1 Il legno cresce sull'albero

Gli alberi sono costituiti da tre organi fondamentali con differenti funzioni biologiche e meccaniche: le foglie, il tronco con i rami e le radici.



Funzione biologica		Funzione meccanica
	FOGLIA	
Fotosintesi: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$		Resistenza al vento; (peso proprio)
	RAMO	
Nell'alburno: trasporto di acqua e sostanze nutritive dalla radice alle foglie; nel libro: trasporto delle sostanze assimilate dalle foglie verso il basso		Esporre le foglie alla luce; sostegno
	TRONCO	
Nell'alburno: trasporto di acqua e sostanze nutritive dalla radice alle foglie; nel libro: trasporto delle sostanze assimilate dalle foglie verso il basso; immagazzinamento delle sostanze assimilate come riserva		Sostegno; correzione della direzione
	RADICE	
Assorbimento di acqua e sostanze nutritive dal terreno		Ancoraggio al suolo

Figura 1: Principali elementi costitutivi di un albero e loro funzioni

Il legno rappresenta il tessuto del tronco, dei rami e delle radici di un albero e degli arbusti. Esso viene prodotto da uno strato di forma anulare detto "cambio" (vedi Figura 4). Da esso, durante il periodo vegetativo, si differenziano nella parte interna le cellule del legno (xilema) e nella parte esterna le cellule del libro (floema), che forma la parte più interna della corteccia, la cui crescita è decisamente inferiore a quella del legno.

Il legno del tronco assume le tre funzioni di sostegno, immagazzinamento e trasporto (vedi Figura 1). L'albero può adattare molto bene le proprietà del legno alle esigenze legate a queste tre funzioni. La composizione chimica del legno rimane completamente invariata; le sue proprietà sono influenzate dal modo in cui le sostanze chimiche principali vengono assemblate a formare la struttura micro e macroscopica del legno stesso.

Fondamentalmente la struttura del legno può essere esaminata a cinque livelli (Figura 2):

- a livello della struttura del tronco;
- a livello della struttura macroscopica;
- a livello della struttura microscopica;
- a livello della struttura nanoscopica;
- a livello della struttura molecolare.

Di seguito ci si occuperà principalmente del legno a livello del tronco e a livello macroscopico, limitandoci ad alcuni cenni sugli altri livelli della struttura.

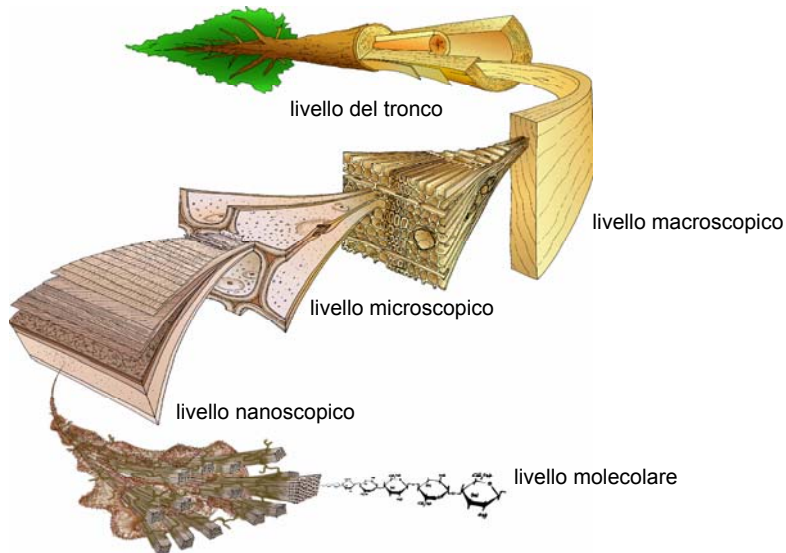


Figura 2: Rappresentazione schematica dei vari livelli a cui può essere esaminato il legno [WIMMER 2002]

Il legno può essere univocamente definito e caratterizzato soltanto considerando le tre direzioni anatomiche fondamentali, in quanto il tessuto e le cellule, che ne determinano l'aspetto, sono differenti a seconda della sezione considerata. La Figura 3 mostra le tre sezioni:

- trasversale (perpendicolare all'asse del tronco);
- radiale (piano della sezione parallelo all'asse del tronco e praticamente parallelo ai raggi midollari);
- tangenziale (piano della sezione parallelo all'asse del tronco e perpendicolare ai raggi midollari).



Figura 3: Sezioni anatomiche fondamentali

1.2 Struttura del legno a livello del tronco

1.3 Osservazione della sezione

Osservando la sezione di un tronco non scortecciato, si possono riconoscere ad occhio nudo, a seconda della specie legnosa, dall'esterno verso l'interno (Figura 4):

- la corteccia, divisibile in esterna ed interna (libro);

- il legno costituente la parte principale con l'alburno ed il durame più o meno distinguibili (legno differenziato o indifferenziato), con gli anelli di accrescimento, con i raggi midollari e gli altri tessuti rappresentati nei paragrafi 1.4 e 1.5;
- il midollo al centro.

Il cambio, che si trova tra corteccia e legno, è riconoscibile solo a livello microscopico.

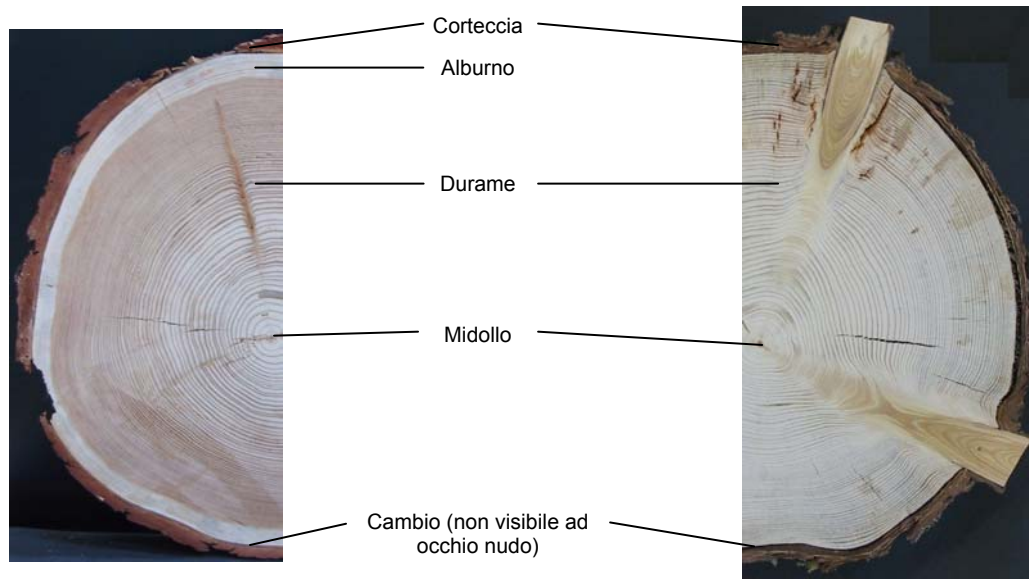


Figura 4: Sezione di un tronco di larice (sin.) e di abete rosso (des.)

1.3.1 Legno giovanile e legno maturo (adulto)

Nel suo primo anno di crescita, l'albero produce il cosiddetto "legno giovanile", che si trova nel centro del tronco immediatamente vicino al midollo. Nelle Conifere, il legno giovanile si contraddistingue da quello maturo per le seguenti caratteristiche:

- anelli di accrescimento più ampi;
- minore massa volumica;
- resistenza e rigidità da 50 a 70% inferiori.

Tra il quinto ed il ventesimo anno di crescita, le caratteristiche del legno migliorano gradualmente fino a raggiungere, all'incirca dal ventesimo anno di crescita, nel legno maturo, le "normali" proprietà del legno da noi conosciute.

Il legno nelle vicinanze del midollo presenta, pertanto, una resistenza nettamente inferiore di quello lontano da esso. Per questa ragione, nella classificazione a vista del legno secondo la resistenza, la presenza del midollo non è ammessa nella categoria S13.

1.3.2 Alburno e durame

Con l'invecchiamento dell'albero, il legno si divide in alburno e durame mediante fenomeni di duramificazione. L'alburno circonda il durame ed è, di regola, più chiaro. L'alburno è costituito da cellule vive e fisiologicamente attive; esso ha funzione conduttrice dell'acqua e di immagazzinamento. L'ampiezza dell'alburno è molto variabile. L'alburno è generalmente poco durevole ed è, quindi, meno resistente del durame alle alterazioni biologiche indotte da funghi ed insetti. Il durame si forma in tutti gli alberi. La sua formazione comincia da una ben determinata ampiezza dell'alburno. Il durame comprende le zone interne del legno. Esso è costituito da cellule morte ma assolve ancora la funzione di sostegno ed è importante per la rigidità e la stabilità dell'albero. Fondamentalmente si distingue tra:

- durame differenziato obbligatoriamente: immagazzinamento delle sostanze duramificanti nella parete cellulare (simile ad un "impregnamento" della parete cellulare) → spesso maggior resistenza agli attacchi fungini;
- durame differenziato facoltativamente: immagazzinamento delle sostanze duramificanti sulla parete cellulare → scarsa resistenza agli attacchi fungini.

Oltre alla maggiore durabilità del durame differenziato obbligatoriamente, il durame colorato (differenziato) possiede altre proprietà fisico-meccaniche diverse da quelle dell'alburno: è di regola più scuro, più secco, più pesante, più duro e spesso più difficilmente impregnabile.

1.4 Struttura del legno a livello macroscopico

Struttura, disposizione, forma e grandezza dei tessuti o degli insiemi risultanti da diversi tipi di cellule (da cui risulta l'aspetto di una specie legnosa) hanno carattere macroscopico, ovvero sono riconoscibili ad occhio nudo o per lo meno con una lente d'ingrandimento. Al contrario, la struttura delle singole cellule può essere osservata solo con un microscopio. Soltanto i vasi, che conducono la linfa greggia (acqua e ioni minerali) sono, per numerosi legni, tanto grandi da essere visibili a livello macroscopico come pori, in sezione trasversale, o come canali porosi, in sezione longitudinale (paragrafo 1.4.1).

1.4.1 Anelli di accrescimento

Gli anelli si formano in seguito all'accrescimento del fusto interrotto da periodi di stasi. Nelle aree climatiche con pause invernali nell'attività vegetativa (regioni temperato-fredde), gli anelli di accrescimento corrispondono all'accrescimento arboreo annuale. L'età "approssimativa" di un albero può essere letta, pertanto, in una sezione trasversale posta in basso; gli anelli di accrescimento forniscono anche informazioni riguardo fattori che incentivano o rallentano l'accrescimento (p. es. il clima). Negli alberi caducifogli delle regioni tropicali e subtropicali, in dipendenza dall'alternarsi delle stagioni secche e di quelle delle piogge, si formano anelli che non corrispondono più all'accrescimento annuale. Nei sempreverdi delle foreste tropicali, caratterizzati da attività vegetativa ininterrotta, l'apparizione degli anelli è quasi o del tutto assente.

Gli anelli di accrescimento diventano visibili perché si formano cellule di differente tipo e dimensione, in numero e distribuzione anch'essi differenti, all'inizio e verso la fine del periodo di attività vegetativa. Di conseguenza, si distingue all'interno di un anello tra legno primaverile (primaticcio) e legno tardivo. Mentre il legno primaverile assicura il rapido trasporto della linfa all'inizio della stagione vegetativa, al legno tardivo formatosi in estate spetta principalmente il compito del sostegno. In confronto al legno primaverile, il legno tardivo ha maggiore massa volumica e resistenza nonché maggiori valori dei parametri legati al ritiro ed al rigonfiamento. Le differenti funzioni del legno primaverile e del legno tardivo spiegano anche le evidenti differenze a livello anatomico tra zona primaverile e zona tardiva in numerose specie legnose (in particolare Conifere e Latifoglie a legno poroso).

Nelle Conifere, il legno primaverile è costituito da cellule a lume ampio e parete sottile, quello tardivo invece da cellule a lume assai più esiguo e parete più spessa (per lume si intende l'interno di un organo cavo di forma tubolare). Questa differenza nello spessore della parete cellulare porta alla differenza di colore e di durezza all'interno dell'anello caratteristica nelle Conifere: il legno primaverile è più chiaro e tenero, il legno tardivo più scuro e compatto.

Nelle Latifoglie, in base alla disposizione ed alla grandezza dei vasi nell'anello annuale, si distinguono tre gruppi principali: specie a legno poroso-zonato, specie a legno semi poroso-zonato e specie a legno poroso-diffuso. Nella Tabella 1 è fornito un prospetto dettagliato riguardo la disposizione dei pori in alcune Latifoglie. Essa rappresenta una delle più importanti caratteristiche per la definizione delle Latifoglie.

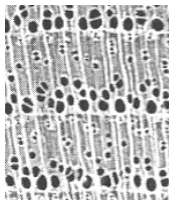
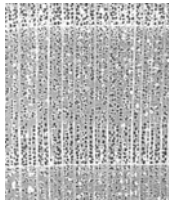
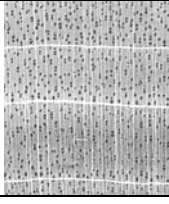
Disposizione	Legno primaverile	Legno tardivo	Illustrazione	Esempio
Legno poroso-zonato (margine dell'anello ben distinguibile)	Vasi particolarmente ampi costituenti un cerchio poroso ad una, due o più righe	Moltissimi vasi di piccole dimensioni; più o meno senza transizione nella zona primaverile		Quercia caducifoglie, Frassino, Robinia, Castagno
Legno semiporoso-zonato (margine dell'anello ancora distinguibile), transizione tra poroso-zonato a poroso-diffuso	Maggior frequenza dei vasi rispetto alla zona tardiva, diametro di regola decrescente verso la zona tardiva	Minor frequenza e, di regola, anche minor diametro dei vasi rispetto alla zona primaverile		Ciliegio, Noce, alcune specie tropicali
Legno poroso-diffuso (margine dell'anello spesso non distinguibile)	Vasi pressoché egualmente ripartiti e di diametro poco variabile			Faggio, Pioppo, Betulla, molte specie tropicali

Tabella 1: Porosità nelle Latifoglie [illustrazioni da WAGENFÜHR 1999]

La larghezza in direzione radiale dell'anello di accrescimento è indicata come ampiezza dell'anello. Essa dipende dalla specie legnosa, dal terreno, dal clima, dall'età dell'albero, da danneggiamenti biologici ed ecologici, dagli interventi dell'uomo, ecc. L'ampiezza degli anelli influenza le caratteristiche fisico-meccaniche delle Conifere e delle Latifoglie a legno poroso-zonato.

1.4.2 Raggi del legno (midollari)

I raggi midollari sono presenti in tutte le Conifere e le Latifoglie, variano però, da specie a specie, grandezza, frequenza e composizione. Essi costituiscono linee chiare, sottili raramente ampie più di 1 mm e sono orientati a raggiera dalla periferia del tronco verso il centro, come i raggi di una ruota. Solo i raggi grandi sono visibili ad occhio nudo (ad. es. nella quercia, in Figura 5, e nel faggio). Essi influenzano l'aspetto del legno e sono quindi un'importante caratteristica di determinazione. I raggi midollari servono per la conduzione radiale e l'immagazzinamento delle sostanze prodotte dall'albero, ma anche come sostegno in direzione radiale.

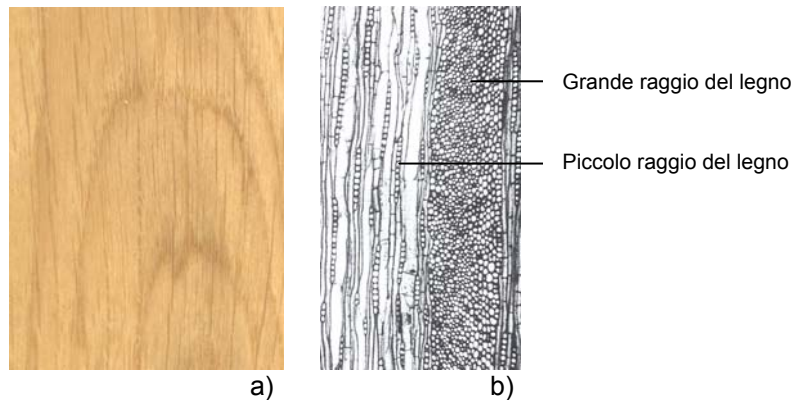


Figura 5: Sezione tangenziale di una quercia a) a livello macroscopico
b) a livello microscopico in scala 80:1
[WAGENFÜHR 1999]

Raggi midollari in due diverse grandezze:

- raggi grandi alti $6 \div 38 \div 80$ mm
- raggi piccoli alti $80 \div 160 \div 240$ μm (non visibili ad occhio nudo!)

1.4.3 Canali resiniferi

In alcune Conifere indigene, i canali resiniferi, visti in sezione trasversale, appaiono, soprattutto nel legno tardivo, come punti chiari o scuri (ad es. pino, abete rosso, larice, douglasia). Essi influenzano la lavorabilità e l'utilizzabilità del legno.

1.5 Struttura del legno a livello microscopico

Il legno è costituito da milioni di cellule di diverso tipo, grandezza, forma, numero e distribuzione. Cellule dello stesso tipo si presentano raggruppate nei cosiddetti tessuti. In relazione alle tre funzioni principali del legno (sostegno, conduzione ed immagazzinamento), i tessuti si dividono in: tessuto meccanico fondamentale o di sostegno, tessuto conduttore e tessuto parenchimatico o di riserva (vedi Tabella 2). Inoltre vi sono eventualmente anche tessuti secondari: tessuto secretore (ad es. i canali resiniferi) e tessuti anomali (ad es. lesioni, legni di reazione – vedi a riguardo paragrafo 1.8).

La maggior parte delle cellule del legno sono disposte parallelamente all'asse del tronco o meglio "in direzione della fibratura". Perpendicolarmente ad essa, ovvero orizzontalmente per un albero in piedi, vi sono numerosi aggregati nastriformi di cellule indicati come "raggi del legno" (vedi paragrafo 1.4.2).

Cellule contigue comunicano direttamente per mezzo di aperture (pori) nella due pareti terminali (apicali) che hanno funzione conduttrice della linfa (vedi Figura 6).

Tipo di tessuto	Conifere	Latifoglie
Tessuto conduttore	Tracheidi (a parete sottile)	Vasi
Tessuto di riserva	Cellule parenchimatiche	Cellule parenchimatiche
Tessuto di sostegno	Tracheidi (a parete spessa)	Fibre (fibre libriformi, fibrotracheidi)
Tessuto secretore	Cellule epiteliali	Cellule epiteliali
Tessuto anomalo ad esempio legno di reazione	Tracheidi del legno di compressione	Fibre del legno di trazione

Tabella 2: Tessuti e relative cellule costitutive nel legno di Conifere e Latifoglie

1.5.1 Struttura del legno di Conifere

Le Conifere si sono sviluppate prima delle Latifoglie; esse hanno una struttura relativamente semplice e regolare. Il tessuto del legno di Conifere è costituito da solo due tipi di cellule: le tracheidi e le cellule parenchimatiche (vedi Figura 6).

Le tracheidi longitudinali sono la forma originaria delle cellule del legno e formano il 90-95% del corpo legnoso delle Conifere. Esse sono orientate in direzione assiale, sono cellule morte e di forma a fuso. Viste in sezione trasversale, le tracheidi formano righe radiali regolari. Dalla zona primaverile a quella tardiva, il loro diametro in direzione radiale decresce mentre lo spessore delle pareti aumenta.

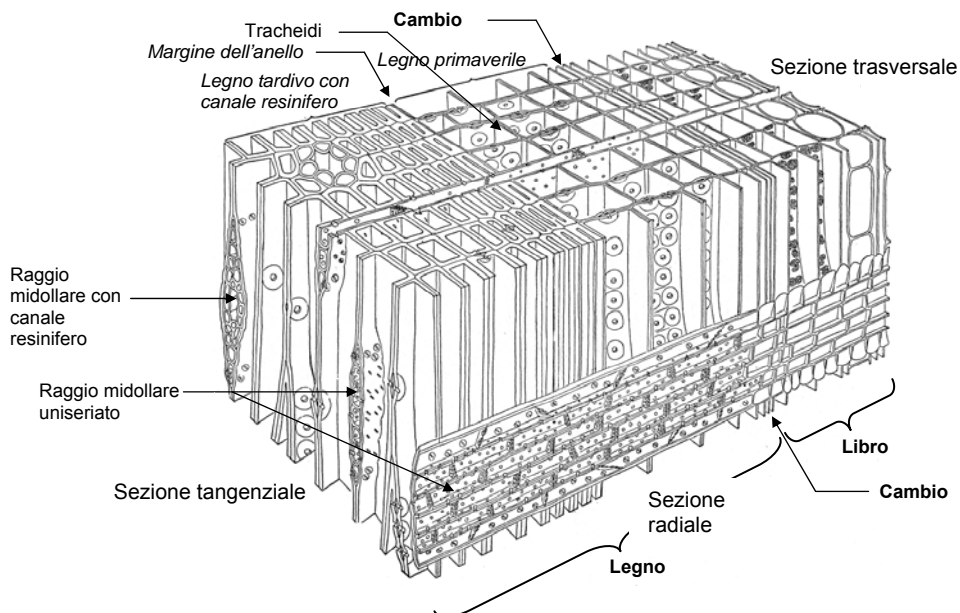


Figura 6: Particolare del corpo legnoso, del cambio e del libro nel larice [secondo MÄGDEFRAU 1951]

1.5.2 Struttura del legno di Latifoglie

Le Latifoglie, sviluppatesi più tardi, presentano in confronto alle Conifere una più complessa struttura del legno. Oltre alle tracheidi ed alle cellule parenchimatiche, si presentano altri elementi cellulari e tessuti, come ad es. i vasi e le fibre libriformi (vedi Figura 7).

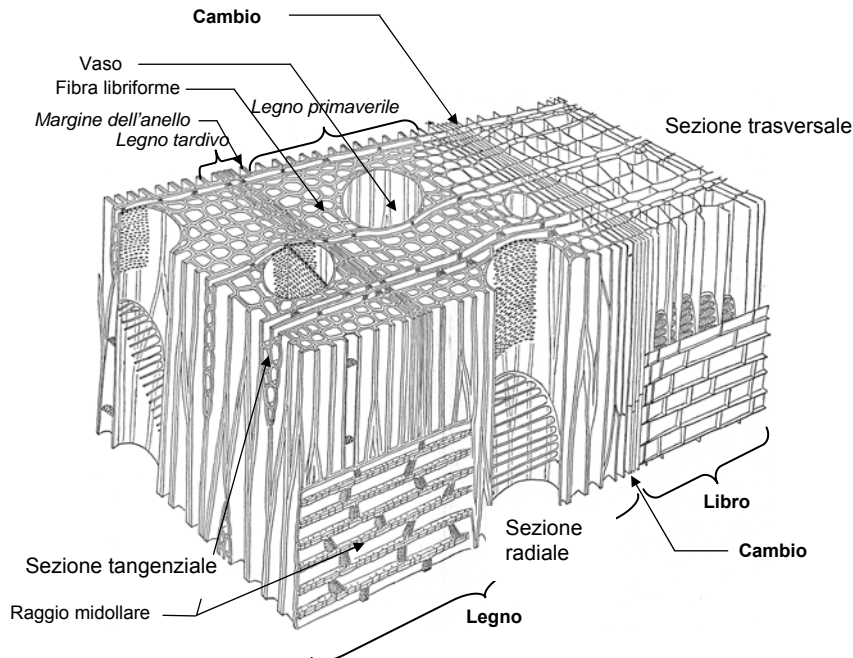


Figura 7: Particolare del corpo legnoso, del cambio e del libro nella betulla [secondo MÄGDEFRAU 1951]

1.6 Struttura del legno a livello nanoscopico

La parete cellulare è strutturata come un materiale fibroso composto. Nelle tracheidi delle Conifere (Figura 6) e nelle fibre libriformi delle Latifoglie (Figura 7), le pareti cellulari sono formate da tante lamelle di fibrille di cellulosa in una matrice di lignina che, mediante le emicellulose, costituiscono una rete a maglie e sono collegate tra loro (vedi paragrafo 1.7). Due tracheidi di Conifere, o due fibre di Latifoglie, contigue vengono collegate mediante la lamella mediana (LM) (Figura 8). Da entrambi i lati si deposita, per ogni cellula, una parete primaria (P) molto sottile. Su di essa segue la parete secondaria (S), che è costituita da tre strati (S1, S2 e S3) e rappresenta la parte più cospicua della parete cellulare. Quest'ultima, che collega due cellule, è quindi formata da un numero dispari di strati orientati. Perciò si parla di un laminato, le cui elevate potenzialità meccaniche derivano dal mutuo collaborare dei diversi strati.

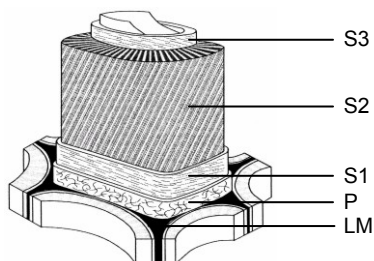


Figura 8: Modello della parete cellulare [ZIMMERMANN/SELL 1997]

1.7 Struttura del legno a livello molecolare

Il legno è costituito essenzialmente da circa 50% di carbonio (C), 44% di ossigeno (O) e 6% di idrogeno (H), da un contenuto medio di ceneri pari a 0,2-0,3% (→ sostanze minerali) e da un contenuto di azoto inferiore allo 0,1%. La composizione esatta dipende dal tipo di albero ed oscilla lievemente anche all'interno di uno stesso tronco. Le differenti proprietà del legno non sono determinate dal contenuto in percentuale degli elementi chimici ma dai differenti legami chimici e fisici degli stessi.

Il legno è un materiale composito costituito dalle sostanze a struttura macromolecolare formanti il complesso delle pareti cellulari, ovvero cellulosa, emicellulose e lignina, presenti in gran quantità, e da sostanze di natura diversa a struttura micromolecolare, presenti in ben più limitata quantità (Tabella 3).

	Costituenti Percentuale nel legno	Funzione principale
Costituenti principali	<u>Cellulosa</u> : macromolecola non ramificata a catena lunga 41-51%	Costituenti più importanti della parete cellulare Assorbimento delle forze meccaniche, soprattutto la trazione
	<u>Emicellulose</u> : macromolecola ramificata a catena corta 25-30% nelle Conifere 27-40% nelle Latifoglie	
	<u>Lignina</u> : macromolecola tridimensionale 28-41% nelle Conifere 18-25% nelle Latifoglie	Sostanza legante nella struttura primaria di cellulosa → lignificazione delle pareti cellulari, assorbimento delle forze di compressione
	<u>Pectine</u> (quasi esclusivamente nella lamella mediana): macromolecole tridimensionali 0,5% nelle Conifere 1-2% nelle Latifoglie	Sostanza legante, mantiene unite le cellule dei tessuti
Sostanze di diversa natura	A struttura micromolecolare, 1-10% nei legni delle zone temperate 2-30% nei legni tropicali	Influiscono sulle caratteristiche chimiche, biologiche e fisiche del legno, ad es. la resistenza all'esposizione solare, l'infiammabilità, la durabilità (p. es. mediante fenoli), l'odore (mediante oli eterici)

Tabella 3: Sostanze chimiche costituenti il legno

La **cellulosa**, polisaccaride composto da unità ripetute del monomero di glucosio, è il costituente caratteristico delle pareti cellulari delle piante e ne determina largamente la loro struttura. Essa forma nella parete cellulare una gerarchia di strutture fibrillari, parzialmente legate una all'altra per mezzo di una matrice omogenea costituita da pectina ed emicellulose. Si può quindi definire la cellulosa come l'ossatura della parete cellulare. Essa conferisce alle celle elevata stabilità della forma ed in particolare elevata resistenza a taglio ed a flessione.

Le **emicellulose** rappresentano, nel collegamento con la cellulosa, il "partner" facilmente deformabile, in modo che il materiale composito possa rimanere flessibile ed elastico.

Contrariamente alla cellulosa, con le sue lunghe molecole a catena, la **lignina**, amorfa e formante una rete tridimensionale, non è elastica. Non si presenta come costituente indipendente ma si deposita ("incrosta") durante la lignificazione (ultima fase della formazione della parete cellulare).

Con questo processo si riduce sensibilmente l'estensibilità delle pareti cellulari mentre rigidità e resistenza a compressione sono significativamente più elevate.

La parete cellulare è quindi un corpo misto di cellulosa resistente a trazione e lignina resistente a compressione, simile all'acciaio nel calcestruzzo di un elemento di calcestruzzo armato o alle fibre nei materiali compositi sintetici.

Le **sostanze contenute nel legno** appartengono alle più differenti categorie chimiche e sono, per tipo e quantità, caratteristiche delle rispettive specie legnose. Sebbene rappresentino solo una piccola percentuale della massa del legno, queste sostanze hanno una grande influenza sulle sue caratteristiche chimiche, biologiche e fisiche, ed un diretto effetto sulle sue caratteristiche meccaniche molto piccolo o nullo.

1.8 Legno di reazione

Il legno di reazione è un tessuto attivo (anomalo), mediante il quale l'albero modifica attivamente la sua forma. La crescita eccentrica della sezione trasversale tende a ripristinare la posizione originaria delle componenti dell'albero (tronco, rami) che hanno subito una deviazione rispetto alla posizione normale. Le finalità del legno di reazione sono:

- ripristinare la posizione originaria nei fusti inclinati;
- mantenere costante l'angolo di inserzione del ramo, caratteristico per ogni tipo.

Nelle Latifoglie, la formazione del legno di reazione avviene dalla parte superiore del tronco o del ramo (legno di trazione, non visibile, di regola, ad occhio nudo), nelle Conifere, al contrario, essa avviene dalla parte inferiore (legno di compressione o canastro, vedi Figura 9).

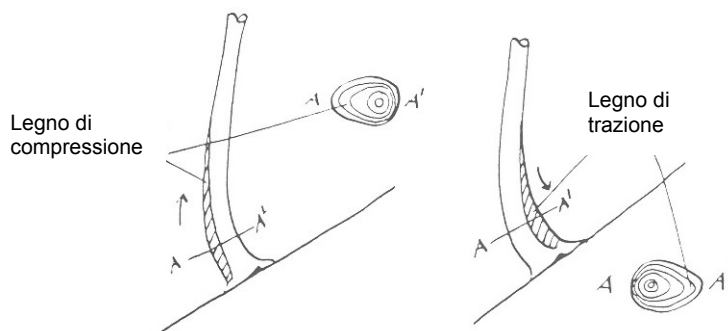


Figura 9: Formazione del legno di reazione nelle Conifere (sin.) e nelle Latifoglie (des.) in alberi cresciuti su un pendio inclinato [MATTHECK 1997]

Il legno di compressione è contraddistinto da una struttura cellulare modificata rispetto alle cellule "normali" con, in generale, pareti cellulari più spesse. Esso è riconoscibile ad occhio per una locale maggior ampiezza dell'anello di accrescimento e per il suo colore bruno.

Il legno di compressione può pregiudicare la resistenza a trazione ed a flessione del legno. Perciò, nella classificazione a vista secondo la resistenza, la presenza di legno di compressione viene limitata. A causa dell'elevatezza anormale del ritiro in direzione longitudinale, esso può causare notevoli incurvature.

2 Specie legnose per uso strutturale

2.1 Abete rosso, *Picea abies* Karst.

Caratteri macroscopici della struttura

“Durame chiaro”: alburno e durame da biancastri (giallognoli) a giallo paglierino-rossastri; con l'esposizione alla luce cambiamento in giallastro-bruno scuro

L: anelli annuali ben distinti; legno tardivo giallo-rossastro, legno primaverile biancastro; transizione prevalentemente graduale tra zona primaverile e zona tardiva; tenero, canali resiniferi poco numerosi (caratteristica essenziale che lo differenzia dall'abete bianco!)

T: le zone tardive formano venature

R: struttura rigata

Durabilità e lavorazione:

- durame poco resistente agli attacchi fungini
- alburno difficilmente impregnabile, durame da difficilmente a molto difficilmente impregnabile
- buona essiccazione
- buon incollaggio
- abbastanza resistente agli acidi deboli ed agli alcali

Impiego:

Impieghi principali:

- edilizia (come legno da costruzione, strutture di copertura, costruzioni di legno incollato, ecc.) e come materiale per costruzioni ausiliarie (casseri e ponteggi)
- finiture di interni ed esterni (mobili, pannellature, porte, finestre, scale, profilati, ecc.)
- in grandi quantità come legno per la produzione industriale di cellulosa, pasta di legno e pannelli a base legno
- il legno di abeti delle zone di montagna, con anelli di crescita molto sottili è impiegato per la produzione di strumenti musicali.



2.2 Abete bianco, *Abies alba* Mill.

Caratteri macroscopici della struttura:

“Durame chiaro”: alburno e durame di colore uguale biancastro-giallognolo (come nell'abete rosso, ma spesso con un luccichio da grigio a grigio-violetto)

L: anelli annuali ben distinti; legno tardivo giallo-roseo opaco; transizione graduale tra zona primaverile e zona tardiva; senza canali resiniferi e senza sacche di resina (caratteristica essenziale che lo differenzia dall'abete rosso!)

T: venature linguiformi

R: struttura rigata

Talvolta durame scuro e “umido” (u fino a 160%) con debole odore acidulo

Durabilità e lavorazione:

- durame poco resistente agli attacchi fungini
- alburno moderatamente impregnabile, durame da moderatamente a difficilmente impregnabile
- buona essiccazione (a causa del durame umido l'essiccazione insieme all'abete rosso può essere problematica, e/o richiedere una essiccazione successiva)
- buon incollaggio
- abbastanza resistente agli acidi ed agli alcali



Impiego:

Generalmente impiegato come l'abete rosso (spesso nessuna differenza tra abete bianco e rosso nell'utilizzo; in alcuni casi sono disponibili solo assortimenti misti);

preferibile laddove non è gradita la presenza di resina dell'abete rosso;

- legno da costruzione per finiture di interni e per costruzioni
- strumenti musicali (casse armoniche, canne d'organi)
- contenitori di sostanze chimiche
- industria della carta e della cellulosa

2.3 Pino silvestre, *Pinus sylvestris* L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame bruno-rossastro distinto nettamente dall'alburno giallo chiaro

- L: anelli annuali ben distinti;
transizione da graduale fino a piuttosto brusca tra zona primaverile e zona tardiva;
canali resiniferi nettamente riconoscibili (più grandi che nell'abete rosso e nel larice)
- T: venature decorative; i canali resiniferi appaiono come linee sottili da gialle a brune
- R: fortemente rigato

Durabilità e lavorazione:

- durame da moderatamente a poco resistente agli attacchi fungini
- alburno ben impregnabile, durame da difficilmente a molto difficilmente impregnabile
- buona essiccazione
- buon incollaggio (in caso di non eccessiva presenza di resina)

Impiego:

- legno da costruzione per finiture di interni ed esterni, nell'industria mineraria, nelle costruzioni navali e di carrozze
- legno di piallacci, legno compensato
- mobili e ristrutturazione di interni (con tocco "rustico")
- piloni e traversine
- Industria dei prodotti a base legno (soprattutto pannelli truciolari)



2.4 Larice (europeo), *Larix decidua* Mill.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: di regola durame rossastro-bruno intenso, diventa molto scuro; alburno abbastanza sottile, da giallastro a bianco-rossastro

- L: anelli annuali ben distinti;
transizione piuttosto netta tra zona primaverile e zona tardiva;
nonostante l'elevata presenza di resina i canali resiniferi sono non particolarmente numerosi, molto piccoli e si trovano primariamente nella zona tardiva
- T: rilevanti venature decorative
- R: struttura ad evidenti rigature

Durabilità e lavorazione:

- durame da moderatamente a poco resistente agli attacchi fungini
- alburno moderatamente impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile
- buona essiccazione (in caso di legno più resinoso eventualmente più difficile)
- buon incollaggio



Impiego:

- legno da costruzione per finiture di interni ed esterni o a contatto con il terreno; industria mineraria, imbarcazioni, costruzioni idrauliche e di ponti (p. es. pali infissi), sili e torri di raffreddamento
- finestre e porte
- scandole
- piloni e traversine
- mobili, rivestimenti interni ed esterni
- botti, tini e contenitori particolari per soluzioni chimiche

2.5 Douglasia strutturale, *Pseudotsuga menziesii* Franco

Caratteri macroscopici:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame giallastro-bruno e rossastro-bruno tendente ad inscurirsi se esposto alla luce (molto simile al legno di larice!); albarno chiaro, giallastro e sottile

L: anelli annuali ben distinti da sottili a molto ampi; transizione tra zona primaverile e zona tardiva distinta o non distinta; canali resiniferi distinti

T: con venature decorative

R: fortemente rigato

Durabilità e lavorazione:

- durame da moderatamente a poco resistente agli attacchi fungini
- albarno da moderatamente a difficilmente impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile
- facile da essiccare (evitare la fuoriuscita di resina!)
- buon incollaggio
- abbastanza resistente agli acidi deboli ed agli alcali

Impiego:

- legno da costruzione per finiture di interni ed esterni (balconi, portoni, finestre)
- costruzioni idrauliche, di ponti, navali, di carrozze, di imbarcazioni e di aeroplani
- piallacci sfogliati per legno compensato
- botti, serbatoi, sili



2.6 Faggio, *Fagus sylvatica* L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame chiaro: durame ed albarno normalmente ugualmente da bianco-rossastri a bruno-rossastri;

Eventualmente durame differenziato facoltativamente (in età avanzata) ("**falso durame**"): durame bruno-rosso, per lo più non chiaramente distinto o irregolarmente a stella

L: diffuso-poroso; anelli annuali ben distinti per zone povere di pori (→ legno tardivo più scuro); vasi riconoscibili solo con una lente d'ingrandimento; grandi raggi midollari ben distinti e chiaramente visibili ad occhio nudo

T: grandi raggi midollari chiaramente visibili ad occhio nudo come trattini caratteristici, sottili, di colore bruno

R: grandi raggi midollari chiaramente visibili ad occhio nudo leggermente rigato

Durabilità e lavorazione:

- durame non resistente agli attacchi fungini
- albarno e durame chiaro ben impregnabili, eventuale falso durame molto difficilmente impregnabile
- essiccazione possibile senza problemi, richiede comunque particolare attenzione



- buon incollaggio

Impiego:

Specie legnosa locale dalle più molteplici possibilità di applicazione

- piallacci sfogliati per legno compensato e stratificato, piallacci tranciati per mobili
- mobili e finiture per interni (anche quale legno piegato)
- costruzione di aeroplani e di macchine, attrezzi, piccoli apparecchi e giocattoli di legno;
- traversine ferroviarie (a causa della modesta stabilità dimensionale non per gli scambi!), costruzioni idrauliche
- prodotti a base legno (soprattutto legno compensato e stratificato, ma anche pannelli truciolari e di fibre), cellulosa e carta
- carbone

2.7 Quercia; propriamente: Farnia, Quercus robur L. e Rovere, Quercus petraea Liebl

Caratteri macroscopici della struttura: (Farnia e Rovere non distinguibili con sicurezza a livello macroscopico e microscopico)

Durame differenziato obbligatoriamente: durame bruno-rossastro fresco, bruno chiaro asciutto in seguito tendente ad inscurirsi; albarno sottile e bianco-giallastro

L: poroso-zonato, perciò anelli annuali distinti; vasi della zona primaverile e grandi raggi midollari chiaramente visibili ad occhio nudo

T: struttura a venature; evidenti venature da pori

R: grandi raggi vistosi
rigature molto evidenti

Durabilità e lavorazione:

- durame resistente agli attacchi fungini
- albarno ben impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile
- moderatamente buona essiccazione; tende a fessurarsi, ad imbarcarsi ed a cambiare colore → necessaria essiccazione lenta ed a bassa temperatura
- incollaggio per usi strutturali problematico
- reazione degli acidi tanninici con il ferro in caso di contatto con il legno di quercia “fresco” di metalli a base ferro (→ macchioline blu scuro!)



Impiego:

- mobili e finiture per interni, soprattutto come piallacci tranciati
- legno per costruzioni edili, sottostrutture e costruzioni idrauliche (p. es. fondazioni su pali di legno di quercia), traversine (scambi!)
- costruzioni navali, di macchine e di aeroplani
- botti

2.8 Frassino, *Fraxinus excelsior* L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame chiaro o legno intermedio:

alburno e durame, di regola, non sono distinti – alburno giallo chiaro, durame dello stesso colore, esposto alla luce tende leggermente ad inscurirsi;

eventuale durame differenziato facoltativamente (in età più adulta)

(“**durame bruno**”): alburno da chiaro a bruno scuro, talvolta anche di color oliva (“frassino-oliva”)

L: poroso-zonato, perciò anelli annuali distinti;
i vasi nella zona primaverile e la parenchima longitudinale visibili ad occhio nudo, i vasi nella zona tardiva ed i raggi midollari visibili solo con una lente d’ingrandimento

T: con venature; evidenti venature da pori nella zona primaverile

R: rigato
evidenti rigature nella zona primaverile
raggi midollari riconoscibili anche senza una lente d’ingrandimento

Durabilità e lavorazione

- durame non resistente agli attacchi fungini
- alburno e durame chiaro moderatamente impregnabili, durame facoltativo molto difficilmente impregnabile
- buona essiccazione
- buon incollaggio

Impiego:

- mobili e finiture per interni (anche elementi di forma curva)
- attrezzature sportive (un tempo per produzione di sci), manici di utensili, scale di legno
- tempo fa: costruzione di apparecchi, macchine, veicoli, vagoni, barche ed aeroplani



2.9 Robinia, *Robinia pseudoacacia* L.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame da giallo-verde a giallo-bruno e oro-bruno scuro tendente ad inscurirsi; alburno sottile da giallo a bianco-verdastro

L: grazie alla porosità zonata, anelli annuali distinti e vasi nella zona primaverile visibili ad occhio nudo; raggi midollari e vasi nella zona tardiva riconoscibili solo con una lente d’ingrandimento

T: con venature; evidenti venature da pori

R: anelli annuali decisamente delimitati → evidente formazione di striature, canali porosi evidenti
raggi midollari visibili

Durabilità e lavorazione:

- durame da resistente a molto resistente agli attacchi fungini
- alburno ben impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile
- essiccazione moderatamente buona, lenta e condotta con cautela, altrimenti tende a fessurarsi ed imbarcarsi
- lavorabilità difficile ma soddisfacente
- incollaggio moderatamente buono
- impiego nell’industria mineraria

Impiego:

- industria mineraria, costruzioni idrauliche e nel suolo, mulini, macchine agricole, veicoli, costruzioni navali e ferroviarie



- mobili da giardino, palizzate, rivestimenti esterni, giochi e mobili da giardino, pali e piloni
- botti e botticelle

2.10 Castagno, *Castanea sativa* Mill.

Caratteri macroscopici della struttura:

Durame differenziato obbligatoriamente: durame da bruno pallido a bruno scuro; albarno stretto e da quasi bianco a bianco giallastro.

- L: grazie alla porosità zonata, anelli annuali distinti e vasi nella zona primaverile visibili ad occhio nudo; raggi midollari e vasi nella zona tardiva riconoscibili solo con una lente d'ingrandimento;
- T: evidenti venature da pori
- R: struttura rigata

Durabilità e lavorazione:

- durame resistente agli attacchi fungini
- albarno moderatamente impregnabile, durame molto difficilmente impregnabile
- essiccazione difficile e lenta; tendenza marcata al collasso cellulare, leggera tendenza ad imbarcarsi
- incollaggio da soddisfacente a buono
- in presenza di elevata umidità del legno possibile corrosione dei metalli e azzuramenti del legno

Impiego:

- legno da costruzione per finiture interne ed esterne, costruzioni idrauliche e navali
- legno da arredamento per mobili rustici e rivestimenti (spesso come piallaccio tranciato), parquet
- in Francia come doghe per le botti



3 Caratteristiche fisiche del legno

3.1 Legno, acqua e umidità

3.1.1 Considerazioni generali

Il legno è un materiale poroso-capillare. A seconda della massa volumica del legno, la percentuale dei pori è mediamente pari a 50-60%. Il legno ha quindi una grande superficie interna. Questo sistema costituito prevalentemente da cavità, come tutti i materiali porosi, assorbe vapore acqueo dall'aria circostante e può imbevversarsi, per capillarità, di acqua o di altri liquidi (ad es. soluzioni di sostanze protettive del legno, adesivi).

L'umidità del legno (detta anche tenore di umidità o contenuto di umidità) ne influenza praticamente tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e tecnologiche. La stabilità dimensionale assume un ruolo rilevante e può essere garantita se, in fase di lavorazione, il legno possiede un'umidità che manterrà anche nel successivo impiego (vedi paragrafo 3.2.3). 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.

3.1.2 Grandezze caratteristiche dell'umidità del legno

Il **contenuto in acqua percentuale del legno (o umidità percentuale del legno) u** è il rapporto tra la massa dell'acqua contenuta nel campione di legno di cui si vuole determinare l'umidità ($m_u - m_0$) e quella dello stesso campione allo stato anidro m_0 :

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

u	umidità percentuale del legno
m_u	massa del legno allo stato umido
m_0	massa del legno allo stato anidro

Secondo questa definizione l'umidità del legno u può superare il 100%! Per esempio, l'umidità nell'alburno di legni di Conifere è $u \approx 120 \div 150\%$ o anche più.

3.1.3 Determinazione dell'umidità del legno

Per determinare l'umidità del legno, esistono, a seconda del tipo di applicazione, un gran numero di metodi diversi; fondamentalmente si può distinguere tra:

- metodi diretti, secondo i quali il quantitativo di acqua contenuto nel campione di legno viene completamente evacuato e misurato;
- metodi indiretti, che sfruttano come grandezza misurabile una proprietà del legno dipendente dalla sua umidità.

Nella pratica si incontrano soprattutto il metodo dell'essiccazione ed i procedimenti elettrici di misurazione dell'umidità del legno (facilmente applicabili).

Il **metodo dell'essiccazione** è un procedimento di misura molto esatto, impiegato soprattutto per analisi scientifiche ma anche come termine di paragone per la calibratura degli igrometri e dei procedimenti di misura dell'umidità del legno.

Secondo questo metodo, il campione di legno appena preparato viene pesato (m_u), essiccato in una stufa a circolazione d'aria ad una temperatura di 103 ± 2 °C fino a che due pesate successive risultino uguali (m_0). In base alla diminuzione della massa si può ricavare, con la formula contenuta nel paragrafo 3.1.2, l'umidità del campione.

Misuratori elettrici di umidità (strumenti a mano)

L'umidità del legno ne influenza sia la resistenza ohmica che le proprietà dielettriche.

- **Metodo di misurazione a conducibilità o a resistenza**

La maggioranza degli igrometri elettrici si basano sulla misurazione della resistenza ohmica o della conducibilità elettrica dipendenti dall'umidità del legno. La resistenza elettrica aumenta al diminuire dell'umidità (vedi paragrafo 3.5.1); inoltre, essa è influenzata dalla direzione di taglio, dalla specie legnosa e dalla temperatura del legno. La dipendenza dalla specie legnosa e dalla temperatura necessita di tabelle correttive allegate allo strumento di misura; spesso lo strumento stesso è dotato di interruttori per la scelta della specie legnosa e della temperatura.

L'intervallo di misurazione comincia da circa il 5% di umidità del legno. Fino a circa il 22% la precisione è pari a circa $\pm 1,5\%$ di umidità; tra il 22% e l'umidità di saturazione delle pareti cellulari (circa il 28%, vedi 3.1.4) la precisione è di $\pm 2 \div 2,5\%$. Superato il punto di saturazione delle pareti cellulari, la dipendenza della resistenza elettrica dall'umidità del legno è molto ridotta e l'umidità, quindi, non può più essere misurata con sufficiente affidabilità!

- **Metodo di misurazione dielettrico (capacitivo)**

Gli igrometri capacitivi si basano sulla differenza tra le costanti dielettriche del legno allo stato anidro ($\epsilon_r = 2 \div 3$) e dell'acqua ($\epsilon_r = 81$), da cui risulta una forte dipendenza della costante dielettrica del legno umido $\epsilon_{r, \text{Legno}}$ dall'umidità u . Si deve inoltre tener conto di una forte dipendenza dalla massa volumica, per cui sono necessarie curve di taratura determinate sperimentalmente per ogni specie legnosa.

L'intervallo di misurazione comincia dallo 0% di umidità; superata l'umidità di saturazione delle pareti cellulari (da circa il 28%, vedi paragrafo 3.1.4), la precisione non è più sufficiente.

3.1.4 Scambio di vapore (acqueo)

Essendo un materiale igroscopico, il legno stabilisce un equilibrio con l'ambiente circostante assorbendo (adsorbimento) o cedendo (desorbimento) vapore acqueo. Per le diverse situazioni climatiche, si considerano le umidità di equilibrio $u_{eq,ad}$ o $u_{eq,de}$ [%]. L'umidità di equilibrio nella situazione di adsorbimento è però diversa da quella relativa al desorbimento, ovvero vale la relazione $u_{eq,ad} \neq u_{eq,de}$! Le curve a due flessi di adsorbimento e di desorbimento del legno (curve u_{eq} a temperatura costante) mostrano un fenomeno di isteresi nello scambio di vapore acqueo (vedi Figura 10).

L'**umidità di saturazione (delle pareti cellulari) u_s** [%] è quell'umidità del legno per la quale tutte le pareti cellulari (ossia l'intero sistema capillare all'interno di esse) sono completamente sature di acqua. Se l'umidità del legno si trova al di sopra del punto di saturazione ($u > u_s$), l'acqua si trova allo stato liquido nel lume delle cellule come cosiddetta "acqua libera" o "di imbibizione" (perché del tutto indipendente dalle pareti cellulari). Variazioni di umidità in questo intervallo influenzano pochissimo le caratteristiche fisico-meccaniche del legno. Per umidità del legno al di sotto del punto di saturazione ($u < u_s$), l'acqua viene adsorbita o desorbita solo dalle pareti cellulari come cosiddetta "acqua legata" o "di saturazione". In questo intervallo, l'acqua immagazzinata ha un'influenza decisiva sulle caratteristiche fisico-meccaniche del legno.

L'umidità di saturazione dipende dalla specie legnosa e per la maggior parte di esse si trova nell'intervallo $24\% \leq u_s \leq 32\%$. In prima approssimazione si può considerare un valor medio $\overline{u_s} \approx 28\%$.

L'**umidità massima u_{max}** (saturazione dell'acqua) del legno è quella per la quale tutte le pareti cellulari e tutti i lumi sono riempiti d'acqua e nel legno non è presente più aria.

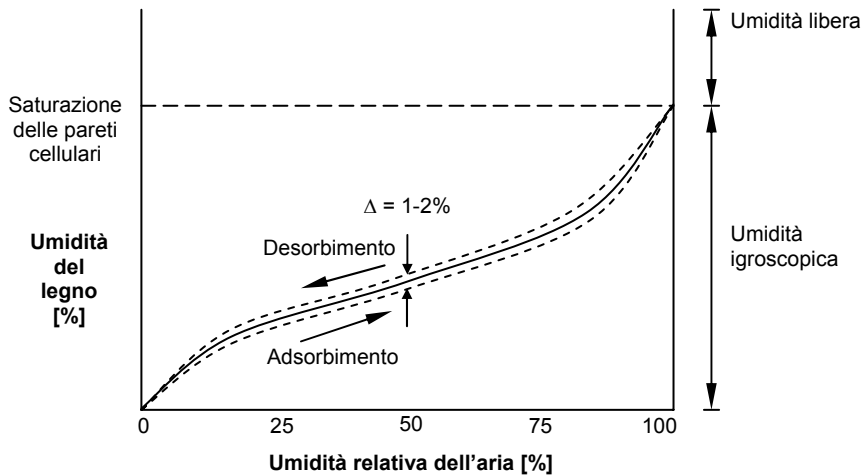


Figura 10: Curve di adsorbimento e desorbimento d'acqua nel legno

3.2 Ritiro e rigonfiamento del legno

3.2.1 Grandezze caratteristiche

Nel legno, l'adsorbimento o il desorbimento dell'acqua legata per un'umidità $u \leq u_s$ porta a delle variazioni di volume: in desorbimento si ha una diminuzione di volume o ritiro, in adsorbimento un aumento di volume o rigonfiamento.

Le grandezze caratteristiche per la valutazione del ritiro e del rigonfiamento del legno sono il valore del rigonfiamento α e quello del ritiro β . Il primo si riferisce allo stato anidro, il secondo a quello di rigonfiamento massimo. I due valori si differenziano quindi solo per la base di riferimento per le variazioni di lunghezza l_0 e l_w considerate. Per questo motivo risulta sempre $\alpha > \beta$! Essi possono essere convertiti l'uno nell'altro.

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 α**

Il coefficiente di rigonfiamento lineare α rappresenta la variazione di lunghezza del campione per un aumento di umidità da u_1 a u_2 ($l_2 - l_1$) riferita alla lunghezza allo stato anidro ($u = 0\%$) (l_0):

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

l_0, l_1, l_2 Lunghezze del campione di legno rispettivamente all'umidità u_0, u_1 e u_2

Un caso particolare del rigonfiamento lineare α è il **rigonfiamento lineare massimo α_{max}** risultante dal rigonfiamento del legno dallo stato anidro ($u = 0\%$) a quello fresco ($u > u_s$):

$$\alpha_{max} = \frac{l_w - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

l_w Lunghezza del campione di legno ad un'umidità superiore a quella di saturazione ($u > u_s$)

Il **rigonfiamento volumetrico** α_V risulta dai valori del rigonfiamento lineare nelle tre direzioni fondamentali del legno:

$$\alpha_V = \frac{(100 + \alpha_t) \cdot (100 + \alpha_r) \cdot (100 + \alpha_l)}{10^4} - 100 \quad [\%],$$

in prima approssimazione: $\alpha_V \approx \alpha_t + \alpha_r + \alpha_l$ o meglio $\alpha_V \approx \alpha_t + \alpha_r$

- **Ritiro lineare β**

Il ritiro lineare β rappresenta la variazione di lunghezza del campione per una diminuzione di umidità da u_2 a u_1 ($l_2 - l_1$) riferita alla lunghezza allo stato fresco ($u > u_S$) (l_W):

$$\beta = \frac{l_2 - l_1}{l_W} \cdot 100 \quad [\%]$$

Un caso particolare di ritiro lineare β è il **ritiro da essiccazione** β_N risultante dall'essiccazione del legno dallo stato fresco ($u > u_S$) a quello normale (20°C, 65% di umidità relativa dell'aria):

$$\beta_N = \frac{l_W - l_N}{l_W} \cdot 100 \quad [\%]$$

l_N Lunghezza del campione di legno fresco conservato in condizioni normali (20°C, 65% di umidità relativa dell'aria)

Il **ritiro volumetrico** β_V risulta dai valori del ritiro lineare nelle tre direzioni fondamentali del legno:

$$\beta_V \approx \beta_t + \beta_r + \beta_l$$

- **Coefficiente di rigonfiamento h**

Il coefficiente di rigonfiamento h è il rigonfiamento del legno per una variazione relativa di umidità dell'aria pari all'1% nell'intervallo di umidità dell'aria compreso tra $\varphi_S \approx 35\%$ e $\varphi_U \approx 85\%$, significativo per l'uso pratico del legno:

$$h = \frac{l_U - l_S}{l_0 \cdot (\varphi_U - \varphi_S)} \cdot 100 \quad [\%/ \%]$$

l_U Lunghezza del campione di legno in ambiente umido (20°C; $80\% \leq \varphi_U \leq 90\%$)

l_S Lunghezza del campione di legno in ambiente secco (20°C; $30\% \leq \varphi_S \leq 40\%$)

- **Rigonfiamento differenziale q**

Il rigonfiamento differenziale q è il rigonfiamento del legno per una variazione di umidità dello stesso pari all'1% nell'intervallo di umidità dell'aria compreso tra $\varphi_S \approx 35\%$ e $\varphi_U \approx 85\%$, significativo per l'uso pratico del legno:

$$q = \frac{l_U - l_S}{l_0 \cdot (u_U - u_S)} \cdot 100 \quad [\%/ \%]$$

u_U Umidità del legno in ambiente umido (20°C; $80\% \leq \varphi_U \leq 90\%$)

u_S Umidità del legno in ambiente secco (20°C; $30\% \leq \varphi_S \leq 40\%$)

Anisotropia del rigonfiamento A_q

I coefficienti di ritiro e rigonfiamento sono differenti nelle tre direzioni fondamentali del legno. In prima approssimazione vale $\alpha_T \approx 1,66 \alpha_R$ e $\alpha_T \approx 23 \alpha_L$.

Nei segati, i cui bordi non sono paralleli alle direzioni anatomiche del legno, in seguito a variazioni di umidità, possono presentarsi deformazioni della sezione, imbarcamento e formazione di fessure (Figura 11).

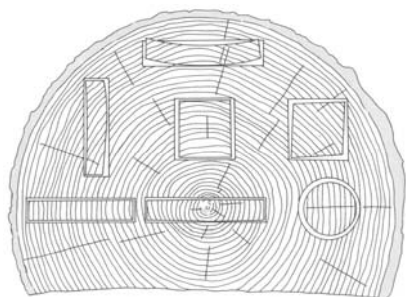


Figura 11: Deformazioni del legno in seguito a fenomeni di ritiro differenti nelle direzioni tangenziale e radiale [NIEMZ 1993]

Per quantificare le possibili deformazioni della sezione nell'uso pratico del legno si utilizza il rapporto tra il rigonfiamento differenziale in direzione tangenziale e quello in direzione radiale, indicato come anisotropia del rigonfiamento A_q :

$$A_q = \frac{q_T}{q_R}$$

Sebbene tra le specie legnose esistano notevoli differenze riguardo ai parametri di rigonfiamento (vedi paragrafo 3.2.2), l'anisotropia del ritiro e quella del rigonfiamento sono pressoché costanti per tutte le specie.

3.2.2 Ritiro e rigonfiamento delle diverse specie legnose

La Tabella 4 contiene i valori massimi del rigonfiamento delle più importanti specie legnose indigene con i relativi coefficienti di rigonfiamento ed i valori del rigonfiamento differenziale. Mediamente nei legni di provenienza europea risulta:

- il valore massimo di rigonfiamento longitudinale $\alpha_{\max,L} \approx 0,4\%$;
- il valore massimo di rigonfiamento radiale $\alpha_{\max,R} \approx 4,3\%$;
- il valore massimo di rigonfiamento tangenziale $\alpha_{\max,T} \approx 8,3\%$.

Specie legnosa	Valore massimo del rigonfiamento lineare α_{\max} [%]			Coefficiente di rigonfiamento h [%/%]		Rigonfiamento differenziale q [%/%]	
	long	rad	tan	rad	tan	rad	tan
Abete rosso	0,2 ÷ 0,4	3,7	8,5	0,037	0,070	0,19	0,36
Abete bianco	0,2 ÷ 0,4	3,7	8,5	n. d.	n. d.	0,19	0,36
Pino	0,2 ÷ 0,4	4,2	8,3	0,035	0,068	0,19	0,36
Larice	0,1 ÷ 0,3	3,4	8,5	0,027	0,057	0,14	0,30
Douglasia	0,1 ÷ 0,3	5,0	8,0	0,025	0,046	0,15	0,27
Faggio	0,2 ÷ 0,6	6,2	13,4	0,032	0,065	0,20	0,41
Quercia	0,3 ÷ 0,6	4,6	10,9	0,033	0,063	0,18	0,34

Tabella 4: Valori massimi del rigonfiamento, coefficiente di rigonfiamento e rigonfiamento differenziale di alcune specie legnose [secondo NOACK/SCHWAB 1986]

3.2.3 Umidità "normali" dei prodotti di legno

Decisivi per la fabbricazione e lavorazione dei prodotti di legno sono le condizioni climatiche medie presenti nel successivo impiego. Il legno dovrebbe avere durante la lavorazione un'umidità pari

all'umidità di equilibrio che si instaura nel materiale nel luogo di utilizzo, in dipendenza dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria.

Per le condizioni climatiche centroeuropee valgono, nel campo delle costruzioni, i seguenti valori orientativi:

- costruzioni prevalentemente asciutte $\varphi \approx 60 \div 80\% \rightarrow u_{eq}$ fino al 16%
- costruzioni completamente asciutte $\varphi \approx 40 \div 70\% \rightarrow u_{eq} \approx 8 \div 13\%$
- costruzioni riscaldate $\varphi \approx 25 \div 70\% \rightarrow u_{eq} \approx 5 \div 10\%$

Il legno da costruzione dovrebbe, quindi, essere posto in opera, a seconda dei casi, ad un'umidità di 12 ÷ 18%. Per serramenti tale valore è pari a 12 ÷ 15%. Per mobili, porte interne e rivestimenti di pareti valgono umidità del legno di 8 ÷ 12%, in dipendenza del tipo di riscaldamento presente nei locali (condizioni di umidità dell'aria). Per parquet l'umidità del legno è pari a 8 ÷ 10%, laddove, anche in questo caso, bisogna considerare oscillazioni a seconda del tipo di riscaldamento. Prodotti a base legno per le rifiniture interne hanno un'umidità di equilibrio pari a circa 5 ÷ 8%.

3.3 Densità

3.3.1 Grandezze caratteristiche

La densità ρ è data dal rapporto tra la massa m ed il volume V :

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ o } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right].$$

La **densità della sostanza legnosa** ρ_r è data dal rapporto tra la massa del legno anidro (completamente essiccato) m_0 ed il volume della sostanza legnosa (al netto dei pori di parete) $V_{\text{sostanza legnosa}}$:

$$\rho_r = \frac{m_0}{V_{\text{sostanza legnosa}}}.$$

La densità della sostanza legnosa caratterizza la densità delle pareti cellulari esclusi i pori. Essa è pressoché la stessa in tutte le specie legnose (ca. 1.500 kg/m³) ed è perciò una costante del materiale legno.

Oltre alla sostanza legnosa, il legno contiene acqua ed aria. Perciò, a seconda dell'umidità del legno, si farà distinzione tra densità apparente del legno (detta comunemente anche massa volumica) e la densità anidra.

- **Massa volumica ρ_u**

La massa volumica ρ_u è data dal rapporto tra la massa m_u ed il volume apparente (cioè vuoto per pieno) V_u del legno (comprensivo quindi del volume dei pori e dell'acqua in essi contenuta) ad una definita umidità u del legno. Poiché la massa volumica aumenta all'aumentare dell'umidità del legno, essa deve essere indicata, come indice, al momento della determinazione della massa volumica.

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

- ρ_u Massa volumica all'umidità u del legno
- m_u Massa del campione con umidità del legno u
- V_u Volume del campione con umidità del legno u

- **Densità anidra ρ_0**

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

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

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

3.3.2 Parametri che influenzano la massa volumica

Contrariamente alla densità della sola sostanza legnosa, la massa volumica presenta notevoli variazioni sia tra le varie specie legnose che all'interno di una specie stessa (a causa delle differenze dovute al luogo ed alle condizioni di crescita) ed anche in funzione della posizione nel tronco.

La massa volumica dipende soprattutto dai seguenti parametri.

- **Specie legnosa**

Il rapporto tra la superficie occupata dalla parete cellulare e dai pori varia notevolmente tra le singole specie legnose; la massa volumica dipende perciò dalla specie legnosa. Per motivi fisiologici, c'è un limite inferiore della massa volumica (volume occupato dalle pareti $\approx 6\%$) pari a circa 100 kg/m^3 (per la specie legnosa più "leggera" utilizzabile a livello industriale, il legno di balsa, vale $\rho_0 \approx 130 \text{ kg/m}^3$), ed uno superiore (volume occupato dalle pareti $\approx 93\%$) pari a circa $1200 \div 1400 \text{ kg/m}^3$.

	Densità anidra ρ_0 [kg/m ³]	Massa volumica ρ_{15} [kg/m ³]
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

Tabella 5: Densità anidra e massa volumica (per $u = 15\%$) delle più importanti specie legnose appartenenti alle Conifere ed alle Latifoglie [secondo KOLLMANN 1951]

- **Ampiezza degli anelli di accrescimento e rapporto tra legno primaverile e tardivo**

In virtù delle loro differenti funzioni e della loro struttura molto diversa risultante da esse (vedi paragrafo 1.4.1), il legno primaverile (\rightarrow funzione conduttrice della linfa, $\rho_{0,LP} \approx 250 \div 350 \text{ kg/m}^3$) possiede una densità nettamente inferiore a quella del legno tardivo (\rightarrow funzione di sostegno, $\rho_{0,LT} \approx 850 \div 1000 \text{ kg/m}^3$).

Nelle **Conifere** si riscontra una tendenza alla diminuzione della massa volumica all'aumentare dell'ampiezza degli anelli. Il motivo di ciò risiede nell'aumento della quantità di legno primaverile

connessa all'aumento dell'ampiezza degli anelli, mentre la quantità del legno tardivo in un anello di crescita rimane praticamente costante.

Nelle **Latifoglie** si fa distinzione tra legni poroso-zonati e legni poroso-diffusi (vedi paragrafo 1.4.1). Nelle specie a legno poroso-zonato (quercia, frassino, robinia) si riscontra la tendenza all'aumento della massa volumica all'aumentare dell'ampiezza degli anelli a causa della crescente aliquota di legno tardivo (tessuti di sostegno), con la larghezza del legno primaverile che rimane praticamente costante. Nella maggioranza delle specie a legno poroso-diffuso (faggio, betulla) l'influenza è, al contrario, irregolare.

3.3.3 Determinazione della massa volumica

- **Determinazione “convenzionale” della massa volumica**

La determinazione della **massa volumica** necessita di due misurazioni: la determinazione della massa del campione (mediante una bilancia appropriata) e quella del suo volume. Quest'ultima avviene secondo le due seguenti modalità.

- *Determinazione del volume di un campione per via geometrica*

Di provini di forma cubica o di parallelepipedo che si deformano uniformemente, se ne misurano le dimensioni.

- *Determinazione del volume di un campione per immersione*

In provini che si deformano in modo non uniforme, si ricava il volume mediante immersione in un fluido di densità nota.

Infine, la massa volumica è ricavata dalla massa e dal volume, ottenuti come visto in precedenza, applicando le relazioni descritte nel paragrafo 3.3.1.

Per determinare la **densità anidra**, il provino viene totalmente essiccato fino alla costanza della massa prima della determinazione del volume.

Per determinare il **coefficiente di densità volumetrica**, i provini sono immersi in acqua distillata fino al rigonfiamento massimo.

- **Determinazione della densità mediante onde elettromagnetiche (“metodo degli isotopi”)**

La determinazione della densità mediante onde elettromagnetiche ed il suo impiego nell'ambito della classificazione meccanica secondo la resistenza sono trattate nel paragrafo 5.3.3.

3.4 Caratteristiche termiche

3.4.1 Conduttività termica

Per valutare la capacità termica isolante di un elemento costruttivo risulta di particolare importanza la conduttività termica λ . Con essa si intende la quantità di calore che in un'ora passa attraverso un cubo di 1 m di spigolo, quando tra due superfici laterali parallele esiste una differenza di temperatura, costante nel tempo, di 1°K. Si misura in W/(mK).

A causa della sua elevata percentuale di pori, il legno è un cattivo conduttore di calore. Il materiale legno è costituito da sostanza legnosa, acqua ed aria e quindi la sua conduttività termica è funzione di: $\lambda_{\text{Legno}} = f(\text{massa volumica, umidità, struttura, temperatura})$.

Per legno con un contenuto di umidità di circa il 20%, la conduttività termica perpendicolarmente alla fibratura assume valori $\lambda_{\perp} = 0,10 \div 0,20$ W/(mK). Essa è quindi circa 15 volte più piccola che nel calcestruzzo armato e circa 10 volte in quello normale non armato!

3.4.2 Dilatazione termica

La grandezza caratteristica è il coefficiente di dilatazione termica α_T . Esso rappresenta la variazione di lunghezza di un'asta lunga 1 m dovuta ad una differenza di temperatura di 1°K:

$$\alpha_T = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \left[\frac{1}{K} \right]$$

Δl Variazione di lunghezza
 l_0 Lunghezza di partenza
 ΔT Differenza di temperatura in K

Allo stesso modo in cui riscaldando un'asta si giunge al suo allungamento, raffreddandola se ne produce l'accorciamento.

Con l'ausilio del coefficiente di dilatazione termica α_T , la variazione di lunghezza Δl_T di un'asta di lunghezza l per una variazione di temperatura ΔT è data da:

$$\Delta l_T = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l.$$

La dilatazione termica è poco rilevante in confronto ai fenomeni di ritiro e rigonfiamento del legno, tanto più che un aumento di temperatura (\rightarrow dilatazione termica) si oppone alla riduzione del contenuto di umidità (\rightarrow ritiro). Le variazioni di dimensioni dovute al ritiro o al rigonfiamento sono 10 volte maggiori di quello dovute alla dilatazione termica. Queste ultime, nelle costruzioni di legno, hanno un'importanza trascurabile per gli elementi strutturali di legno.

3.5 Caratteristiche elettriche

3.5.1 Resistenza e conducibilità elettriche

Le grandezze caratteristiche sono:

- **resistenza elettrica R** = resistenza che il legno oppone al passaggio di corrente elettrica;
- **conducibilità elettrica G** = capacità di un materiale a lasciarsi attraversare da corrente elettrica. È l'inverso della resistenza elettrica.

$$G = \frac{1}{R} \quad [\text{Siemens S}]$$

La resistenza e la conducibilità elettriche del legno dipendono dai seguenti parametri.

- **Umidità**
 Il legno allo stato anidro è un buon isolante. All'aumentare del contenuto di umidità, diminuisce la resistenza elettrica molto rapidamente tendendo, in condizioni di saturazione delle pareti cellulari, a raggiungere asintoticamente all'incirca il valore dell'acqua. Per umidità $5 \leq u \leq 22\%$ il logaritmo della resistenza elettrica è pressoché funzione lineare dell'umidità del legno. Questa dipendenza viene sfruttata per la misurazione elettrica dell'umidità del legno con apparecchi che determinano la resistenza elettrica (vedi paragrafo 3.1.3).
- **Temperatura**
 All'aumentare della temperatura, la resistenza elettrica diminuisce notevolmente. Nei metodi di misurazione elettrica dell'umidità è necessario, quindi, un fattore correttivo dovuto alla temperatura (vedi paragrafo 3.1.3).
- **Massa volumica, struttura del legno, specie legnosa**
 A causa delle differenti masse volumiche e delle diverse sostanze contenute nel legno, l'appartenenza ad una determinata specie legnosa influenza fortemente la resistenza e la conducibilità elettriche del legno.
- **Direzione della fibratura**
 La resistenza elettrica del legno perpendicolarmente alla fibratura è doppia di quella parallelamente ad essa.

3.5.2 Caratteristiche dielettriche

Come grandezza caratteristica per le proprietà dielettriche si utilizza di regola la **costante dielettrica relativa** ϵ_{rel} . Essa indica di quanto aumenta la capacità di un condensatore (costituito da due piastre piane immerse in aria ed a distanza d) interponendo un determinato dielettrico, quindi di quante volte la costante dielettrica del materiale è più grande di quella del vuoto ($\epsilon_{Vuoto} = 1$):

$$\epsilon_{rel} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{Vuoto}} .$$

La costante dielettrica dell'acqua è pari all'incirca a 81, quella del legno anidro è $2 \div 3$.

La costante dielettrica del legno dipende dai seguenti parametri.

- **Umidità**

Poiché la costante dielettrica dell'acqua ($\epsilon_{Acqua} = 81$) è molto più grande di quella del legno anidro ($\epsilon_{legno\ anidro} = 2 \div 3$), la costante dielettrica aumenta all'aumentare dell'umidità. Questa dipendenza viene sfruttata nel metodo di misurazione capacitivo dell'umidità (vedi paragrafo 3.1.3).

- **Massa volumica, struttura del legno, specie legnosa**

La costante dielettrica cresce linearmente all'aumentare della massa volumica. Nella misurazione capacitiva dell'umidità, bisogna considerare la specie legnosa e la relativa massa volumica (vedi paragrafo 3.1.3).

- **Orientamento della fibratura rispetto alle piastre del condensatore**

La costante dielettrica nella direzione della fibratura è all'incirca $50 \div 60\%$ maggiore che perpendicolarmente ad essa.

3.6 Caratteristiche acustiche

Le caratteristiche acustiche del legno si riscontrano in diversi campi d'impiego, p. es. nelle costruzioni edili (acustica tecnica, isolamento fonico, sale concerto e simili), negli strumenti musicali e nelle prove non distruttive sui materiali.

Il suono è una vibrazione meccanica prodotta da un mezzo elastico. In base alla frequenza si può fare una differenziazione tra infrasuoni (non percettibili dall'udito umano, frequenze < 16 Hz), suoni percettibili dall'udito (16 Hz \div 20 kHz) ed ultrasuoni (> 20 kHz).

3.6.1 Velocità di propagazione del suono

La velocità di propagazione del suono lungo la direzione della fibratura raggiunge valori di $4000 \div 6000$ m/s, perpendicolarmente ad essa di $400 \div 2000$ m/s.

La velocità di propagazione del suono può essere misurata con strumenti ad ultrasuoni (ad es. il Sylvatest, vedi paragrafo 5.3.2) o mediante misurazione del tempo di percorrenza delle vibrazioni (onde) provocate da un adeguato impulso meccanico. Entrambi i metodi vengono applicati per la classificazione secondo la resistenza dei tondi e dei segati (vedi paragrafo 5.3.2).

3.6.2 Frequenza propria di vibrazione

La frequenza propria di un materiale indotto a vibrare fornisce informazioni sulle sue costanti elastiche. Pertanto, la misurazione della frequenza propria viene sempre più spesso utilizzata per i controlli di qualità, secondo i quali vengono suscitate vibrazioni longitudinali, di flessione oppure di torsione, ricavando quindi dalla frequenza propria misurata le costanti elastiche.

A titolo di esempio, la determinazione della frequenza propria viene impiegata nella classificazione meccanica dei segati secondo la resistenza (vedi paragrafo 5.3.2).

4 Caratteristiche meccaniche del legno

4.1 Differenza tra prove sul materiale (provini di legno di dimensioni ridotte) e prove sugli elementi strutturali (provini in dimensione strutturale)

Il legno è un materiale da costruzione “naturale” dalle grandi potenzialità. Perciò occorre tener conto della differenza tra i vari livelli di “struttura” del materiale e della loro influenza sul comportamento meccanico. La resistenza a trazione per le singole fibre di cellulosa è pari a circa 8000 N/mm², per il legno “privo di difetti” (detto anche legno “netto”) è di circa 100 N/mm² mentre per il legno in dimensione strutturale è di un ordine di grandezza più piccolo. Pertanto, in riferimento alle caratteristiche meccaniche delle fibre di cellulosa, solo una parte del potenziale di questo materiale può essere sfruttata.

Le sezioni dei provini di legno di dimensione ridotte hanno dimensioni fino a 20 mm x 20 mm. Nelle norme per le prove su campioni in dimensione strutturale, non sono stabilite dimensioni fisse degli stessi; i valori caratteristici si riferiscono, tuttavia, a larghezze o altezze di riferimento.

Valori nominali		Provini di legno netto	Provini in dimensione strutturale
Resistenza a flessione	[N/mm ²]	49 ÷ <u>78</u> ÷ 136	37
Resistenza a trazione parallelamente alla fibratura	[N/mm ²]	21 ÷ <u>90</u> ÷ 245	30
Resistenza a compressione parallelamente alla fibratura	[N/mm ²]	35 ÷ <u>50</u> ÷ 79	32

Tabella 6: Confronto tra i tipici valori nominali dell'abete rosso, determinati su provini di legno netto ed in dimensione strutturale [provini di legno netto da KOLLMANN 1951]

Dalla Tabella 6 si può osservare chiaramente come i valori nominali del legno privo di difetti non possano rappresentare, con sicurezza ed affidabilità, il comportamento meccanico dei prodotti di legno per le costruzioni. Le cause delle differenze che si presentano nei provini in dimensione strutturale, caratterizzati da forte dispersione delle proprietà, risiedono nei cosiddetti difetti della costituzione anatomica dei tronchi (caratteristiche della crescita, p. es. i nodi) nonché nella lavorazione (p. es. la segazione del legno tondo).

Gli ingegneri devono preoccuparsi che le loro opere siano progettate e realizzate nel rispetto della sicurezza e dell'affidabilità. Devono essere quindi determinati e fissati i valori dei parametri riferiti al materiale in grado di rispondere a queste esigenze e di restituire inoltre il più verosimilmente possibile l'effettivo comportamento del materiale impiegato nella costruzione. Le grandezze caratteristiche del legno come materiale da costruzione devono quindi essere determinate su provini in dimensione strutturale (vedi paragrafo 4.3).

4.2 Diagramma costitutivo

Per rappresentare le caratteristiche meccaniche di un materiale, si fa uso del diagramma costitutivo. In esso sono visibili tutte le informazioni più importanti, legate alla resistenza ed alla rigidezza (modulo di elasticità E).

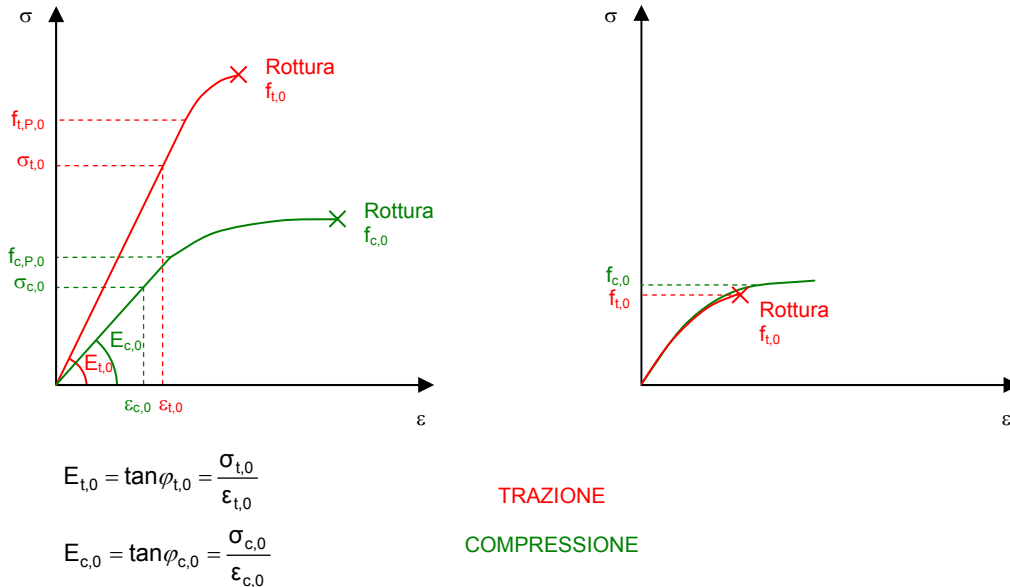


Figura 12: Diagramma costitutivo del legno nella direzione della fibratura
 sinistra: provino di legno di piccole dimensioni (privo di difetti)
 destra: provino in dimensione strutturale
 per le sollecitazioni di trazione (in rosso) e compressione (in verde)

Come si può osservare in Figura 12, nel legno di piccole dimensioni, nel campo delle sollecitazioni non elevate, esiste una dipendenza lineare tra tensioni e deformazioni sia a trazione che a compressione. Il legno si comporta in questo campo elasticamente, ossia allontanato il carico, le deformazioni da esso provocate si annullano. Di seguito è rappresentata la legge di Hook con i relativi termini.

$\sigma = E \cdot \epsilon$ <p> σ Tensione normale E Modulo di elasticità longitudinale ϵ Dilatazione lineare </p>	$\tau = G \cdot \gamma$ <p> τ Tensione tangenziale G Modulo di elasticità tangenziale γ Scorrimento mutuo </p>
---	---

Le costanti di proporzionalità sono indicate come modulo di elasticità longitudinale (modulo E o di Young) nel caso di una dilatazione lineare e modulo di elasticità tangenziale (modulo G o di taglio) in caso di uno scorrimento mutuo (Figura 13).

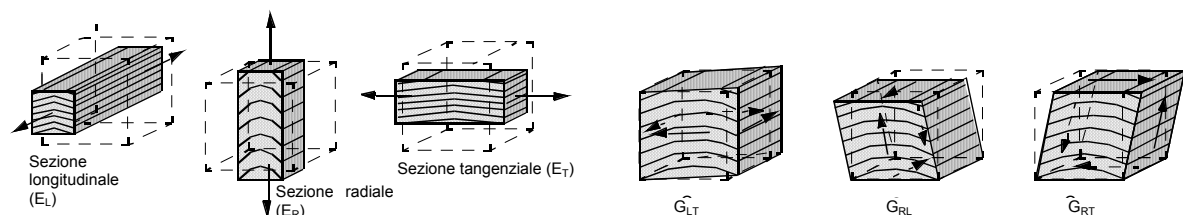


Figura 13: Dilatazioni lineari e scorrimenti mutui

Dopo aver superato il limite di proporzionalità, bisogna distinguere tra un comportamento a trazione spiccatamente fragile (\rightarrow limitata deformabilità a rottura) ed uno a compressione di tipo duttile (\rightarrow le

deformazioni crescono più delle tensioni). Nelle prove di trazione in direzione della fibratura su provini di legno di piccole dimensioni, eseguite come da normativa, il limite di proporzionalità $f_{t,P,0}$ e la tensione di rottura $f_{t,0}$ sono quasi coincidenti. Nelle prove di compressione in direzione della fibratura, il limite di proporzionalità si trova, di contro, decisamente più in basso rispetto alla rottura per compressione ed è all'incirca pari al 60-80% della stessa.

La resistenza a trazione e quella a compressione, per un provino di legno privo di difetti, si trovano nel rapporto di circa 2 : 1.

In virtù della sua struttura, il legno possiede caratteristiche meccaniche che assumono ordini di grandezza differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali:

- longitudinale (L);
- radiale (R);
- tangenziale (T).

Questa dipendenza delle grandezze caratteristiche dalla particolare direzione viene denominata "anisotropia".

Negli impieghi strutturali, le caratteristiche meccaniche sono definite, di regola:

- **parallelamente alla fibratura:** la resistenza e la rigidità parallelamente alla fibratura raggiungono i valori massimi → rappresenta la direzione portante principale;
- **perpendicolarmente alla fibratura:** la distinzione tra direzione radiale e tangenziale è difficilmente realizzabile ai fini del dimensionamento e non porterebbe a significativi vantaggi sia tecnici che economici nell'utilizzo pratico del legno. Per questo motivo, le caratteristiche in direzione radiale e tangenziale vengono riassunte per semplicità in "perpendicolarmente alla fibratura" (piano trasversale all'asse del tronco). Esse sono inferiori di quelle nella direzione della fibratura.

Generalmente nel legno tra le proprietà elastiche e le caratteristiche di resistenza sussiste una correlazione da molto buona (nel legno privo di difetti) a buona (nel legno in dimensione strutturale). Le proprietà elastiche (modulo E), a differenza della resistenza, possono essere determinate in maniera non distruttiva. La correlazione tra il modulo di elasticità e la resistenza meccanica offre quindi la possibilità di "valutare" la resistenza del legno senza prove distruttive e rappresenta quindi un parametro essenziale per la classificazione del legno strutturale secondo la resistenza (vedi paragrafo 5).

Le caratteristiche meccaniche del legno sono influenzate da una serie di parametri, quali:

- presenza di difetti nella costituzione anatomica (nodi, deviazione della fibratura, ecc.);
- direzione (longitudinale (parallela), trasversale (perpendicolare), inclinata) e tipo di sollecitazione (trazione, compressione, flessione, taglio, torsione);
- angolo tra la retta d'azione dei carichi e la direzione della fibratura;
- specie legnosa;
- massa volumica;
- umidità del legno;
- dimensioni del campione;
- velocità di applicazione dei carichi: statici ↔ dinamici (di tipo impulsivo, alternanza);
- durata di azione dei carichi (resistenza a carichi di breve e lunga durata);
- configurazione di prova.

4.3 Caratteristiche meccaniche del legno in dimensione strutturale

Nel legno strutturale, le verifiche si eseguono, di regola, secondo la teoria tecnica della trave. Con le "classiche" grandezze caratteristiche di resistenza, determinate in base a prove di carico normalizzate, e le tensioni calcolate secondo la teoria tecnica della trave esiste quindi una correlazione tra la determinazione degli sforzi e i valori delle resistenze.

Sollecitazione	Tensione	Resistenza	Indicazione
Trazione parallela alla fibratura	$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_n}$	$f_{t,0,d}$	Resistenza a trazione assiale
Compressione parallela alla fibratura	$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_n}$	$f_{c,0,d}$	Resistenza a compressione assiale
Flessione e taglio	$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_n}$	$f_{m,d}$	Resistenza a flessione
	$\tau_d = \frac{V_d \cdot S_n}{I_n \cdot b}$	$f_{v,d}$	Resistenza a taglio
Torsione	$\tau_{tor,d} = \frac{M_{T,d}}{W_{T,n}}$	$f_{v,d}$	Resistenza a torsione
Compressione perpendicolare alla fibratura (pressioni di contatto sugli appoggi)	$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_d}{A}$	$f_{c,90,d}$	Resistenza a compressione trasversale
Trazione perpendicolare alla fibratura (elementi di collegamento)	$\sigma_{t,90,d} = \frac{N_d}{A}$	$f_{t,90,d}$	Resistenza a trazione trasversale
Scorrimento da taglio			
- "rotolamento delle fibre"	$\tau_{r,d}$	$f_{r,k}$	Resistenza a taglio trasversale
- "scorrimento delle fibre"	$\tau_{a,d}$	$f_{v,k}$	Resistenza a taglio longitudinale

Tabella 7: Grandezze caratteristiche di resistenza del legno in dimensione strutturale in relazione al tipo di sollecitazione

Definizione degli indici utilizzati (anche dalle norme):

t	Sollecitazione di trazione
c	Sollecitazione di compressione
m	Sollecitazione di flessione
v	Sollecitazione di taglio o torsione
0	Parallelamente alla fibratura
90	Perpendicolarmente alla fibratura
k	Valore caratteristico (attenzione: non sempre il frattile al 5%)
05	Frattile al 5%
d	Valore di calcolo ("Design")
mean	Valore medio

Le proprietà di resistenza ed elasticità del legno in dimensione strutturale non sono tanto differenti da quelle dei provini di legno netto. Le proprietà di elasticità possono essere misurate direttamente (vedi paragrafo 5.3). In questo modo si può garantire l'impiego di legno dalle proprietà elastiche definite.








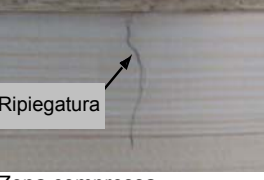
		Direzione della sollecitazione	
		parallelamente alla fibratura	perpendicolarmente alla fibratura
Tipo di sollecitazione	Trazione	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamento elastico-lineare fino ad improvvisa rottura fragile (per lo più senza preavviso). - Rottura dovuta in prevalenza alla presenza di nodi (con deviazione locale della fibratura). 	<ul style="list-style-type: none"> - Spiccata fragilità. - Resistenza influenzata soprattutto da fessurazioni, cipollatura, canali resiniferi. 
	Compressione	<ul style="list-style-type: none"> - Inizialmente comportamento elastico-lineare, con l'inizio del collasso delle fibre visco-plastico. Rottura preannunciata da "ripiegature" (sbandamento locale delle fibre di legno) → comportamento abbastanza duttile. - Nodi non direttamente causa di riduzione della resistenza, deviazioni della fibratura favoriscono la rottura. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamento duttile. - Schiacciamento e tranciamento delle fibre nelle zone di introduzione delle forze. - Sollecitazione del provino ortogonalmente alla direzione della forza: le tensioni di trazione trasversali portano al collasso. 
	Taglio	<p>Collasso di una trave soggetta a flessione di regola in zona tesa, raramente per il taglio (generalmente in zona appoggio). Pertanto determinazione della resistenza a taglio di una trave soggetta a flessione attraverso una specifica configurazione di carico.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comportamento elastico-lineare fino ad improvvisa rottura fragile. - Collasso in prossimità dell'asse neutro, spostamento reciproco di due parti della sezione. 	<p>"Sollecitazione a taglio trasversale"</p> <p>→ Soprattutto per prodotti a base legno a più strati incollati ortogonalmente, a causa dei differenti valori di resistenza del legno in direzione parallela e perpendicolare alla fibratura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inizialmente comportamento elastico-lineare, quindi comportamento plastico fino a rottura. - Tipico meccanismo di rottura: rotolamento degli strati longitudinali su quelli trasversali. 
	Flessione	<p>Resistenza a flessione (in zona tesa)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per sollecitazione di flessione, collasso, di regola, in zona tesa - Comportamento elastico-lineare fino ad improvvisa rottura fragile. - Il potenziale della zona compressa non viene completamente sfruttato in questa circostanza. - La rottura scaturisce dalla presenza di nodi (e relativa deviazione della fibratura) <p>Resistenza a flessione (in zona compressa)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Collasso in zona compressa possibile, di regola, solo con una zona tesa estremamente resistente - Inizialmente comportamento elastico-lineare, quindi visco-plastico (rottura dopo la formazione di "ripiegature" in zona compressa) → comportamento duttile  	

Tabella 8: Caratteristiche meccaniche del legno in dimensione strutturale in relazione al tipo ed alla direzione della sollecitazione

5 Classificazione secondo la resistenza

Per permettere un dimensionamento sicuro ed affidabile degli elementi strutturali di legno devono essere conosciute le caratteristiche del materiale con sufficiente attendibilità. Le caratteristiche meccaniche del legno presentano una dispersione dei valori molto grande (il rapporto fra il valore più piccolo e quello più grande della resistenza a rottura di un elemento di legno segato può raggiungere 1:10). Ciò impedirebbe, in mancanza di una classificazione efficace, di impiegare il legno quale elemento strutturale in modo adeguato.

La procedura di classificazione del materiale si prefigge di ottenere l'effetto seguente (vedi Figura 15):

- formazione di classi di resistenza con proprietà differenziate e valori caratteristici affidabili.
- distribuzione dei valori delle proprietà meccaniche più ridotta all'interno delle singole classi di resistenza rispetto alla totalità del materiale (si definisce questo effetto come "omogeneizzazione" del materiale).

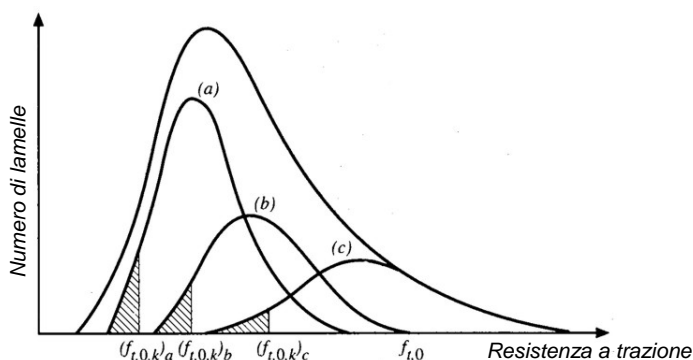


Figura 14: Effetto della classificazione nelle classi a, b e c in relazione alla resistenza a trazione secondo [BLASS et al. 1995]

In dipendenza dall'utilizzazione prevista, il materiale può essere classificato prevalentemente secondo:

- la resistenza (resistenza e/o rigidità);
- l'apparenza estetica (criteri di classificazione specifici all'estetica o alla conformazione della superficie);
- esigenze in relazione all'utilizzazione prevista (fessurazione, stabilità dimensionale).

La classificazione secondo la resistenza è di importanza capitale per l'uso del legno per elementi strutturali ed è quindi presentata di seguito in modo dettagliato.

Le esigenze legate all'impiego di legno segato sono, in dipendenza dell'uso previsto, diverse e talvolta i criteri di classificazione si sovrappongono. Perciò si trovano spesso nelle direttive e norme per la classificazione secondo la resistenza anche criteri generali che si riferiscono prevalentemente alla classificazione estetica.

La classificazione secondo la resistenza avviene principalmente secondo due metodi:

- la classificazione visiva;
- la classificazione meccanica.

5.1 Classificazione visiva

Per la classificazione visiva si applicano criteri visibili e riconoscibili senza l'uso di apparecchi particolari. Per il legno di Conifere si tratta principalmente di:

- nodi;
- inclinazione delle fibre;
- ampiezza degli anelli di accrescimento;
- i smussi;
- eventualmente posizione nel tronco o nella sezione.

Il principio della classificazione visiva si basa sul fatto che esiste una correlazione, più o meno buona, tra i singoli criteri riconoscibili visivamente (per esempio la grandezza dei nodi) e le caratteristiche meccaniche del materiale. Mediante prove di carico a rottura di elementi strutturali di legno massiccio in dimensione reale, o sulla base della lunga esperienza della classificazione visiva, sono definiti i valori limite per ogni singolo criterio.

I vantaggi della classificazione visiva sono:

- le prescrizioni e le regole di classificazione sono semplici e facili da mettere in pratica;
- l'applicazione senza l'ausilio di apparecchiature specifiche è possibile;
- in caso di esecuzione precisa e coscienziosa, in relazione all'impiego delle risorse necessarie, si ottengono buoni risultati, cioè la classificazione offre sufficienti garanzie di affidabilità ed efficienza;
- una verifica ulteriore della classificazione di elementi già messi in opera è, in linea di principio, possibile.

Gli svantaggi della classificazione visiva sono:

- la classificazione è soltanto parzialmente riproducibile, in quanto spesso il giudizio soggettivo del personale preposto gioca un ruolo importante;
- il risultato finale dipende anche dalle condizioni di lavoro e dalla concentrazione del personale preposto alla classificazione; ciò è senza dubbio un limite della classificazione visiva;
- la classificazione visiva richiede un impiego notevole di personale;
- la classificazione in classi di resistenza "elevate" non è possibile tramite la classificazione visiva; il potenziale del materiale classificato non può quindi essere sfruttato completamente;
- le regole di classificazione piuttosto semplici non permettono di tener conto di tutti gli effetti e parametri di classificazione: il parametro di classificazione "peggiore" determina la classificazione.

5.2 Metodo del carico effettivo ("proof-loading")

Gli elementi di legno segato vengono sottoposti ad una sollecitazione definita (carico effettivo). In caso di non rottura dell'elemento sotto l'azione di questo carico, esso viene assegnato ad una determinata classe di resistenza ed utilizzato come elemento strutturale. Il livello di carico usato per questa procedura è compreso tra il frattile al 2 e al 5% del valore caratteristico della resistenza della classe considerata.

5.3 Classificazione meccanica

La classificazione meccanica permette di considerare anche criteri non analizzabili in modo visivo, quali, ad esempio, la densità del materiale o il valore del modulo di elasticità. In questo caso, i criteri di classificazione vengono infatti riconosciuti e analizzati da un'apparecchiatura automatizzata, senza danneggiare in alcun modo il materiale.

Il criterio meccanico di classificazione più importante è il modulo di elasticità E , in quanto permette una correlazione con la resistenza più marcata rispetto agli altri criteri.

I vantaggi della classificazione meccanica sono:

- a causa della suddivisione più efficiente del materiale nelle classi di resistenza, si ottiene un coefficiente di variazione più piccolo e quindi una migliore suddivisione del materiale (varianza più piccola). Ne risulta quindi una classificazione più efficace;

- la classificazione è documentata e ripetibile;
- il potenziale meccanico del materiale può essere sfruttato meglio, in quanto possono essere formate classi di resistenza con caratteristiche meccaniche migliori;
- la capacità di classificazione meccanica dei sistemi più moderni raggiunge i 300 metri lineari di materiale al minuto.

Gli svantaggi della classificazione meccanica sono:

- l'impegno finanziario per l'acquisto, la messa in esercizio e l'omologazione di un impianto di classificazione meccanica è molto importante. Gli impianti per la classificazione meccanica, e il risultato della classificazione da essi ottenuta, devono essere sottoposti regolarmente a controlli e verifiche sia interni allo stabilimento di produzione, sia esterni, cioè ad opera di istituti appositamente accreditati;
- il risultato della classificazione, e in particolar modo dopo che gli elementi in questione siano stati messi in opera, può essere ricostruito o controllato soltanto per mezzo di impegnativi sistemi di controllo della qualità e protocollo delle procedure;
- il personale addetto alla gestione e all'esercizio della classificazione meccanica deve essere istruito e qualificato secondo criteri ben definiti.

I sistemi di classificazione meccanica usati più frequentemente in Europa sono:

- la misura del modulo di elasticità (misura tramite flessione o modulo E "statico");
- la misura di parametri relativi alla propagazione di onde o vibrazioni (frequenze di risonanza, propagazione degli ultrasuoni, ecc.);
- i metodi basati sui raggi x (il principio delle radiografie)

5.3.1 Misura del modulo E statico

Il materiale da classificare attraversa una serie di rulli che ne costringono la flessione; le forze e gli spostamenti in gioco vengono determinati a mezzo di sensori appositi (vedi Figura 16). Tenendo conto delle dimensioni della sezione dell'elemento cui si riferiscono le misure e della geometria del sistema di rulli (di regola a distanza fra 600 e 1200 mm fra di loro), si può determinare in modo numerico il modulo di elasticità E.

La misura viene effettuata in continuità e l'assegnazione dell'elemento ad una classe di resistenza avviene sulla base del valore di E più piccolo misurato, oppure sulla base del valore più piccolo di un parametro di classificazione determinato sulla base anche di ulteriori valori misurati. Questo sistema è adatto per spessori del materiale da classificare fino a 80 mm ed è impiegato essenzialmente per la classificazione di tavole e di lamelle per la produzione di legno lamellare incollato.

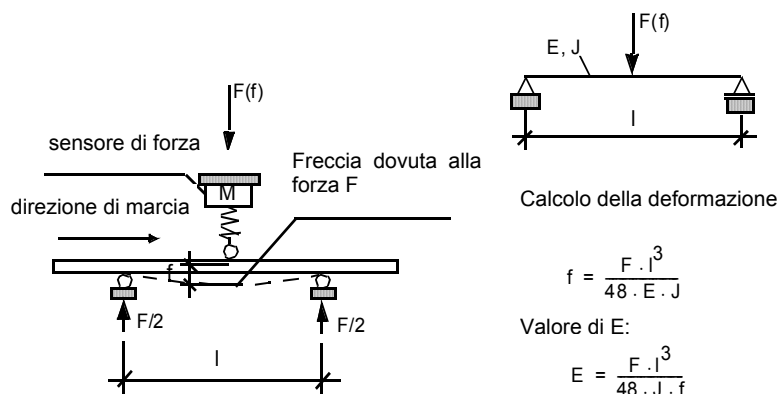


Figura 15: Schema di una macchina per la classificazione secondo il modulo E statico

5.3.2 Misure legate alla propagazione delle onde

I due sistemi descritti di seguito si basano sulla determinazione del modulo di elasticità dinamico, che a sua volta presenta una buona correlazione con il modulo E statico.

Il modulo di elasticità dinamico può essere determinato mediante la misura della velocità di propagazione di un'onda sonora nel legno (misure della velocità di propagazione degli ultrasuoni), o mediante la determinazione della frequenza propria di vibrazione dell'elemento di legno segato. In quest'ultimo caso la vibrazione è provocata da un impulso meccanico.

- Misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni

L'elemento di legno è attraversato, parallelamente alla fibratura, da un'onda ad ultrasuoni a bassa frequenza (nello spettro tra 35 e 50 kHz). Per esso si applica ad una estremità della trave un emettitore di ultrasuoni e all'altra estremità un ricevitore. L'onda generata attraversa il materiale e raggiunge il ricevitore, che ne registra il passaggio e il tempo di percorrenza. Il criterio di classificazione è in questo caso la velocità di propagazione dell'onda ad ultrasuoni.

Il modulo di elasticità dinamico nella direzione parallela alla fibratura è determinato come segue:

$$E_{\text{din}} = \rho \cdot v^2$$

E_{din}	Modulo E dinamico [N/mm ²]
v	Velocità di propagazione degli ultrasuoni [m/s]
ρ	Massa volumica [kg/m ³]

A causa della sollecitazione di durata molto breve, il modulo di elasticità dinamico è più grande del modulo di elasticità statico (differenza: 5 - 10%).

Al momento si trovano sul mercato degli apparecchi per la misura delle velocità di propagazione degli ultrasuoni che sono stati sviluppati specialmente per la ricerca nel settore legno (Figura 16, "Sylvatest" della ditta "Cableries & Trefileries de Cossonay S.A."). L'applicazione industriale di questo sistema si trova ancora in fase sperimentale.



Figura 16: Apparecchio "Sylvatest" portatile

I vantaggi di questo sistema risiedono principalmente nei costi relativamente ridotti dell'apparecchiatura e nella semplicità della sua applicazione. Inoltre questo metodo può essere applicato ad una vasta gamma di prodotti di dimensioni diverse (dalle tavole al legno segato di grandi sezioni, ma anche agli alberi non ancora abbattuti). Per il legno segato con sezioni di grandi dimensioni si tratta al momento di una fra le pochissime possibilità di classificazione meccanica.

- Metodo delle vibrazioni longitudinali

Nei sistemi industriali attualmente in servizio gli elementi di legno vengono dapprima piallati e troncati alla lunghezza desiderata. Quindi viene determinata tramite pesatura elettronica il loro peso e da esso calcolata la massa volumica. Di seguito viene suscitata una vibrazione longitudinale tramite impulso meccanico. Mediante strumenti di misura adeguati (laser, sensori particolari) si determinano le vibrazioni del legno, dalle quali, tramite un'analisi numerica, si determina la frequenza propria dell'elemento in questione. Sulla base di questa, della massa e

delle dimensioni, è possibile determinare il valore medio del modulo E dinamico, riferito alla lunghezza dell'elemento su cui è stata fatta la misurazione.

Visto che le prescrizioni che regolano la classificazione meccanica del legno strutturale secondo la resistenza (p. es. ÖNORM DIN 4074-3) pretendono la definizione di una "sezione più debole", un sistema basato unicamente su questo metodo non potrebbe ottenere l'omologazione. Tutte le applicazioni pratiche di questo metodo si basano quindi sulla sua combinazione con la misura di altri parametri: l'apparecchiatura Grademaster 403, della ditta Dimter, per esempio è equipaggiata di una fotocamera monocromatica (vedi paragrafo 5.3.4).

5.3.3 Metodi basati sull'emissione di raggi – l'esempio del metodo della radiografia

Nel caso della determinazione della densità, i provini di legno vengono attraversati da raggi gamma a bassa energia. Una sorgente si trova da una parte dell'elemento ed un ricevitore dall'altra parte. I raggi sono sottoposti ad un indebolimento della loro potenza durante l'attraversamento del materiale, che è proporzionale alla massa di quest'ultimo. Sulla base di questo effetto è quindi possibile determinare la densità del materiale.

Questo principio viene utilizzato nel caso della classificazione meccanica principalmente per riconoscere i nodi del legno (i nodi hanno una densità maggiore rispetto al resto del legno), ma anche per determinare la massa volumica (media) del legno segato. Inoltre, possono essere riconosciute le variazioni della crescita del tronco che provocano una variazione della densità del materiale (come per esempio il legno di reazione).

L'impianto di classificazione meccanica più noto in Europa che applica questo metodo è l'"Eurogrecomat" della ditta GreCon/Deutschland, che lo applica in combinazione con la misura del modulo E statico (EuroGrecomat 704, vedi paragrafo 5.3.4 e Figura 18) o quale unica stazione di misura (EuroGrecomat 702). Altri sistemi sono il "Golden Eye" della ditta Microtec di Bressanone o il "Wood Eye" della ditta svedese Innovative Vision AB.

5.3.4 Alcuni esempi di apparecchiature per la classificazione meccanica

Nelle apparecchiature di classificazione meccanica industriale del legno strutturale si impiegano più metodi di misura in combinazione tra di loro:

- nell'EuroGreComat 704 sono combinati una unità a raggi ed una unità di misura del modulo E statico (Figura 17);

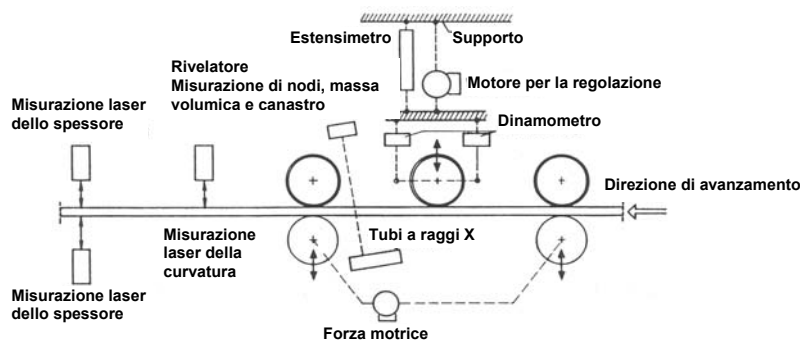


Figura 17: Schema di funzionamento - EuroGreComat 704

- nel Grademaster 403 della ditta Dimter/Deutschland si usa il metodo delle vibrazioni longitudinali in combinazione con una fotocamera monocromatica (Figura 18).



Figura 18: Impulso e misura della frequenza – Dimter Grademaster 403

5.4 Normativa per la classificazione

Di seguito sono indicate le norme che hanno rilevanza per la classificazione meccanica del legno strutturale.

5.4.1 Norme europee

Le indicazioni per la classificazione secondo la resistenza si trovano nella EN 14081.

Un sistema di classi di resistenza per il legno segato per uso strutturale si trova nella EN 338. Vi sono definite 12 classi di resistenza (C14 fino a C40) per il legno di Conifere e sei classi di resistenza per il legno di Latifoglie. Sono indicati i valori caratteristici della resistenza, della rigidezza e della massa volumica.

La corrispondenza delle categorie di classificazione visiva attualmente in vigore a livello nazionale con le classi di resistenza europee, sulla base della norma EN 338, è regolamentata secondo la norma EN 1912.

5.4.2 Norme nazionali austriache

In Austria vige attualmente (novembre 2004), per quanto concerne la classificazione secondo la resistenza di legno segato per la costruzione, la ÖNORM DIN 4074:1996; si tratta di una norma identica alla norma tedesca DIN 4074:1989.

La norma ÖNORM DIN 4074-1 definisce i criteri di classificazione e le esigenze per il legno squadrato, le tavole, i tavoloni ed i listelli, per sette classi di resistenza: quattro per la classificazione meccanica (MS 7, MS 10, MS 13 e MS 17) e 3 per quella visiva (S 7, S10 e S13).

Le norme ÖNORM DIN 4074-3 e ÖNORM DIN 4074-4 definiscono le esigenze per gli impianti di classificazione meccanica secondo la resistenza.

Indicazioni ulteriori sulla classificazione si trovano nella norma ÖNORM DIN 4074 e nel Prontuario 1 (marzo 2004).

Le tensioni ammissibili e i valori caratteristici del materiale sono definiti nella norma ÖNORM B 4100-2:1997. Le tensioni ammissibili e i valori della rigidezza sono molto simili a quelle della norma per la costruzione di legno tedesca DIN 1052-1 / A1 (1996).

L'assegnazione delle categorie di classificazione secondo la norma ÖNORM DIN 4074-1:1996 alle classi di resistenza della EN 338 avviene secondo la EN 1912; l'assegnazione ad una delle classi di resistenza della norma EN 338, basate sulla classificazione meccanica secondo la norma ÖNORM DIN 4074-1, avviene sulla base di una omologazione dell'impianto utilizzato per la classificazione meccanica. In generale possono essere ammesse le corrispondenze indicate nella Tabella 9.

Classe di resistenza secondo EN 338	Categoria di classificazione secondo la norma ÖNORM DIN 4074-1:1996	
	visiva	meccanica ¹
C16	S7	MS7
C24	S10	MS10
C30	S13	
C35		MS13
C40		MS17

Tabella 9: Assegnazione delle categorie di classificazione della norma ÖNORM DIN 4074-1:1996 nelle classi di resistenza della norma EN 338

5.4.3 Norme nazionali italiane

In Italia la classificazione visiva secondo le resistenza del legno strutturale avviene sulla base della UNI 11035:2003. La norma UNI 11035-1:2003 descrive la determinazione dei criteri di classificazione. La norma UNI 11035-2:2003 regola i criteri di classificazione per le diverse classi di resistenza in modo diverso per 3 gruppi di specie legnose:

- “Conifere 1” (Abete rosso, Abete bianco, Larice e alcune altre specie di Conifere) nelle tre S1, S2 e S3;
- “Conifere 2” (Douglasia) nelle due classi S1 e S2/S3;
- “Latifoglie” (Castagno, Quercia, Pioppo, Faggio, Ontano, Robinia, Frassino e Olmo) in un’unica classe S.

Divisi secondo le diverse classi di resistenza e secondo le diverse specie legnose vengono indicati i valori caratteristici.

Ulteriori informazioni sulla classificazione secondo la norma 11035:2003 si trovano nel Prontuario 1 (marzo 2004).

¹ Assegnazione secondo l’omologazione di un impianto di classificazione

6 Letteratura

BLASS, H. J.; AUNE, P.; CHOO, B. S.; GÖRLACHER, R.; GRIFFITHS, D. R.; HILSON, B. O.; RACHER, P.; STECK, G. (1995): Timber Engineering STEP 1 – Basis of design, material properties, structural components and joints

KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Erster Band. Springer Verlag, Berlin, zweite Auflage

MÄGDEFRAU, K. (1951): Botanik. Winters Studienführer, Winter-Verlag Heidelberg

MATTHECK, C. (1997): Design in der Natur. Rombach Wissenschaften, Reihe Ökologie Band 1, Rombach Verlag, 3. überarbeitete und erweiterte Neuauflage

NIEMZ, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH&Co., Leinfelden-Echterdingen

NOACK, D.; SCHWAB, E. (1986): Holz als Baustoff. In: HALÁSZ, R. von; SCHEER, C. (1986): Holzbau-Taschenbuch, Band 1: Grundlagen, Entwurf und Konstruktionen. Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 8. vollständig neubearbeitete Auflage

WAGENFÜHR, R. (1999): Anatomie des Holzes. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH&Co, Leinfelden-Echterdingen, 5. völlig überarbeitete Auflage

WIMMER, R. (2002): Forstnahe Holzforschung: Forschung an der Schnittstelle von Wald und Holz. Präsentation auf dem Knet-Fachseminar „Holzeigenschaften und Strukturhierarchy“, 23. Februar 2002

ZIMMERMANN, T.; SELL, J. (1997): Das Feingefüge der Zellwand auf Querbruchflächen von längszugbeanspruchten Laubhölzern. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/35, EMPA Abteilung Holz, Mai 1997