

LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN LEGNO

Parte 2:

LE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL LEGNO



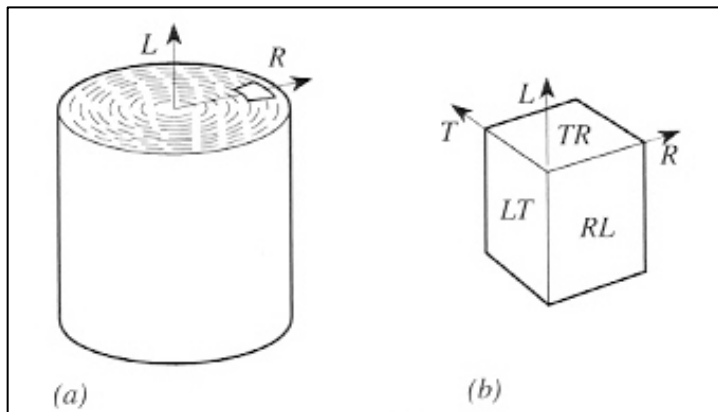
Le caratteristiche meccaniche del legno

Anisotropia del legno

Definizione degli assi principali

Per la resistenza si considerano solo 2 direzioni di sollecitazione:

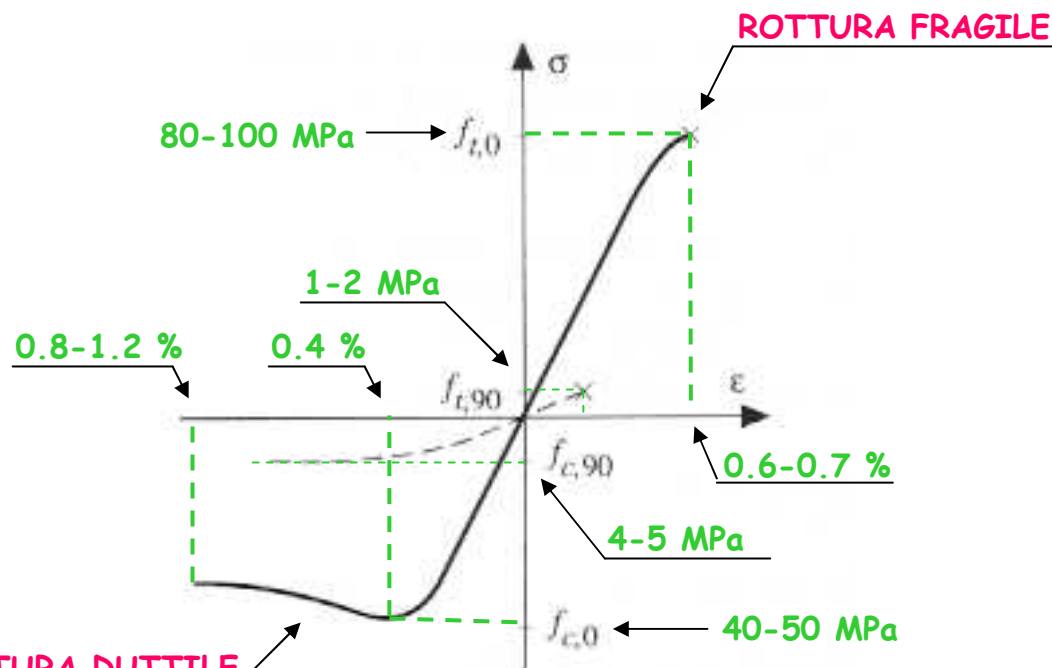
- parallela alla fibratura (L)
- ortogonale alla fibratura (R=T)



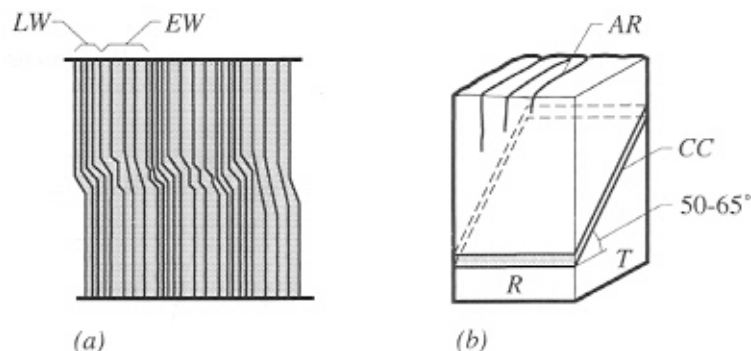
Legno NETTO
sollecitato a
trazione e
compressione

—————
parallela alla fibratura

- - - - -
ortogonale alla fibratura



Le caratteristiche meccaniche del legno



Compression failure at $f_{c,0}$. Buckling of fibres. (Hoffmeyer, 1990). LW latewood, EW earlywood, AR annual rings, CC compression creases.



8 Microfotografia ($\times 35$) dell'inizio di rottura per compressione assiale in un provino di Abete bianco (Foto Giordano, 1970).

La rottura a compressione parallela alla fibratura

Le fibre si plasticizzano progressivamente fino all'instabilizzazione

La rottura avviene lungo direzioni inclinate (piani di clivaggio)

Le caratteristiche meccaniche del legno

La rottura a
compressione di
provini di
legno netto

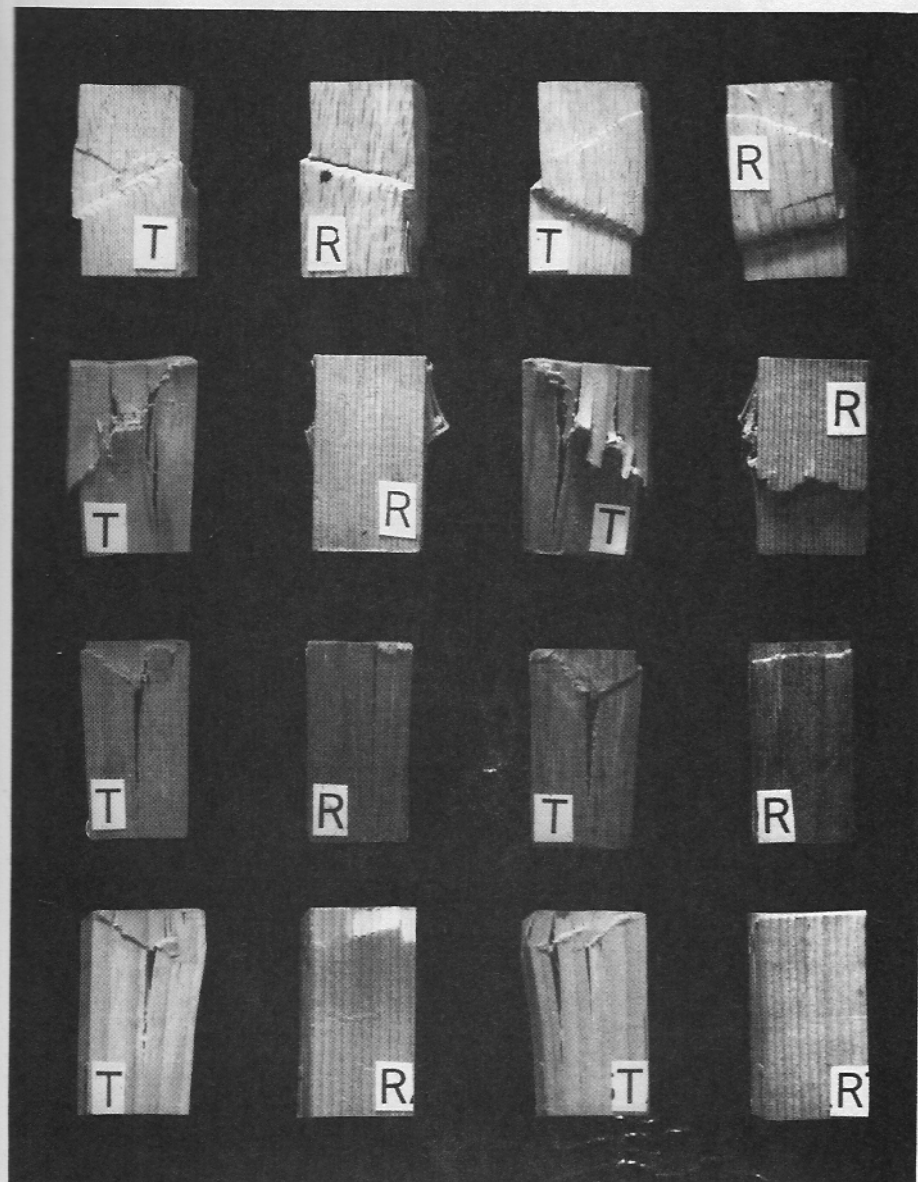
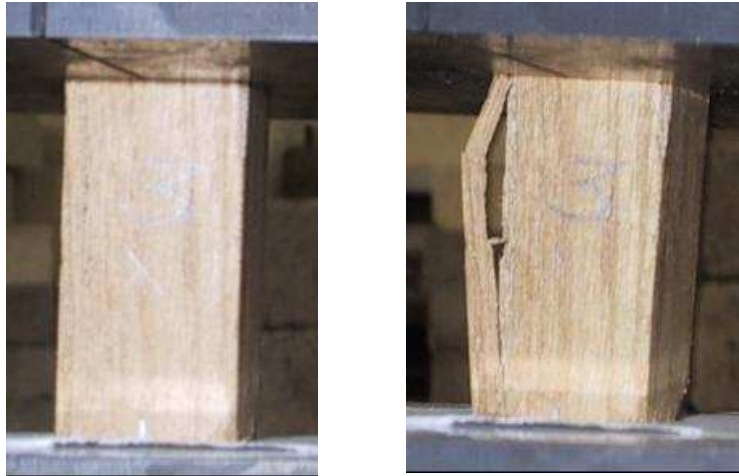


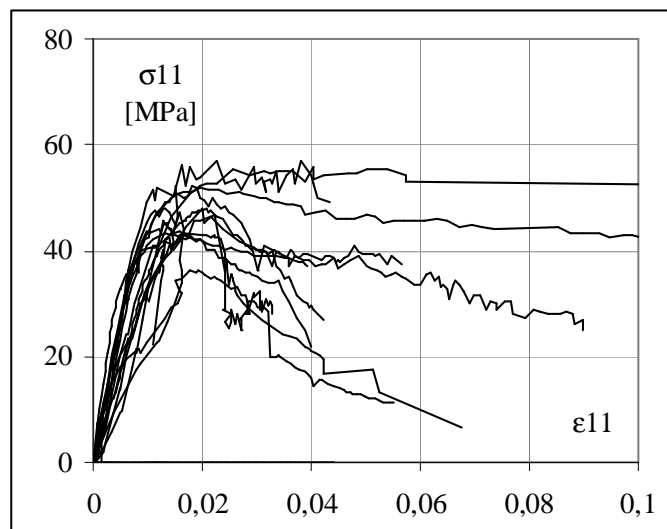
Fig. 2.13 Deformazioni di rottura apparenti sulle quattro facce di provini di dimensioni UNI ($2 \times 2 \times 4$ cm) condizionati ad umidità normale e sollecitati a compressione assiale: le lettere T ed R indicano rispettivamente le facce tangenziali e quelle radiali. Specie legnose (dall'alto verso il basso): 1^a fila Rovere, 2^a fila Larice, 3^a fila Robinia, 4^a fila Abete rosso (Foto Giordano, 1989).

Le caratteristiche meccaniche del legno

La prova a compressione assiale parallela alla fibratura



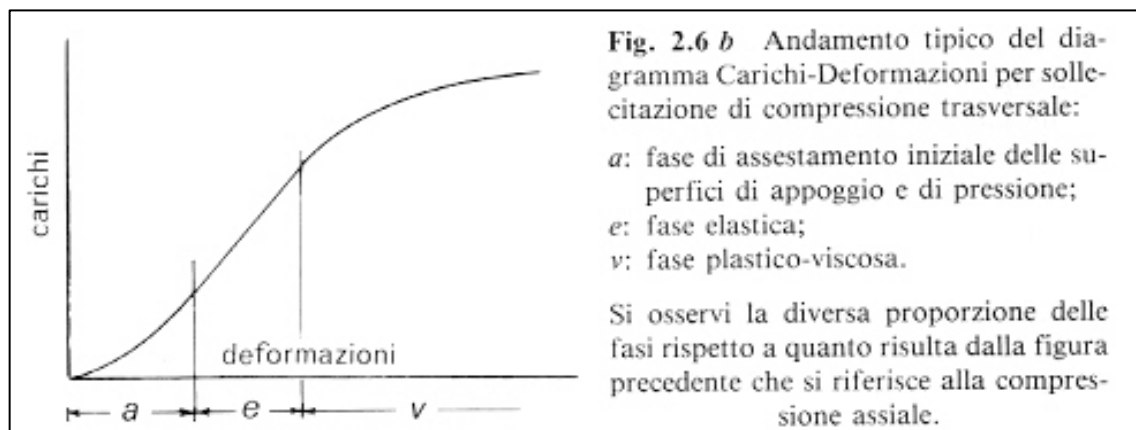
Il provino prima e
dopo la prova



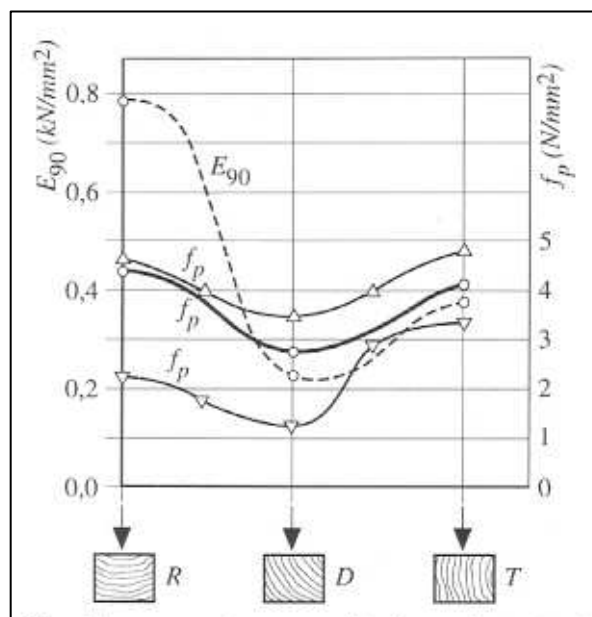
Il diagramma σ - ε
sperimentale

Le caratteristiche meccaniche del legno

La compressione ortogonale alla fibratura (trasversale)



Il comportamento è di tipo elasto-plastico viscoso

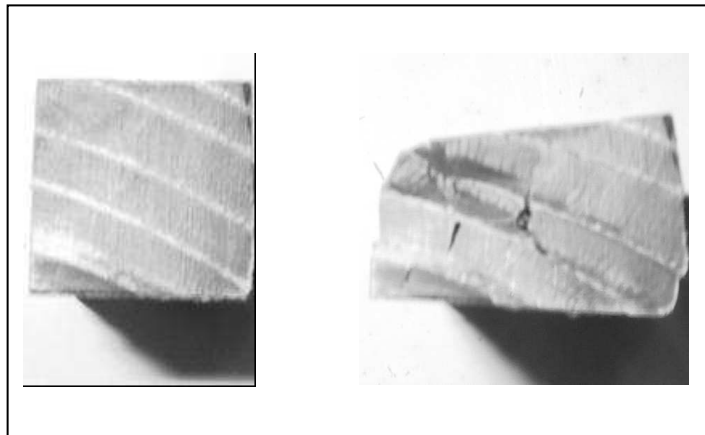


Il comportamento è diverso in direzione radiale e tangenziale

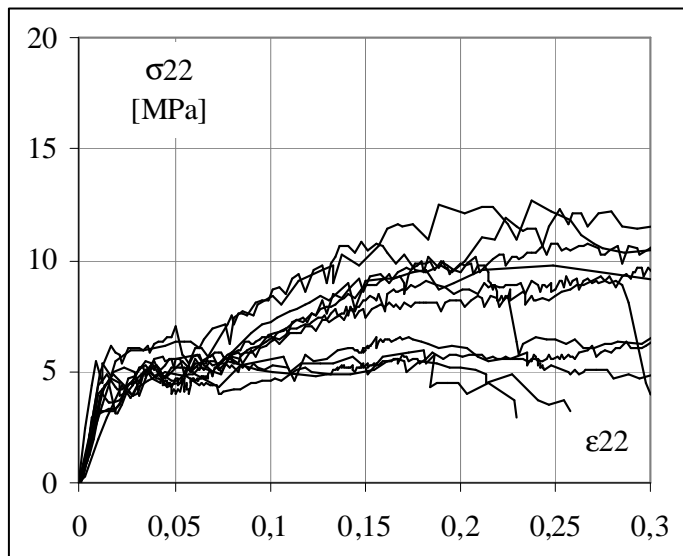
La resistenza è minima in direzione diagonale

Le caratteristiche meccaniche del legno

La prova a compressione assiale ortogonale alla fibratura in direzione radiale



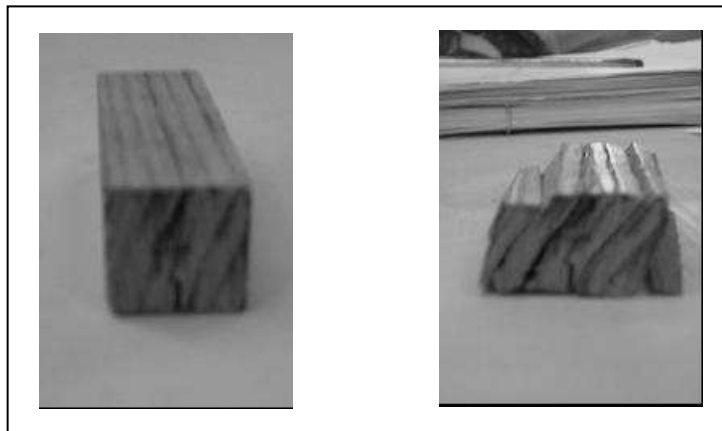
Il provino prima e
dopo la prova



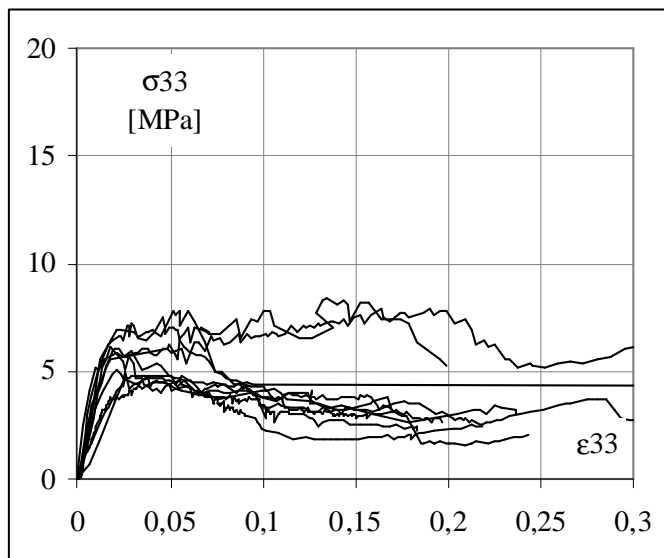
Il diagramma σ - ϵ
sperimentale

Le caratteristiche meccaniche del legno

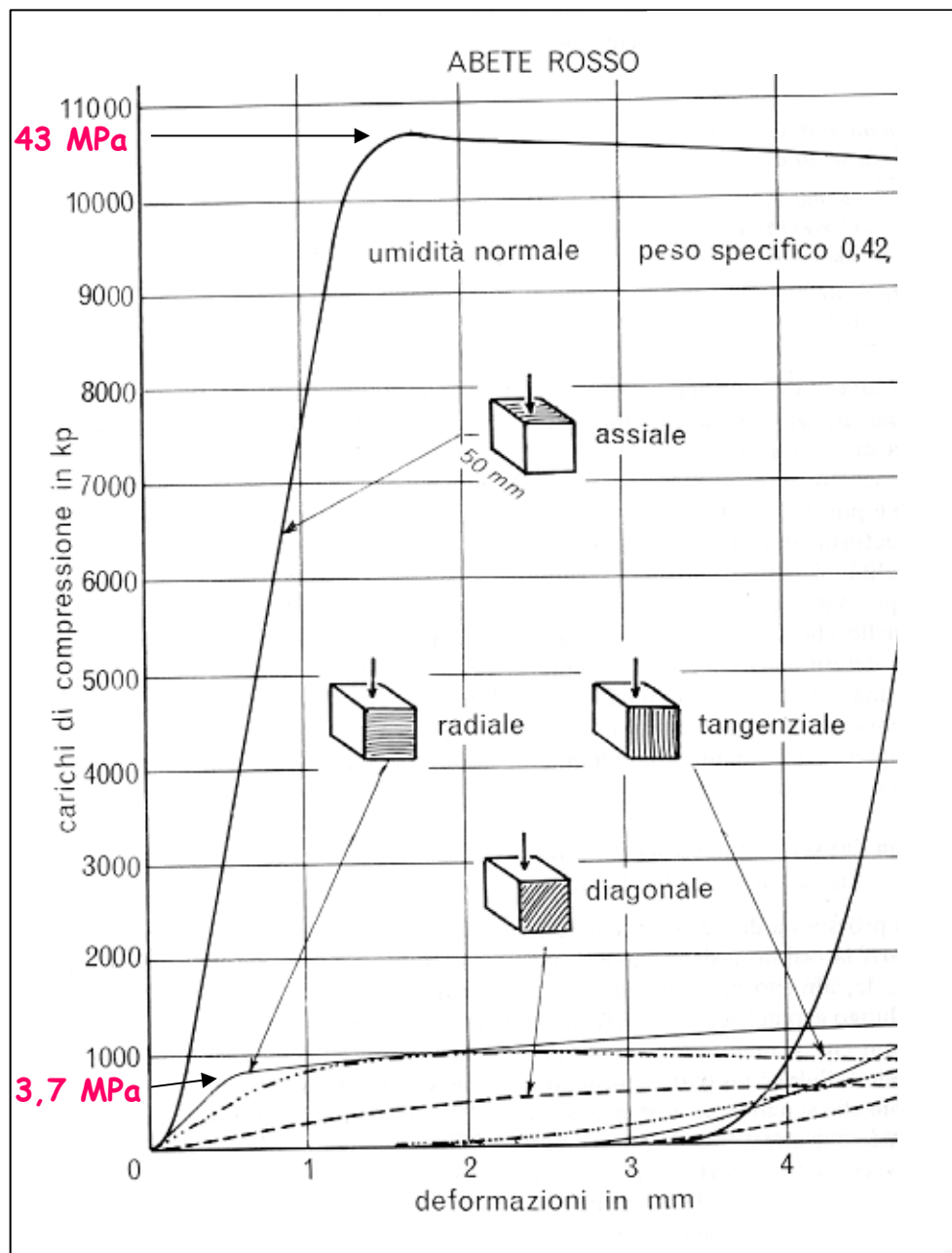
La prova a compressione assiale ortogonale alla fibratura in direzione tangenziale



Il provino prima e
dopo la prova



Il diagramma σ - ϵ
sperimentale

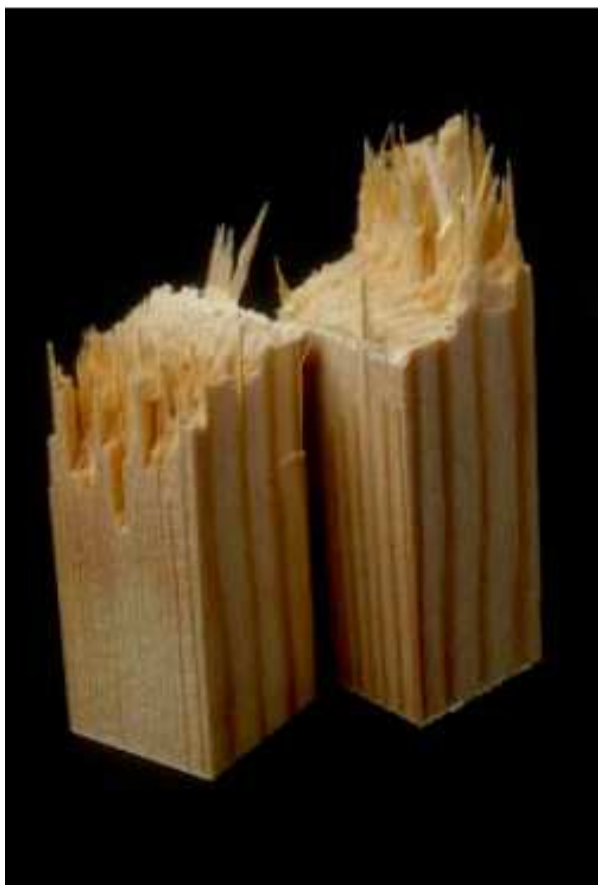


Le caratteristiche
meccaniche del
legno

Il comportamento a
compressione al
variare della
direzione del carico

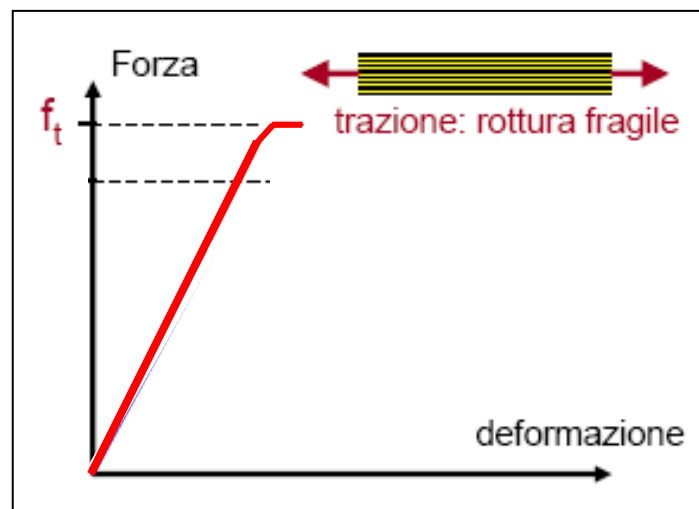
Le caratteristiche meccaniche del legno

La rottura a trazione parallela alla fibratura



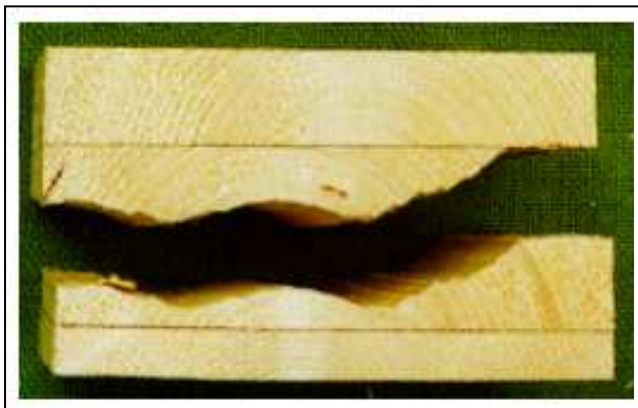
Il provino di legno
netto dopo la prova

Il diagramma σ - ε
sperimentale



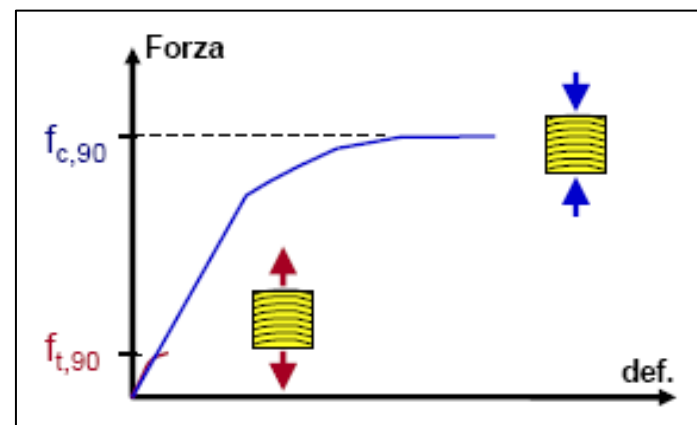
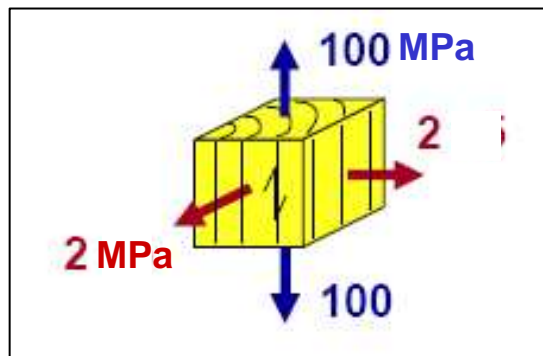
Le caratteristiche meccaniche del legno

La trazione ortogonale alla fibratura (trasversale)



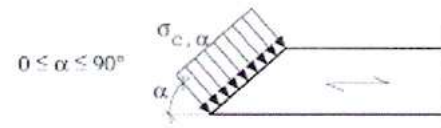
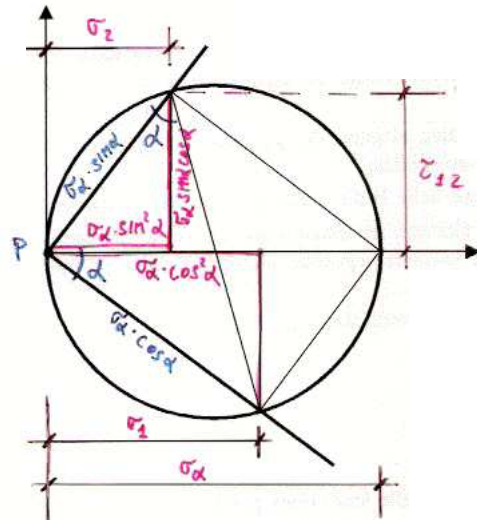
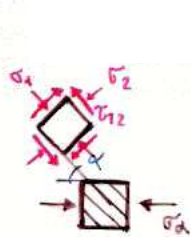
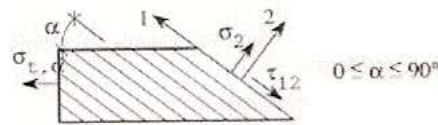
Il provino di legno
netto dopo la prova

La rottura è fragile ed
improvvisa con valori molto
bassi di resistenza

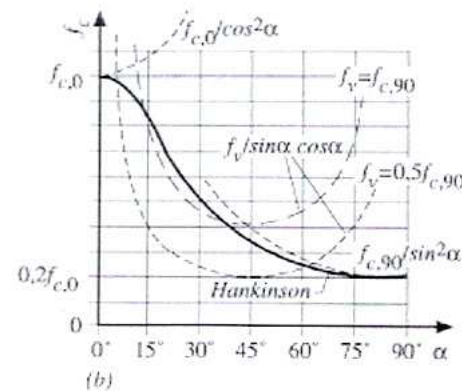


Il carico inclinato rispetto alla fibratura

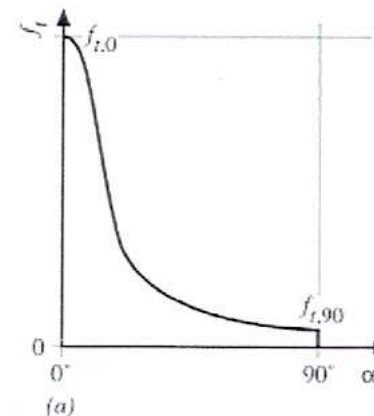
Il cerchio di Mohr e la curva di Hankinson



$$f_{c\alpha} = \frac{f_{c0} f_{c90}}{f_{c0} \sin^2 \alpha + f_{c90} \cos^2 \alpha} \quad (\text{HANKINSON})$$



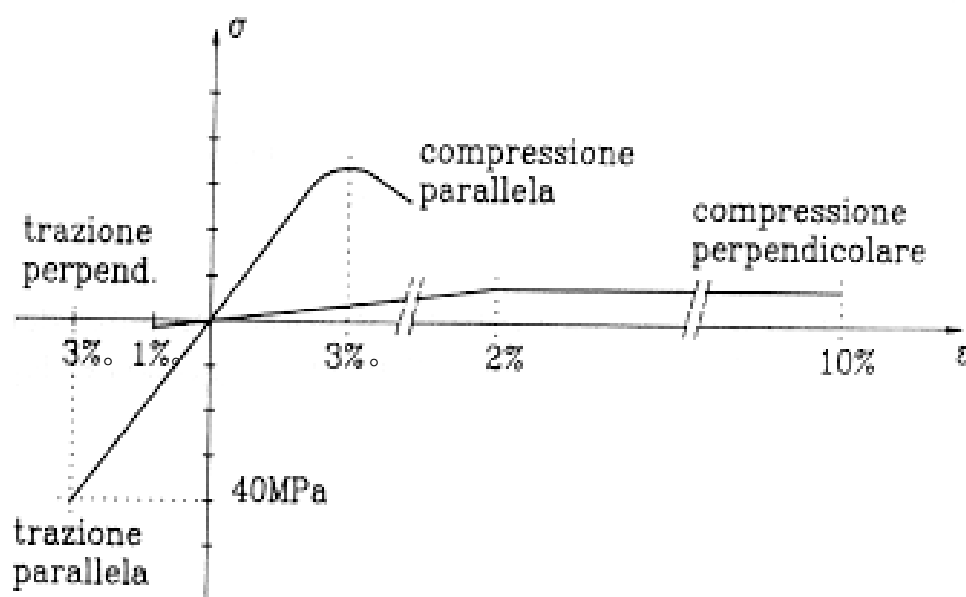
Compressione



Trazione

Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a trazione e compressione



Andamento della legge tensioni-deformazioni per il legno in dimensioni d'uso delle strutture.

Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a trazione parallela alle fibre

L'influenza dei difetti sulla resistenza a trazione

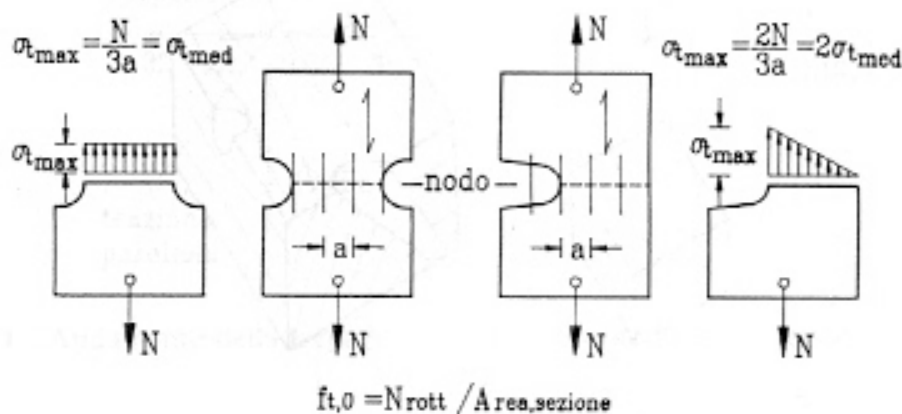
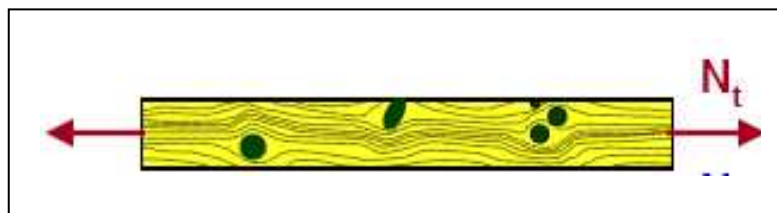


Fig. 3.9 Resistenza a trazione parallela: in funzione della posizione del difetto lo stato tensionale nella sezione cambia e la resistenza a rottura della sezione (fragile) può ridursi notevolmente. Infatti l'azione di sforzo normale necessaria per la rottura è minore quando il baricentro effettivo non coincide con quello teorico.

Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a trazione parallela alle fibre



La rottura a trazione
(fragile) avviene sempre in
corrispondenza dei difetti

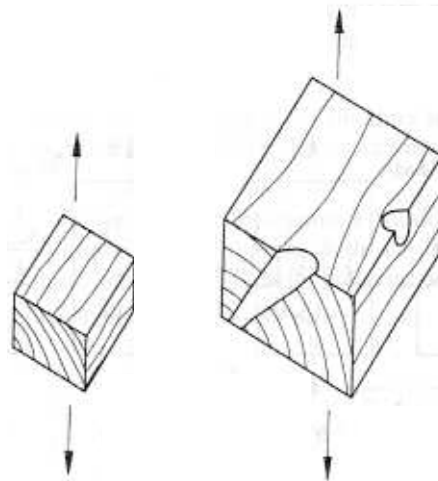


Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a trazione ortogonale alle fibre

L'influenza dei difetti sulla resistenza a trazione ortogonale

L'EFFETTO VOLUME

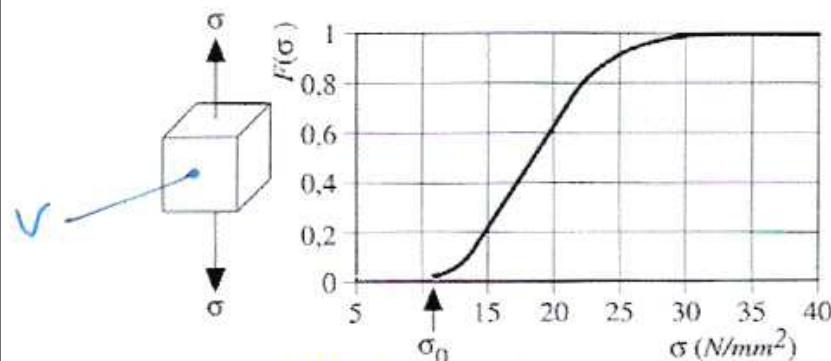


Più grande è il volume sollecitato minore è la resistenza specifica a causa della presenza dei difetti naturali del legno.

- TEORIA DI WEIBULL

$$P_f(\sigma) = 1 - e^{-V \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{m} \right)^k}$$

3 parametri
(σ_0, m, k)



PROBABILITA' CUMULATA DI ROTTURA
PER UN VOLUME DI RIFERIMENTO V

per $\sigma_0 = 0 \rightarrow 2$ parametri

$$K_{red} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/k}$$

$$V_0 = 0.01 \text{ m}^3$$

$$1/k = 0.2$$

- EFFETTO DIMENSIONE

PER LA FLESSIONE E LA TRAZIONE PARALLELA

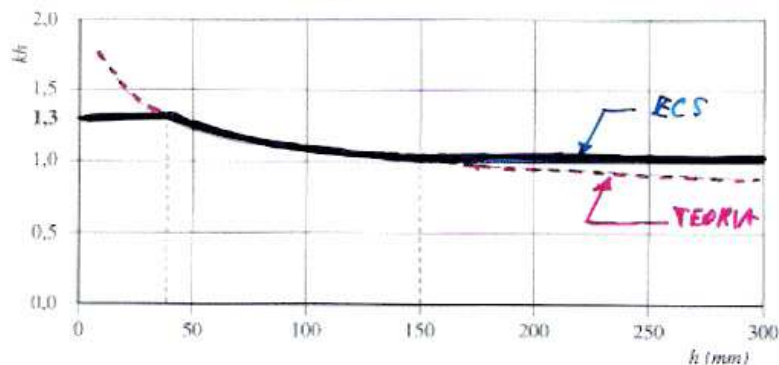
$$h_{ref} \text{ (o } b_{ref}) = \begin{cases} 150 \text{ mm} & \text{legno massiccio} \\ 600 \text{ mm} & \text{legno lamellare} \end{cases}$$



$$\bullet \text{ se } h < h_{ref} \text{ (o } b < b_{ref}) \begin{cases} f'_{m,y,k} = f_{m,y,k} \cdot K_h \\ f'_{t,g,k} = f_{t,g,k} \cdot K_h \end{cases}$$

$$K_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1,3 \right\}$$

$$K_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,1 \right\}$$



EC5 size factor for solid timber in bending or tension (solid line), related to theory (dashed line).

Le caratteristiche
meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE

Trazione e flessione
parallele alla fibratura

Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a compressione parallela alle fibre

L'influenza dei difetti e delle modalità di prova sulla resistenza a compressione parallela alla fibratura

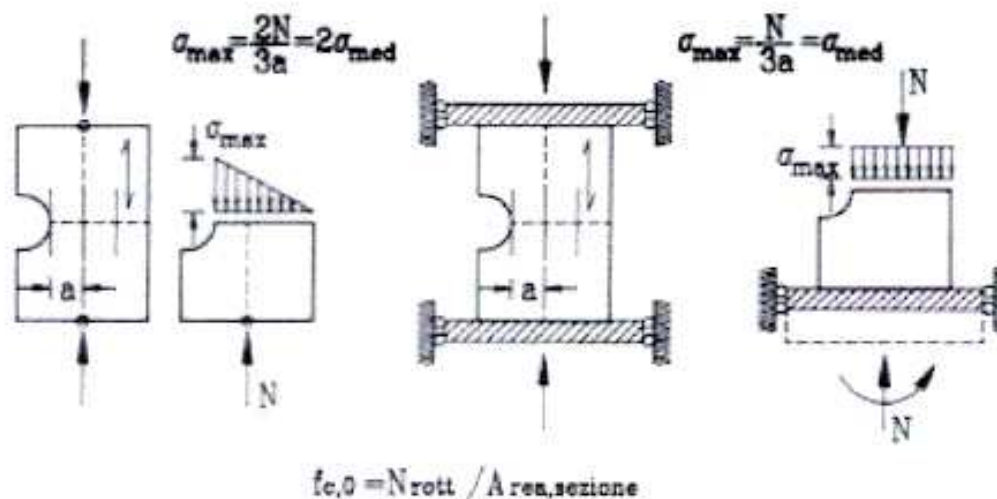
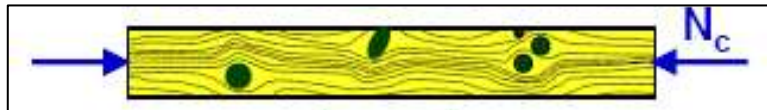


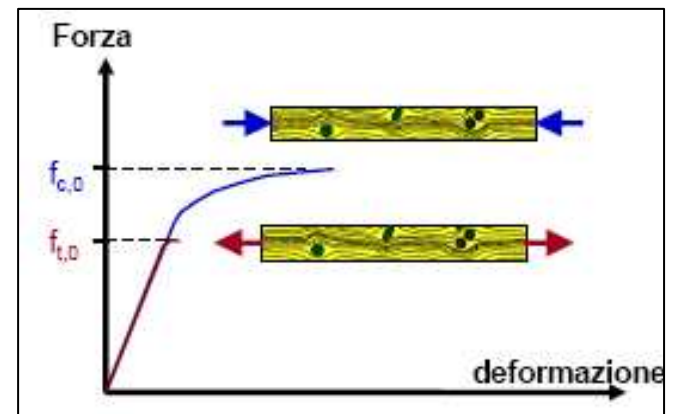
Fig. 3.12 Resistenza a compressione parallela: nel caso di piastre di carico vincolate a restare orizzontali, l'azione di sforzo normale necessaria per la rottura è maggiore che nel caso di piastre snodabili.

Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a compressione parallela alle fibre



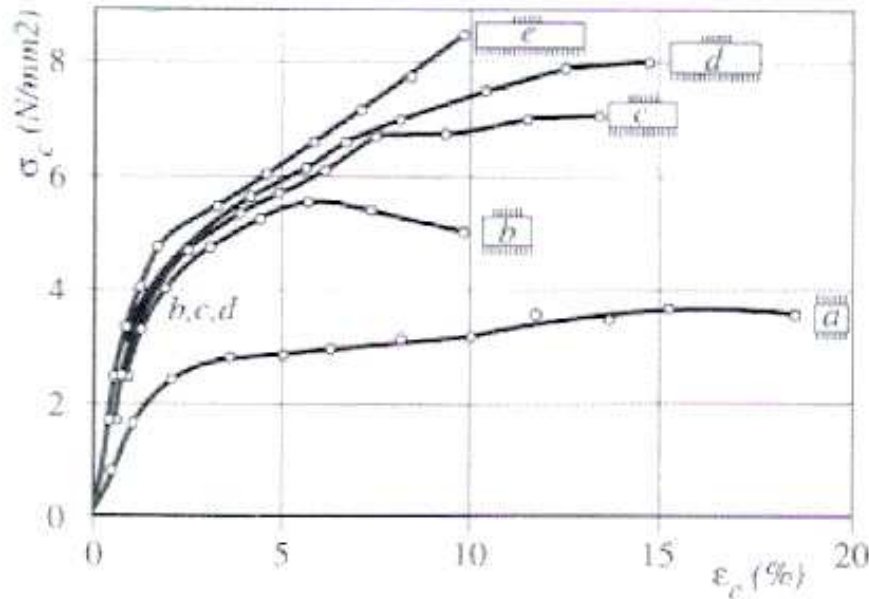
La rottura a compressione non è influenzata in modo determinante dai difetti



Le caratteristiche meccaniche del legno

Legno STRUTTURALE sollecitato a compressione ortogonale alle fibre

L'influenza della larghezza della zona caricata - Carichi concentrati



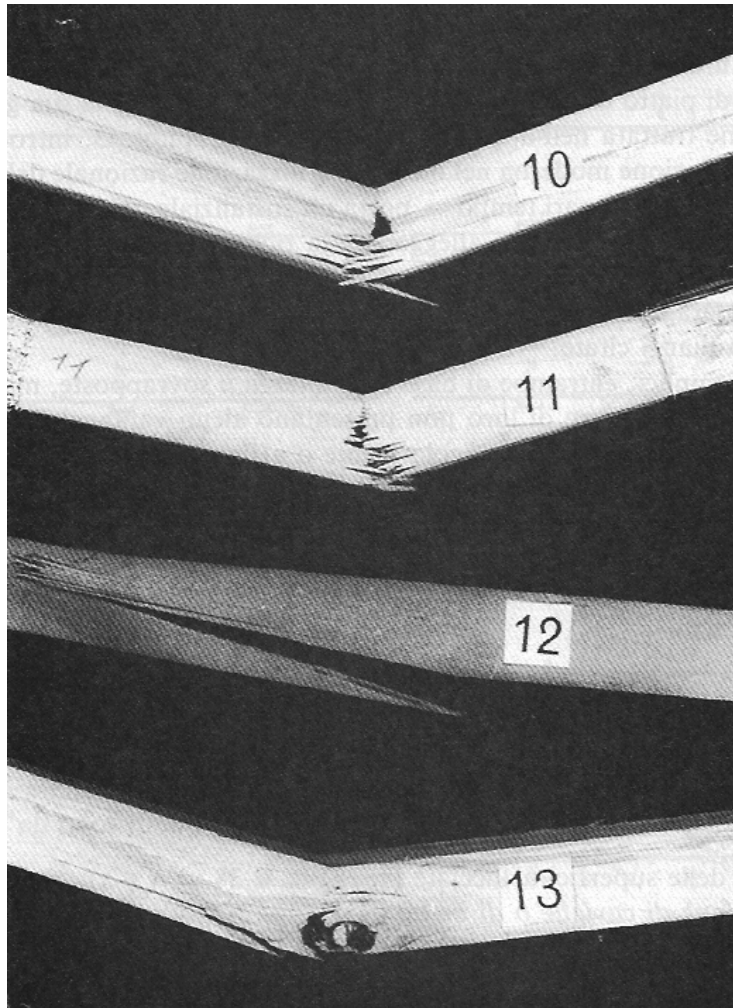
Applied stress perpendicular to the grain vs. vertical compressive strain from tests on timber 15 x 15 cm². Suenson (1938).

$$\sigma_{c,90} \leq K_{c,90} \cdot f_{c,90}$$

↳ coefficiente incrementativo

Le caratteristiche meccaniche del legno

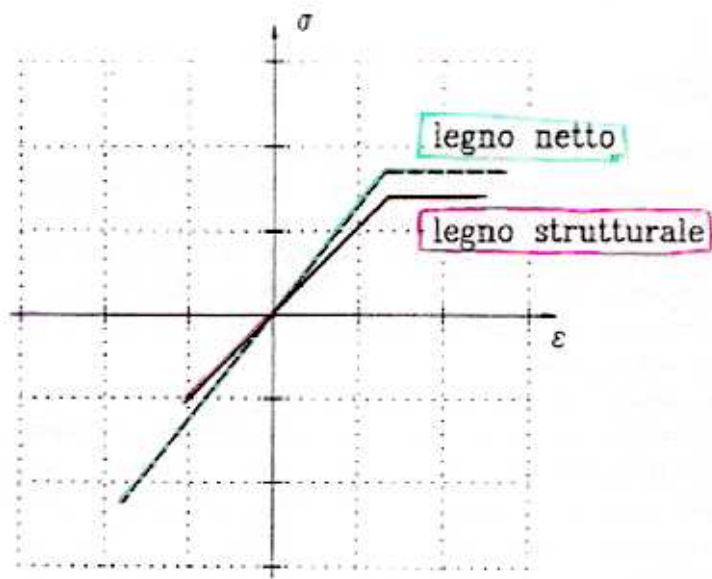
La resistenza a flessione



La rottura a flessione di provini in legno di buona qualità (I e II) e con difetti (III e IV)

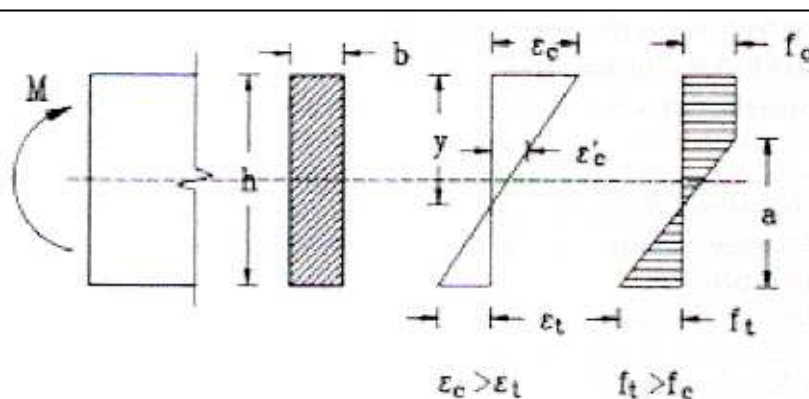
Le caratteristiche meccaniche del legno

La resistenza a flessione



Il diagramma tens.-deform. idealizzato per legno netto e legno strutturale

La distribuzione delle tensioni a rottura nel legno NETTO
Il comportamento è duttile

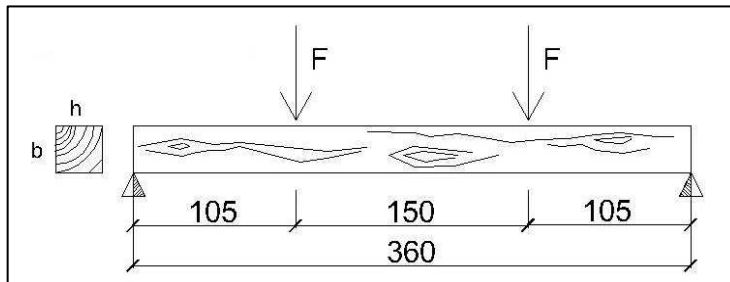


$$f_{mr} = f_c \left[3 - \frac{4f_c}{f_c + f_t} \right]$$

Resistenza flessione

Prove di rottura a flessione su provini di legno NETTO

Lo schema della prova

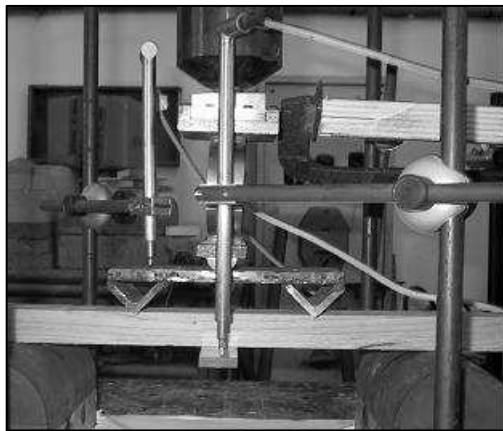


Le dimensioni dei provini

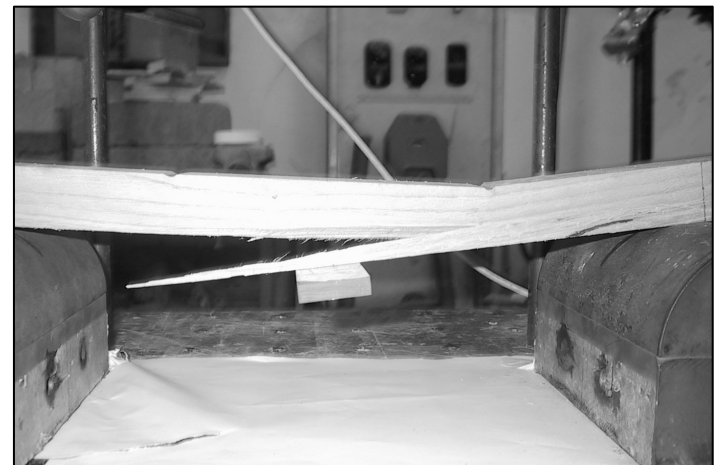
Table 2. Main dimensions of tested specimens.

Specimen	span L [mm]	cross section		loading scheme
		width b [cm]	depth h [cm]	
A	360	3,08	2,88	a
B	300	3,00	3,10	b
C	300	2,48	2,50	b

L'elemento ligneo prima della prova

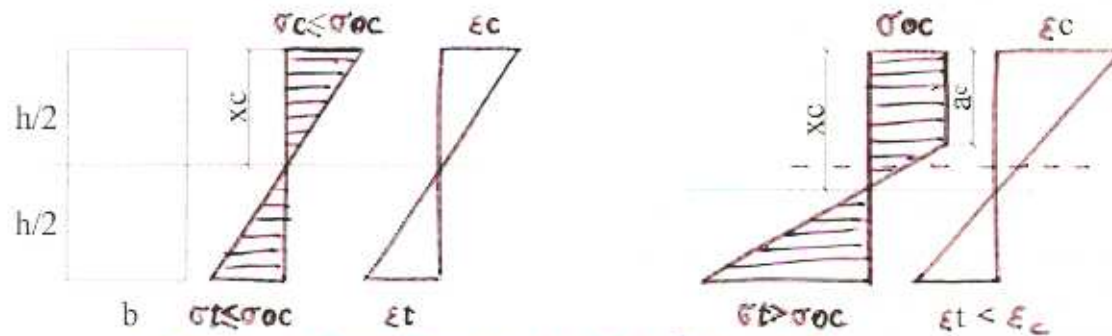


La rottura del provino in zona tesa



Prove di rottura a flessione su provini di legno NETTO

La determinazione della resistenza a trazione e delle ε di rottura a trazione e a compressione



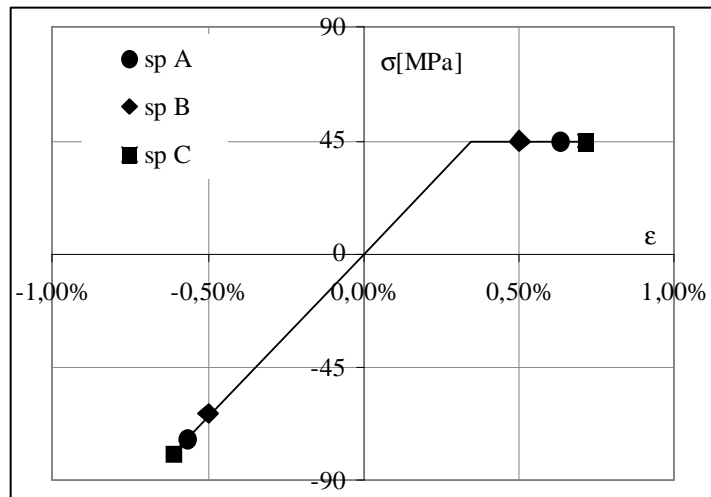
- DALLE PROVE SI È AVUTO $\sigma_{fl} \rightarrow M_{max}$
 - SI CONOSCE σ_{oc} e E_0
 - NON SI CONOSCE σ_b
 - SI RICAVALA $\sigma_b, \varepsilon_b, \varepsilon_c$
- CONSERVAZIONE SEZ. PIANE

Table 3. Main values of stress and strain in the mid-span cross section.

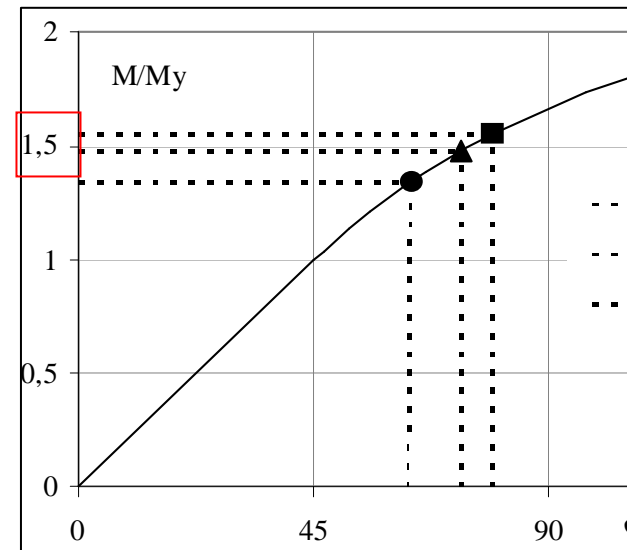
Specimen	M_{max} [kNm]	$\sigma_{fl,el}$ [MPa]	σ_t [MPa]	ε_t [%]	ε_c [%]	E_0 [MPa]	σ_c [MPa]
A	28.30	66.45	73.20	0.56	0.63	13000	45,0
B	28.95	60.20	63.40	0.49	0.52	15000	45,0
C	17.45	69.80	79.20	0.61	0.71	15000	45,0

Prove di rottura a flessione su provini di legno NETTO

Il diagramma σ - ε
teorico-sperimentale



Il coefficiente di forma.
Incremento di resistenza
per effetto della
plasticizzazione



$$M_y = M (\sigma_c = \sigma_{co} = 45 \text{ MPa})$$

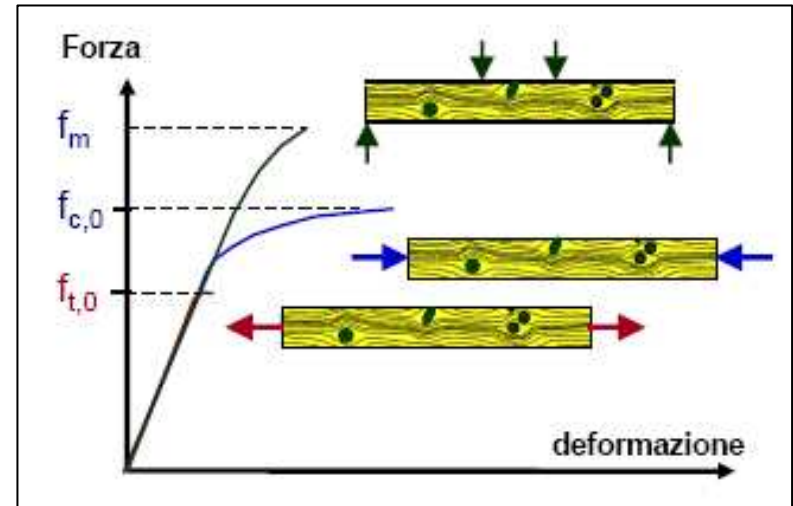
La resistenza a flessione di elementi in legno STRUTTURALE (in dimensioni d'uso)

La rottura a flessione è di tipo fragile e avviene di regola dal lato della parte tesa



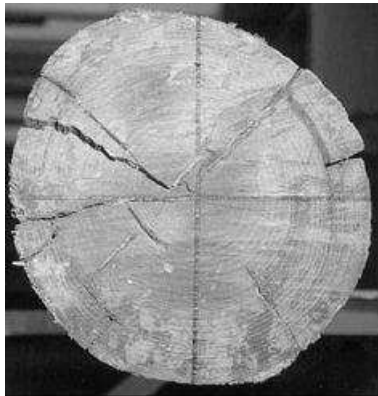
I difetti influenzano in modo diverso le varie resistenze

La resistenza a flessione
 $f_m = M/W$
è in genere \geq di quella a compressione

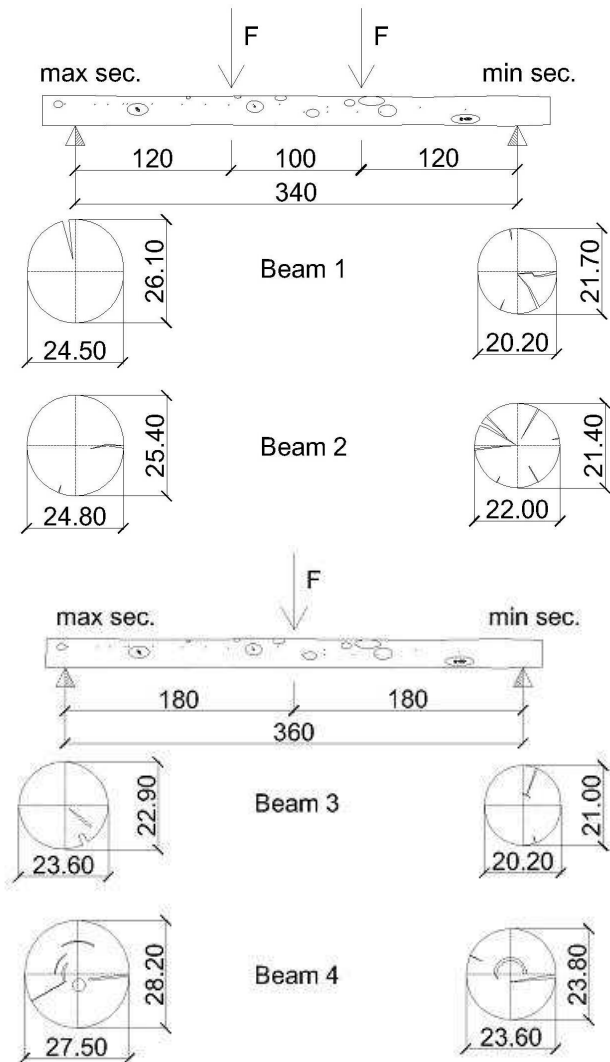


Prove a flessione su travi REALI di castagno

I difetti tipici

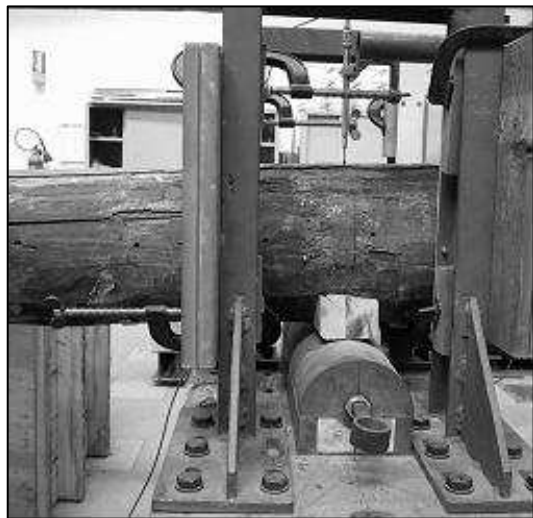


Gli schemi delle prove

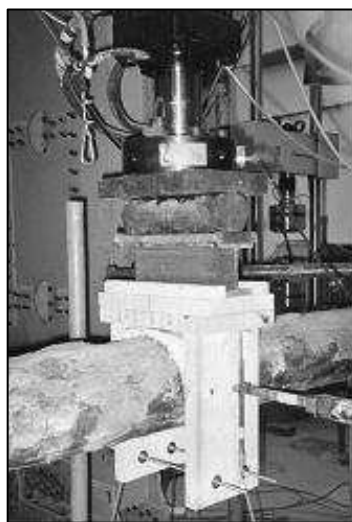


Prove a flessione su travi REALI di castagno

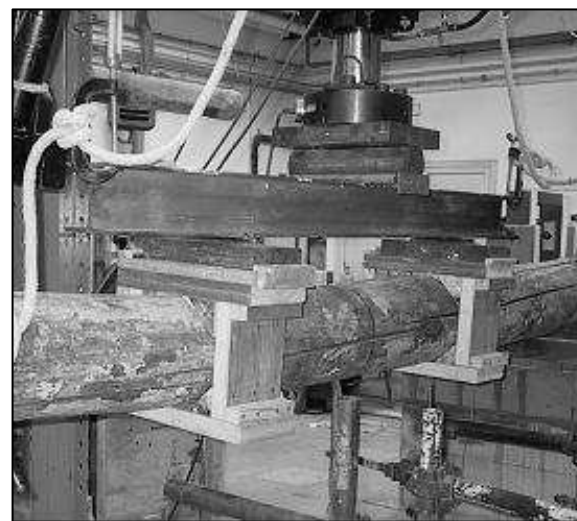
Dettagli delle travi prima della prova



Il sistema di appoggio
a cerniera



Le zone di applicazione
dei carichi

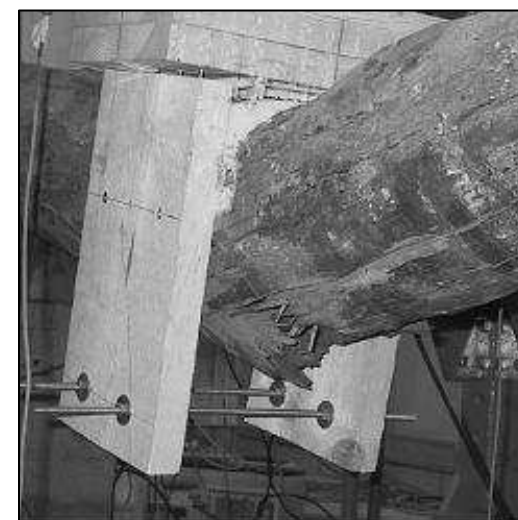


Prove a flessione su travi REALI di castagno

Le modalità di rottura



La rottura a
flessione



Prove a flessione su travi REALI di castagno

Le modalità di rottura

La rottura a taglio

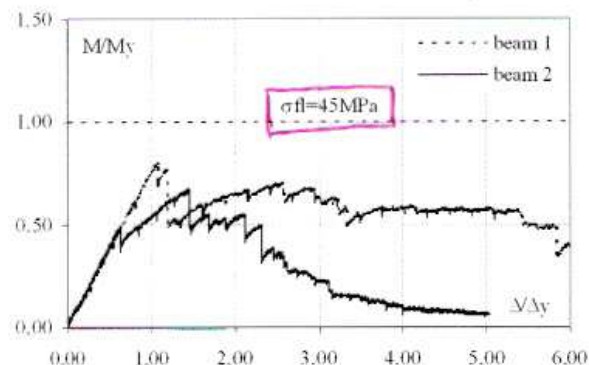


Prove a flessione su travi REALI di castagno

I risultati

I diagrammi
 $M/M_y - \Delta/\Delta_y$

Le tensioni di
flessione a rottura



$$\sigma_{c,0} = 45 \text{ MPa}$$

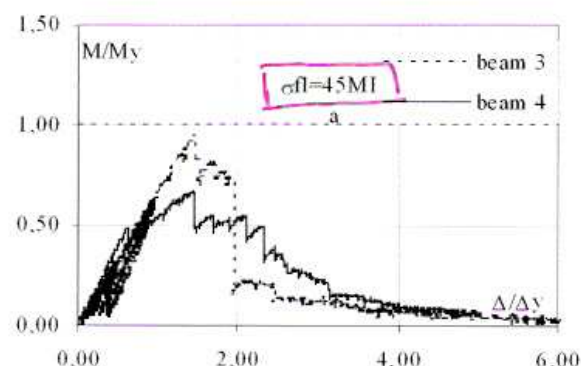


Table 7. Main values of flexural resistance.

beam	r_m [cm]	W [cm ³]	$\sigma_{fl,max}$ [MPa]	M_y [kNm]	T_y [kN]	
1	11.80	1290	36.5	58.04	48.37	} ROTTURA A TAGLIO
2	12.60	1570	30.5	70.66	58.89	
3	11.35	1148	43.0	51.65	28.69	→ ROTTURA A FLESSIONE
4	13.00	1725	34.7	77.61	43.12	→ ROTTURA A TAGLIO

Le caratteristiche meccaniche del legno

La resistenza a flessione composta

Il dominio di resistenza

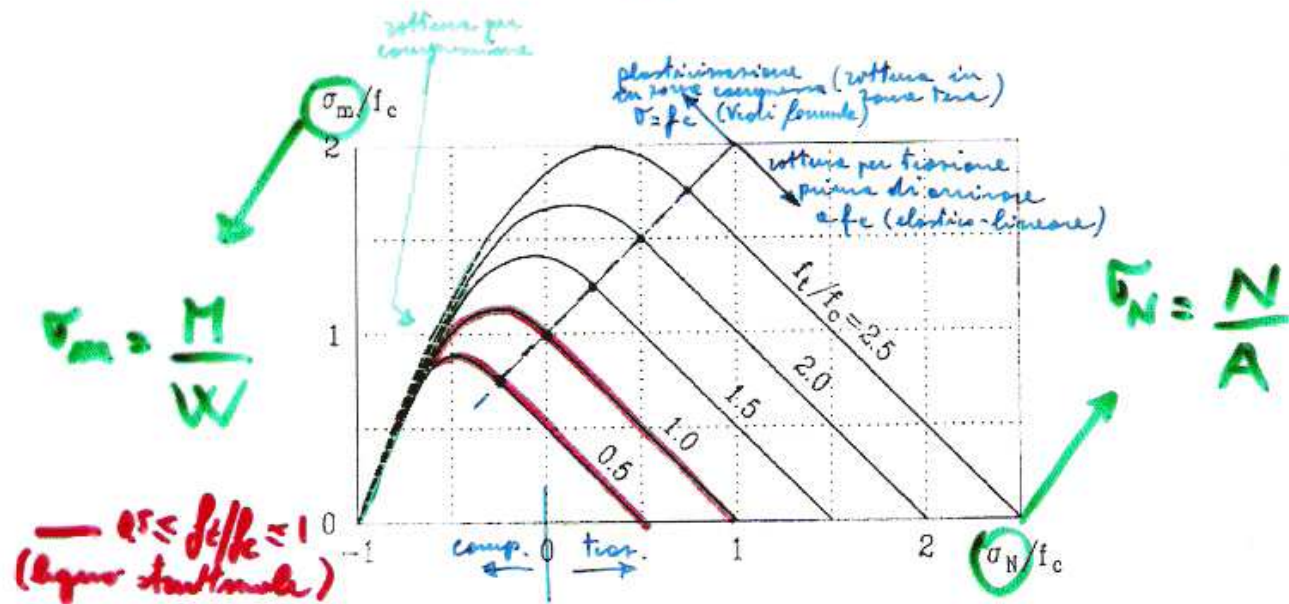
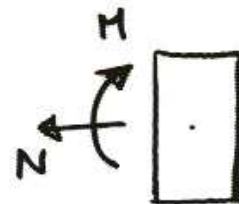


Fig. 3.17 Domini di rottura per sezione di legno inflessa e sottoposta contemporaneamente a trazione o compressione prescindendo da fenomeni di instabilità dell'equilibrio (Larsen e Riberholdt, 1982).



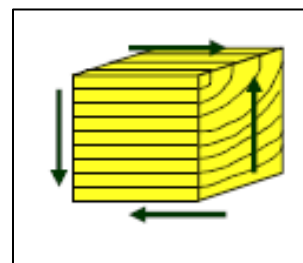
$$f_m = 3(\sigma_N + f_c) - \frac{4(\sigma_N + f_c)^2}{(f_c + f_t)}$$

Le caratteristiche meccaniche del legno

La resistenza a taglio in direzione parallela alla fibratura



La rottura a taglio è in genere di tipo fragile



Non si formano lesioni diagonali

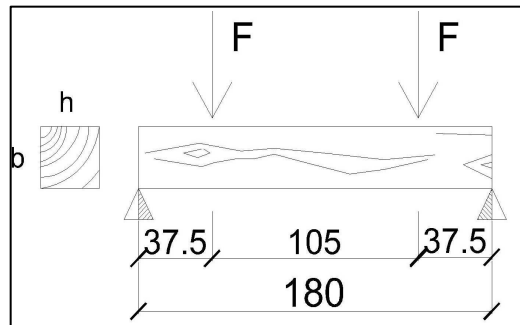
La rottura avviene per scorrimento in corrispondenza degli anelli di accrescimento

Le caratteristiche meccaniche del legno

La resistenza a taglio

Prove di rottura a taglio su provini di legno NETTO

Lo schema della prova



Le dimensioni dei provini

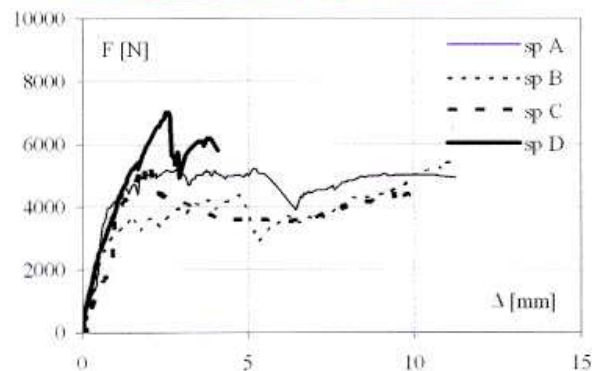
Table 4. Main dimensions of tested specimens.

Specimen	span L [mm]	cross section	
		width b [cm]	depth h [cm]
A	180	2.37	2.40
B	180	2.40	2.40
C	180	2.38	2.40
D	180	2.30	2.40



La rottura del provino a taglio con scorrimento

DIAGRAMMI F- Δ - RISULTATI



DIAGRAMMI ADIMENSIONALI M/M_y - Δ

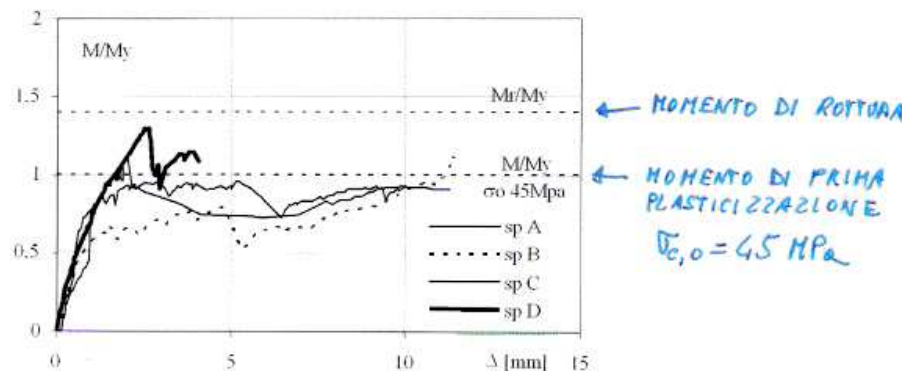


Table 5. Maximum shear force and corresponding maximum tangential stress in the cross-section.

Specimen	T_{\max} [kN]	τ_{\max} [MPa]
A	2.63	6.90
B	2.20	5.70
C	2.74	7.80
D	3.52	9.35

$$\tau_{\text{med}} = 7.44$$

Prove a taglio su
provini di legno
NETTO

I risultati

I diagrammi

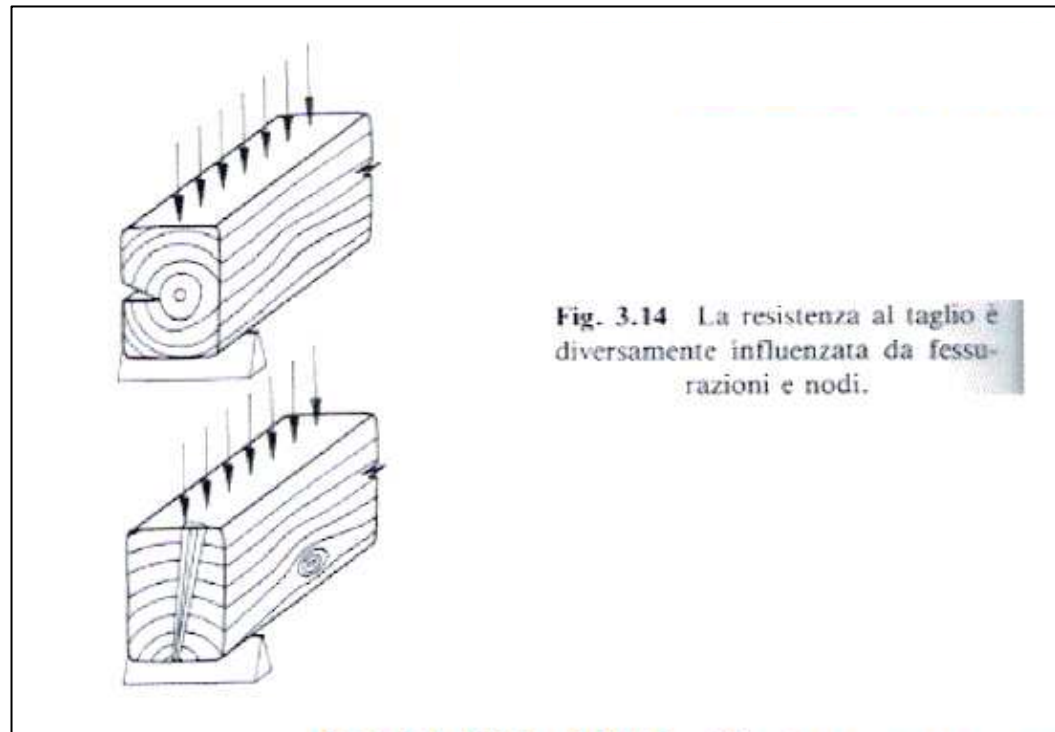
M/M_y - D

Le tensioni di taglio
a rottura

Le caratteristiche meccaniche del legno

La resistenza a taglio per il legno STRUTTURALE

L'influenza dei difetti sulla resistenza a taglio

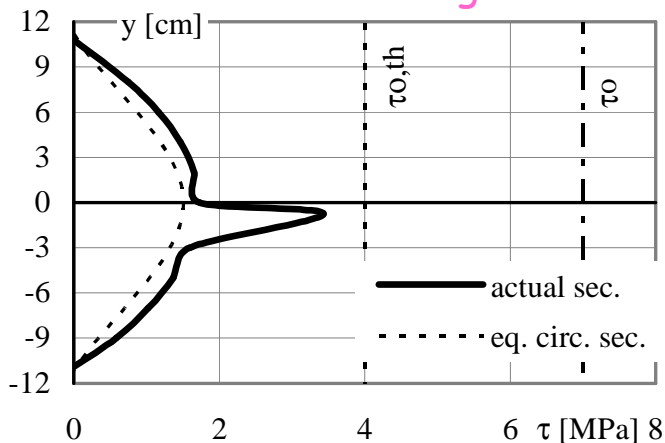


Le caratteristiche meccaniche del legno

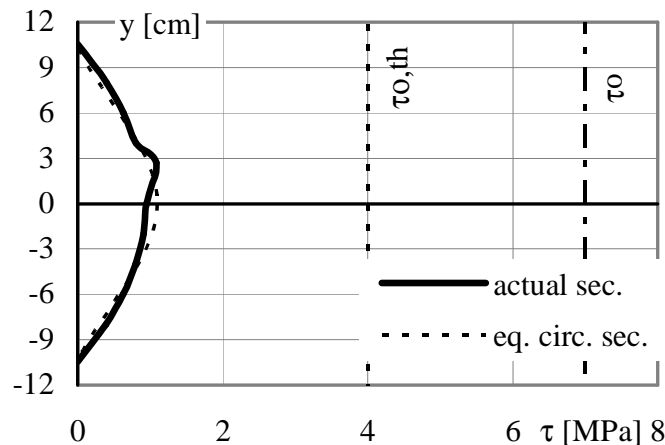
La resistenza a taglio per legno STRUTTURALE

I diagrammi delle τ nelle travi reali

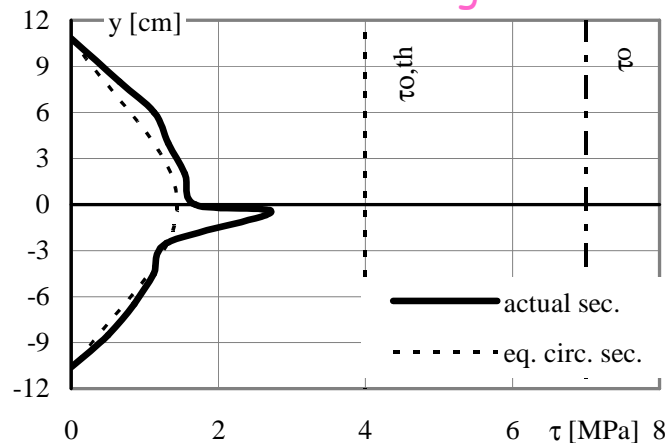
rottura a taglio



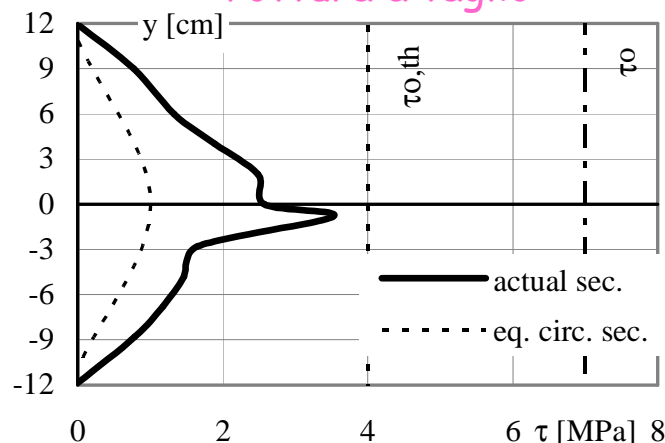
rottura a flessione



rottura a taglio



rottura a taglio



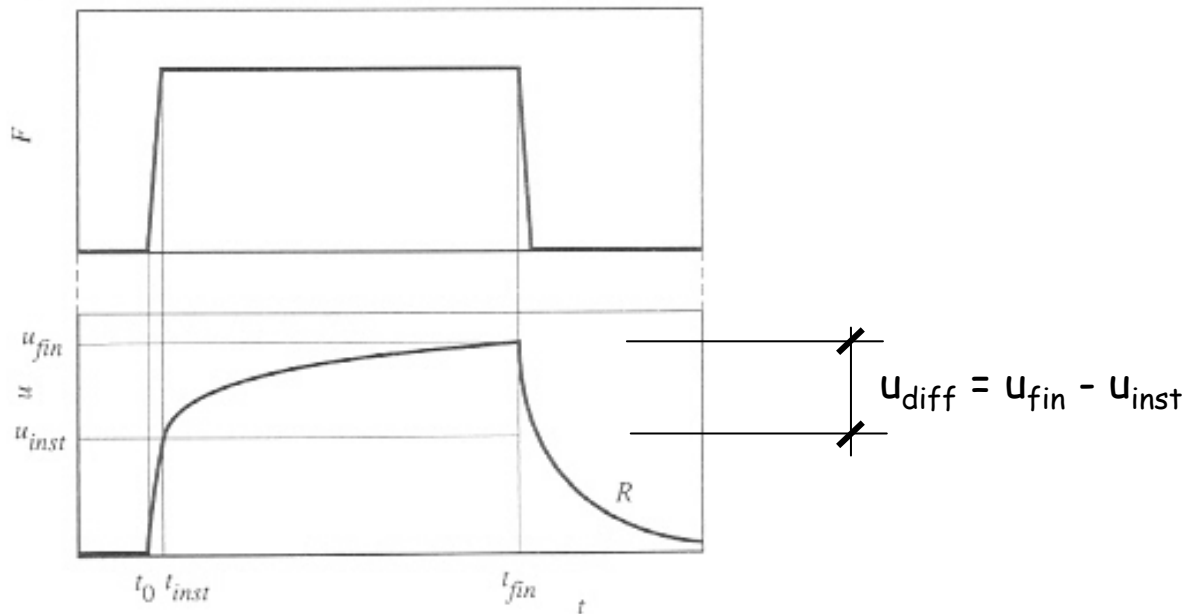
τ_0 = resistenza a taglio per legno NETTO

$\tau_{0,th}$ = resistenza a taglio per legno STRUTTURALE

Le caratteristiche meccaniche del legno

Il comportamento deformativo

IL CREEP nel legno

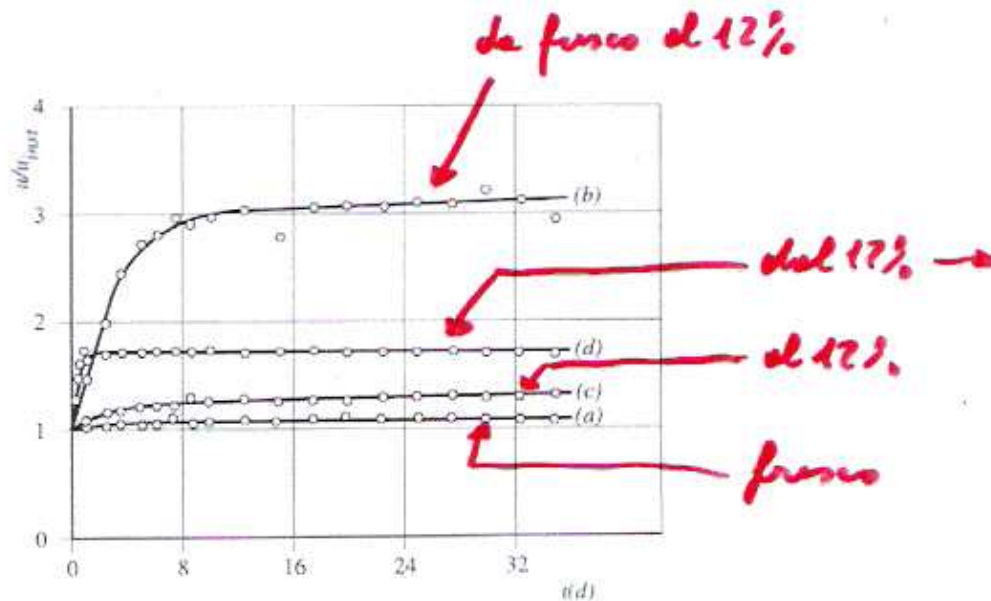


A schematic representation of viscoelastic behaviour of a material. u is the deformation, F the load and t the time. Creep at time t_{fin} is $u_{fin} - u_{inst}$. R is the recovery.

Le caratteristiche meccaniche del legno

Il comportamento deformativo

I fattori che influenzano il CREEP del legno



Relative deformation-time curves for beams at different moisture conditions. A, green timber kept green; B, green timber drying to 12% moisture content; C, timber kept at 12% moisture content; D, timber initially at 12% moisture content allowed to absorb moisture. $t(d)$ is time in days. Alpine ash, 24% of average short term strength. $T=25^{\circ}\text{C}$. (Armstrong and Kingston, 1962).

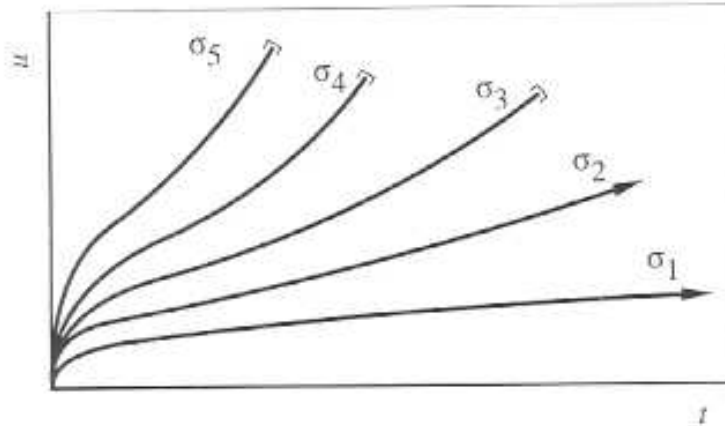
L'umidità e le variazioni di umidità

Le caratteristiche meccaniche del legno

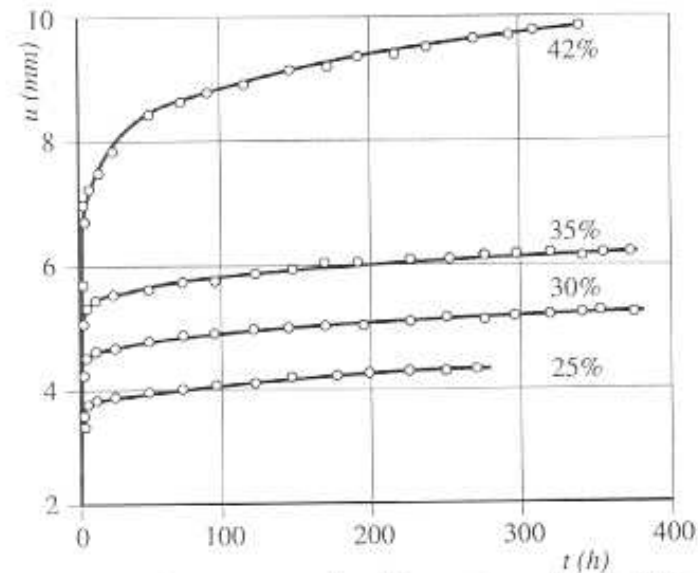
Il comportamento deformativo

I fattori che influenzano il CREEP del legno

Il livello di tensione



Influence of stress levels on creep $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4 < \sigma_5$. u is the deformation, t the time.



Experimental creep curves for different stress levels (% instantaneous failure stress). Solid timber at 12% moisture content. (quoted by Huet, Guitard and Morlier, 1988). u is the deflection, t the time in hours.

Le caratteristiche meccaniche del legno

Il comportamento deformativo

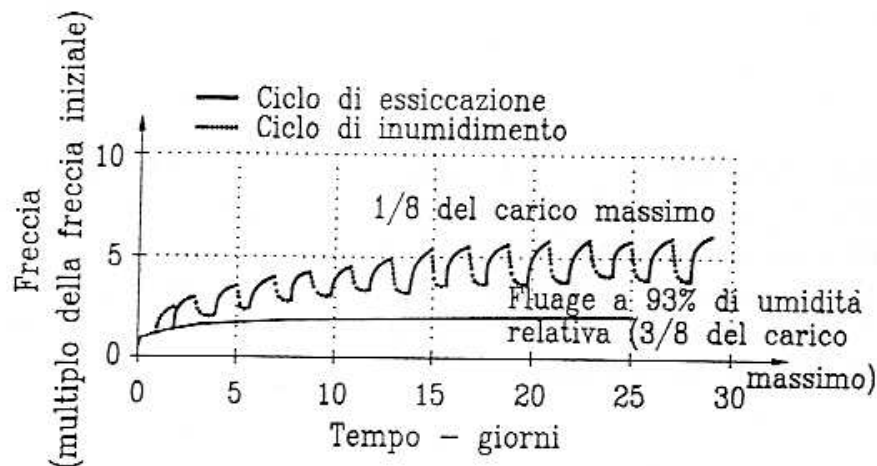


Fig. 3.22 Effetti delle variazioni cicliche di umidità su trave di legno di faggio (da Bodig, 1982).

Il comportamento
"meccanico-
adsorbitivo"

$$U_{fin} = u_{inst} \times (1 + K_{def})$$

Valori di K_{def}	Classe di servizio		
	1	2	3
Legno massiccio e legno lamellare	0,60	0,80	2,00
+ 2,00 per legno messo in opera fresco e fatto essiccare sotto carico			

Il coefficiente K_{def}
per il calcolo della
deformazione totale

Le caratteristiche meccaniche del legno

Il comportamento deformativo

L'influenza della deformabilità tagliante

- materiali elastici classici: $G = E / (2(1+\nu))$

$$E / G \approx 2.5$$

- per il legno il modulo G è invece molto più basso: $E/G \approx 16$

conifera C24: $E_o = 11000 \text{ N/mm}^2$ $E_{90} = 370 \text{ N/mm}^2$
 $G = 690 \text{ N/mm}^2$ $E/G \approx 16$

latifoglia D50: $E_o = 14000 \text{ N/mm}^2$ $E_{90} = 930 \text{ N/mm}^2$
 $G = 880 \text{ N/mm}^2$ $E/G \approx 16$

lamellare GL24: $E_o = 11600 \text{ N/mm}^2$ $E_{90} = 390 \text{ N/mm}^2$
 $G = 720 \text{ N/mm}^2$ $E/G \approx 16$

Trave appog. con q unif.: $\delta_{\text{tot}} = \delta_m + \delta_v = (5 q l^4)/(384 EI) + (q l^2 X)/(8 GA)$

$$\delta_v / \delta_m = 0,96(E/G)(h/l)^2$$

per $h/l = 1/10 \rightarrow \delta_v / \delta_m \approx 0.15$
per $h/l = 1/20 \rightarrow \delta_v / \delta_m < 0.05$