

MECCANICA DELLA FRATTURA NEL LEGNO E MATERIALI DERIVATI  
RASSEGNA SOMMARIA DI ESPERIENZE E PROSPETTIVE

L'applicazione al legno ed ai materiali da esso derivati della meccanica della frattura impone la modifica delle relazioni originali di Griffith, relative a materiali fragili, per ottenere espressioni generali che tengano conto dell'insorgere di deformazioni plastiche; inoltre essendo i materiali in questione ortotropici si sono sviluppate espressioni nella forma opportuna per questo tipo di materiali.

I lavori in questo settori si possono dividere tra quelli che si occupano del legno massiccio e quelli che si occupano dei compositi a base di legno.

In entrambi i casi si sono consolidati due tipi di approccio: uno volto ad identificare un modello matematico per la descrizione e o la previsione della frattura, ed un altro basato sull'osservazione sperimentale del fenomeno o su modelli che cercano di ricostruire in scala la morfologia del legno o sui materiali in scala 1:1 utilizzando soprattutto la microscopia elettronica a scansione.

Massimo del Senno

Ricercatore CNR-Istituto per la Tecnologia del Legno

S. Michele all'Adige TN

MECCANICA DELLA FRATTURA NEL LEGNO E MATERIALI DERIVATI  
RASSEGNA SOMMARIA DI ESPERIENZE E PROSPETTIVE

Il fondamento della meccanica della frattura è che sono le discontinuità (le "fratture") a determinare nei materiali prestazioni meccaniche inferiori a quelle che ci si potrebbero attendere in base alla loro natura chimica.

L'impulso allo studio di ciò che ora chiamiamo meccanica della frattura veniva in origine dal desiderio di capire perché l'energia necessaria a causare discontinuità macroscopiche ("lavoro di rottura") in certi materiali (p.e. il vetro) sia inferiore, spesso anche di qualche ordine di grandezza, ai valori che ci si aspettano in base all'energia di legame di quegli stessi materiali.

Alcuni materiali però manifestano un comportamento pressoché opposto: si riscontrano in essi valori di lavoro di rottura *più elevati* di quello che ci si aspetterebbe in base alla considerazione dell'energia di legame delle sostanze che li compongono.

Questo avviene spesso con materiali compositi (si è parlato dell'energia di legame *delle sostanze* che li compongono) sia naturali che artificiali; il legno è senz'altro da annoverarsi fra i primi ed anche fra i secondi figurano molti suoi derivati, o per meglio dire compositi a base di legno.

L'attenzione che molti hanno dedicato allo studio del legno utilizzando le tecniche ed i concetti propri della meccanica della frattura è quindi stata motivata, oltre che dall'interesse economico che in molti paesi è connesso alla conoscenza di questo materiale, anche ad una serie di circostanze intellettualmente stimolanti connesse a questo studio.

Il legno presenta infatti caratteristiche abbastanza eterodosse, almeno rispetto ai materiali di cui inizialmente ci si è occupati con queste tecniche.

Esso infatti non è isotropo, è eterogeneo ed ha un comportamento a rottura tutt'altro che fragile.

Il legno è caratterizzato da una struttura grosso modo a cilindri concentrici, nella quale i vettori rappresentativi delle proprietà fisiche e meccaniche descrivono ellissoidi i cui assi sono paralleli rispettivamente all'asse dei cilindri, ed al raggio e alla tangente della sezione ortogonale di essi.

Questa situazione che implica tre piani (trasversale, longitudinale e radiale) tra loro ortogonali di simmetria, porta a studiare il legno ed i materiali da esso derivati come materiali ortotropici. (fig. 1)

L'esame microscopico del legno ne mette in evidenza l'inomogeneità, evidenziando strutture diverse da specie a specie, da individuo ad individuo della stessa specie e da un punto all'altro in uno stesso individuo (albero). (fig. 2)

In estrema sintesi si può assimilare il legno ad sistema di elementi fusiformi (fibre) costituiti da più pareti concentriche composte da cellulosa variamente organizzata nello spazio, annegati una matrice di lignina; in questo complesso sono dispersi

aggregati nastriformi (i raggi parenchimatici): nella conifere le fibre comunicano fra loro e consentono il transito dei fluidi nutritizi, e sono denominate tracheidi, nelle latifoglie elementi distinti servono al sostegno, mentre altri comunicanti tra loro assolvono alla funzione di trasporto dei fluidi (vasi). (fig. 3)

Si è accennato alla organizzazione del tessuto legnoso in anelli concentrici: almeno per le piante dei climi temperati questi anelli sono caratterizzati da due zone: una zona interna (primaverile) formata appunto quando gli elementi esterni consentono un rapido incremento dei tessuti e richiedono ampie vie di trasporto dei fluidi nutritizi, caratterizzata quindi da vasi con lumi larghi e pareti sottili sia nei vasi che nelle fibre, ed una zona tardiva, esterna rispetto alla prima, in cui i lumi cellulari sono più stretti, e la struttura risultante è quindi più compatta. (fig. 4)

La maggior parte dei lavori. almeno fino a metà degli anni settanta si è concentrata sul modo di frattura I (apertura).

Anche se alcuni autori (Pellicane e al.) (23) sottolineano l'analogia di comportamento tra *legno secco* e materiali fragili per invocare l'applicabilità a questo materiale della teoria della frattura lineare elastica (LEFM), una applicazione proficua (cioè che aiuti a formulare previsioni sul comportamento del materiale sollecitato) di questa richiede l'introduzione di alcune modifiche alle ipotesi di lavoro di Griffith e alterazioni formali delle relazioni impiegate.

Come è noto per un solido contenente una frattura ellittica che lo attraversa completamente, secondo Griffith vale la relazione:

$$(A) \quad e = (4Eq/c) \sqrt{c}$$

in cui

$e$  è la resistenza a trazione perpendicolarmente alla direzione della fessura (cioè secondo l'asse minore dell'ellisse),  $E$  il modulo di elasticità del corpo in questione,  $q$  la sua energia libera di superficie e  $c$  la lunghezza della fessura (l'asse maggiore dell'ellisse).

L'esperienza mostra che per i materiali fragili esiste una proporzionalità inversa tra la resistenza a trazione e  $c \sqrt{c}$ .

Nell'ipotesi che durante la frattura non si dissipi energia in deformazioni plastiche si consente di ricavare  $q$ , e per materiali fragili i valori così ottenuti non si discostano da quelli ottenuti per altre vie.

Orowan ha ipotizzato che si possa estendere il bilancio energetico espresso da (A) anche a materiali duttili, posto che la deformazione plastica sia limitata ad uno strato sottile sulle pareti della frattura.

In questo caso occorre sostituire a  $q$  un termine comprensivo dell'energia di superficie vera  $q$  e del lavoro di deformazione plastica dissipato per creare la superficie di area unitaria  $p$ .

$$P = p + q$$

si dice energia effettiva di superficie.

(A) diviene dunque:

$$(B) e = (4EPg/cc)^{1/2}$$

A partire da questa relazione e lavorando su *Picea mariana* Atack ed al. (1) hanno valutato l'adattabilità della meccanica della frattura al legno, giungendo a risultati interessanti.

Esaminando il comportamento a frattura nei piani longitudinale e radiale (con sollecitazioni applicate perpendicolarmente alle pareti delle fratture) si è dimostrato che almeno in prima approssimazione la relazione (B) descrive il comportamento del legno, e quindi può essere utilizzata per ricavare  $P$ .

I valori ottenuti sono dell'ordine di  $1 \cdot 10^{10}$  erg/cm<sup>2</sup>.

I valori ottenuti sono relativi alla proiezione sul piano della frattura di una superficie ben lontana dall'essere piana, quindi il ver valore  $P_e$  dell'energia effettiva di superficie non si può calcolare se non è nota l'effettiva area delle superficie di frattura.

Comunque, se si accetta per il legno il valore di  $g$  stimato da Campbell (circa 600 erg/cm<sup>2</sup>), si vede che, a meno che l'area effettiva non sia circa 100 volte quella apparente, si deve compiere lavoro plastico.

L'esame micrografico delle fratture indica che si è effettivamente svolto lavoro plastico e che, per quanto pressoché impossibile da misurare accuratamente, l'area effettiva è comunque assai lontana dall'essere 100 volte quella reale.

Considerando la quantità  $G$  di energia elastica che si libera quando la frattura si estende incrementando la sua superficie dell'area unitaria ed il valore  $G_c$  che corrisponde alla propagazione spontanea della frattura, Irwin ha definito la relazione tra  $G$  e lo stato di tensione in prossimità del vertice della frattura e la relazione tra livello di sforzo e lunghezza critica di frattura in un corpo di  $G_c$  noto.

Porter (26) basandosi sulle teorie di Griffith ed Irwin, ha lavorato su *Pinus monticola* esaminando i fattori che influenzano la propagazione di fratture in modo normale nei piani longitudinale/radiale e longitudinale/tangenziale.

Valutando la variazione della cedevolezza  $J$  del materiale in funzione della lunghezza delle fratture, si può costruire un diagramma  $J/a$  da cui si ricava  $kJ/ka$  e dato che per una mensola caricata da  $F$  all'estremità si dimostra che vale:

$$(C) (G = 1/2 F^2 kJ/ka$$

si può calcolare  $G$ .

Si è visto che  $G$  è indipendente dalla geometria dei provini e almeno nel piano longitudinale/tangenziale non dipende da  $a$ .

La prima conclusione si distacca molto da quanto avviene per i metalli, in cui le variazioni geometriche del provino influiscono sull'estensione della zona plastica in prossimità dell'apice della frattura.

Questa tecnica sarebbe più appropriata al legno di quelle basate sullo sforzo o sulla deformazione critica; i risultati ottenuti con essa suggeriscono l'opportunità per il legno di un modello viscoelastico piuttosto che plastico.

Porter ha esaminato anche l'effetto dei fattori ambientali, osservando che data l'indipendenza di  $G$  dall'umidità a  $-195^{\circ}\text{C}$  ed il fatto che a questa temperatura il valore di  $G$  è più o meno quello del materiale secco a temperatura ambiente, si può assumere che in queste condizioni che il legno si comporti in modo puramente elastico: le maggiori energie richieste a temperature maggiori sono da associare a perdite viscoelastiche.

Il problema dell'anisotropia del legno è stato affrontato tra gli altri da Schniewind e coll. (29, 32) che osservando come su ciascuno dei tre piani principali che caratterizzano il legno come materiale anisotropo si possono individuare due direzioni principali di propagazione della frattura e che quindi per caratterizzare la resistenza a frattura di questi materiali possano essere necessari fino a sei parametri (si hanno tre gruppi di sistemi di propagazione, secondo la giacitura del piano di frattura e secondo la direzione di propagazione rispetto alla direzione della fibra). (fig. 5)

Lavorando su *Pseudotsuga menziesii* e limitandosi a studiare fratture che si propagavano parallelamente alle fibre, gli AA hanno riscontrato che i fattori di intensità critica di sforzo sono diversi per tutti i sei sistemi tranne due.

Agli effetti pratici può essere sufficiente distinguere tra i sistemi LT e LR e gli altri sistemi.

Sempre Schniewind in un lavoro successivo (30) si è occupato del caso della propagazione perpendicolare alle fibre, soprattutto in vista del comportamento a carico costante.

In base ai risultati ottenuti si può ritenere che non è necessario introdurre fattori compensativi per il carico prolungato se il cedimento è determinato secondo le tecniche della meccanica della frattura e nel modo di apertura I.

Per quanto riguarda l'effetto delle condizioni ambientali i lavori di Schniewind e coll. (31) confermano quanto riportato da Atack e coll. e da Porter, cioè che  $G$  cresce al crescere di temperatura ed umidità.

Petterson e coll. (25), basandosi su risultati sperimentali, hanno sviluppato equazioni che esprimono la relazione tra la resistenza a frattura e la densità e l'umidità per diverse specie di conifere; i dati ottenuti dimostrano che la relazione è indipendente dalla specie cosicché è possibile utilizzare una sola relazione per tutte le specie, tranne che per le specie ad elevati contenuti di estrattivi la cui presenza influisce notevolmente sull'effetto dell'umidità.

Triboulot e coll. (34) hanno valutato la validità di queste conclusioni confrontando i risultati sperimentali su *Fagus sylvatica* con quelli calcolabili col metodo delle differenze finite, concludendo che il metodo consente di ottenere risultati utilizzabili per applicazioni strutturali.

Conseguenza fondamentale di questi primi studi è stata l'applicazione della meccanica al problema della deformazione del legno a carico costante.

Oltre ai lavori dello stesso Schniewind, sono da segnalare quelli di Nadeau, Barrett ed altri (3, 21) che associano il degradamento delle caratteristiche in queste condizioni alla propagazione delle fratture in condizioni subcritiche.

I risultati sperimentali di questi lavori conducono a valutazioni della dipendenza della resistenza a rottura dalla velocità di deformazione che non sono in accordo con quelli trovati da altri autori.

Le discrepanze possono essere spiegate dalle diverse tecniche sperimentali, in particolare dalla minor durata, per esempio, rispetto ai lavori di Schniewind: durante deformazioni lunghe possono aversi cicli climatici che molti autori hanno dimostrato influire negativamente sulla resistenza a carico costante.

Caratteristica comune di questi lavori è di essere esclusivamente sperimentali, essi non propongono un modello del fenomeno o del materiale: Pellicane e coll. (24), considerando che la relazione tra il carico di rottura  $e_r$  e la resistenza a frattura  $K$  può essere espressa da:

$$(C) K = e_r (ca)^{1/2} f(a, b, c, \dots)$$

dove  $f$  è funzione delle caratteristiche geometriche del provino.

Pellicane e coll. hanno proposto un modello di simulazione basato sul calcolo di  $f$ , modello che è stato verificato nel caso di *Pseudotsuga menziesii* con risultati coerenti con quelli di Schniewind.

Il limite dell'applicabilità del metodo alla valutazione delle caratteristiche del legno sta nella necessità di determinare le dimensioni dei difetti.

Sulla base di lavori di Leicester (15), Walsh (35) e propri Barrett (2) propone una relazione generale per uno stato di sollecitazione piana in un punto di coordinate  $i$  e  $r$  in prossimità dell'apice di una fessura di apertura zero.

i fattori di intensità di sforzo sono espressi da:

$$K_I = e' (ca)^{0.5} H_I$$

$$K_{II} = t' (ca)^{0.5} H_{II}$$

L'espressione non è limitata al modo I; di essa Leicester dà una variante utilizzabile per una frattura di apertura  $a$ :

$$e = K_I f_{I,0}^{-1}(i) / (2cr)^{0.5} + K_{II} g_{II,0}^{-1}(i) / (2cr)^{0.5}$$

in cui  $p$  e  $s$  sono funzioni di  $a$ .

Queste relazioni conducono ad interessanti applicazioni, per esempio nel campo della valutazione dell'influenza dei difetti del legno sulle sue prestazioni, e dell'effetto delle fessure d'estremità sulle prestazioni di elementi in legno.

In particolare Barrett e Foschi (3) hanno proposto un'espressione del carico di rottura a taglio valida per travi semplicemente appoggiate caricate uniformemente:

$$t(p) = (0.13/ad)^3 / (1+2a/d) K_{IT} = (p)$$

Questo tipo di relazioni è inoltre utilizzato nell'Australian Timber Code AS 1720-1795 per il calcolo della resistenza alla frattura di travi contenenti tacche a sezione rettangolare.

Una recente proposta di modello di Zandbergs e coll. (37) implica l'uso dell'analisi per elementi finiti di sistemi ortotropici e di un accorgimento per tenere conto delle variazioni di caratteristiche dovute a singolarità quali nodi o deviazioni di fibra.

Questo accorgimento è in pratica l'uso di un'analogia idrodinamica, in cui le singolarità sono assimilate a cilindri a sezione ellittica posti in un flusso laminare diretto perpendicolarmente al loro asse. (fig. 6)

Il programma consente di dimensionare i nodi, orientare gli asse delle sezioni rispetto alla direzione delle fibre, e spostarli in una posizione qualunque del reticolo di elementi finiti, purché non se ne superi il contorno.

Il modello lavora confrontando le condizioni di ogni elemento coi carichi di rottura ricavabili da provini netti (privi di difetti) della specie impiegata; in presenza di fessurazioni si procede analogamente al calcolo dei fattori di intensità di sforzo e al loro confronto con il criterio di frattura di Wu, per il quale la frattura si propaga se:

$$(K_I/K_{IC}) + (K_{II}/K_{IIC})^2 > 1$$

Utilizzando dati sperimentali o ricavati dalla letteratura gli AA hanno potuto verificare la validità del modello per Pseudotsuga menziesii in trazione assiale.

Per la configurazione di figura il modello fornisce una previsione estremamente precisa sia della localizzazione della frattura (fig. 7) iniziale che per lo sforzo corrispondente; il valore di sforzo previsto è del 15 % superiore a quello sperimentale, il che costituisce un'approssimazione accettabile; le discrepanze osservate per i carichi minimi dopo il cedimento sono da imputare all'effetto di elementi di rinforzo sulle provette, che impediscono la propagazione delle fratture, e il cui effetto non era stato previsto dal modello.

Numerosi lavori sono stati svolti sugli argomenti accennati: in essi si sono trattati in prevalenza problemi legati ai modi di apertura I e II; particolarmente importanti devono considerarsi nello sviluppo di questo campo di ricerca e per la documentazione di chi volesse interessarsene gli atti della prima conferenza in-

ternazionale sulla frattura del legno, tenutasi a Banff (Alberta-CND) nel 1978.

Ciò che è curioso è la scarsa utilizzazione che finora si è fatta dei risultati dell'attività cospicua svoltasi fino a quella conferenza e successivamente.

In un lavoro pubblicato nel 1987 M. Patton-Mallory e coll. (22) mettono in rilievo come oltre alla citata norma australiana solo la norma canadese CSA CAN2-086-M84 utilizzi i concetti della meccanica della frattura a livello pratico.

Questo lavoro si conclude sottolineando le potenzialità dei metodi della meccanica della frattura per la previsione del comportamento del materiale legno, indica tutta una serie di settori da studiare per mettere in atto queste potenzialità (legno contenente difetti, compositi a base di legno ecc.) *una volta noto il comportamento del legno privo di difetti.*

Se confrontiamo questa conclusione con quella del lavoro di Porter del 1964, in cui si indicano tra i problemi da studiare il meccanismo di generazione dell'energia di superficie, la possibilità di migliorare la resistenza a frattura del legno ecc. appare che nonostante il molto cammino fatto molto resti ancora da fare.

Un problema che si pone nell'impiego del legno è che la sua resistenza a trazione è superiore a quella a compressione (grosso modo il doppio) e di conseguenza nella tecnologia del legno tradizionalmente intesa si dà particolare importanza a questo stato di sollecitazione.

Prova ne possono essere i lavori svolti, soprattutto dopo l'introduzione della microscopia elettronica a scansione, sulla morfologia delle superficie di frattura del legno.

Coté e coll. (6) presentano una serie di immagini di superficie di frattura in diverse specie, sia conifere che (soprattutto) latifoglie.

Le condizioni di sollecitazione considerate sono trazione, taglio e compressione, sempre parallelamente alle fibre.

Nella sollecitazione a trazione si originano sia nelle conifere che nelle latifoglie, cedimenti che interessano tutta la sezione delle pareti cellulari, mentre nella compressione, che macroscopicamente è caratterizzata dal cedimento delle fibre a carico di punta, (fig. 8) accompagnato da separazione fra gli stati che costituiscono la parete cellulare.

Questo tipo di cedimento si osserva anche nel taglio, ma nel caso di specie a bassa densità si può avere completa frattura della parete, inoltre si osserva distacco dei raggi midollari (parenchima) dal resto della struttura.

Un lavoro di Kucera e al. (12) riguarda invece solo la compressione ed in particolare l'influenza dei diversi elementi anatomici sull'evoluzione del cedimento (in particolare lo stabilirsi di piani di scorrimento associati con l'insorgere di deformazioni irreversibili).



Nello stesso lavoro si riportano i risultati di prove condotte su modelli di fibre realizzati con cilindri di carta di diverso diametro e diverso numero di strati. (fig. 9)

In questi modelli il cedimento si manifesta con pieghe leggermente inclinate rispetto all'asse e di dimensione correlata al diametro del modello, mentre la frequenza delle pieghe mostra una forte correlazione col numero degli strati.

Solo quando questo tipo di cedimento è molto avanzato si verificano nel modello fessure ad andamento assiale.

Questa sommaria esposizione dovrebbe avere dato un'idea del lavoro che è possibile svolgere utilizzando nel settore del legno le tecniche proprie della meccanica della frattura; la bibliografia allegata, per quanto ristretta, riporta materiale esistente presso la biblioteca dell'Istituto per la Tecnologia del Legno e quindi immediatamente disponibile.

Va inoltre ricordata l'istituzione in seno al RILEM di un Comitato Tecnico (TC 110-Timber Fracture Mechanics) per la frattura di cui il chairman è il Alpo Ranta Mainus e a cui per l'Italia partecipa il professor Zaupa, dell'università di Padova.

## Bibliografia

- 01 Atack D., W. D. May., E. L. Morris and R. N. Sproule 1961. The energy of tensile and cleavage fracture of black spruce. TAPPI 44 (8): 555-557.
- 02 Barrett J. D. 1981. Fracture mechanics and the design of wood structures. Phil. trans. R. Soc. London A 299: 217-226
- 03 \_\_\_\_\_ and R. O. Foschi, 1979. On the application of brittle fracture theory, fracture mechanics, and creep-rupture models for the prediction of the reliability of wood structure elements. 1st Inter. Conf. on Wood Fracture, Banff, Alberta. Forintek Canada Corporation. pp 1-38.
- 04 Boatright S. W. J. and G. G. Garrett 1969. The effect of knots on the fracture strength of wood. I. A review of methods of assessment. Holzforschung 33 (3): 68-72.
- 05 \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_ 1969. The effect of knots on the fracture strength of wood. II. a comparative study of methods of assessment, and comments on the application of fracture mechanics to structural timber. Holzforschung 33 (3): 72-77.
- 06 Cote, W. A. and R. B. Hanna. 1983. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces. Wood and Fiber Science 15 (2):135-163.
- 07 Chow C. L., and C. W. Woo. 1979. Orthotropic and mixed mode fracture in wood. Proc. 1st Inter. Conf. on Wood Fracture, Banff, Alberta. Forintek Canada Corporation. pp 39-52.
- 08 Ebewele R. O., B. H. River and J. A. Koutsky, 1979. Tapered double cantilever beam fracture test of phenolic-wood adhesive joints. Part I. Development of specimen geometry: effect of bondline thickness, wood anisotropy and cure time on fracture energy. Wood and Fiber 11 (3): 197-213.
- 09 \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_, 1980. Tapered double cantilever beam fracture test of phenolic-wood adhesive joints. Part II, Effects of surface roughness, the nature of surface roughness and surface ageing on joint fracture energy. Wood and Fiber 12 (1): 40-65.
- 10 Johnson J. A., 1973. Crack initiation in wood plates. Wood Science 6 (2): 151-158.
- 11 Jung J. and J. F. Murphy, 1983. An investigation of the fracture of butt joints in parallel-laminated veneer. Wood and Fiber Science 15 (2): 116-134.
- 12 Kucera L. J. and Bariska M. 1982. On the fracture morphology of wood. Part 1: A SEM study of deformations in Wood of Spruce and Aspen upon ultimate axial compression load. Wood Science and Technology 4: 241-320.

- 13 Lei Y-K and J. B. Wilson, 1980. Fracture toughness of oriented flakeboard. Wood Science 12 (3): 154-161.
- 14 \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_, 1980. A model for predicting fracture toughness of oriented flakeboard. Wood Science 13 (3): 151-156.
- 15 Leicester R. H. and P. C. Bunker, 1969. fracture at butt joints in laminated pine. Forest Products Journal 19 (2): 59-60.
- 16 May J. W., 1975 On the velocity dependent fracture toughness of wood. Wood Science 8 (1): 364-367.
- 17 Mandel J. S., J.S. Nadeau and J. D. Barrett, 1975. Slow crack growth in Douglas-fir. Wood Science 8 (1):389-396.
- 18 \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 1976. Effect of constant deformation rate on the strength perpendicular to grain of Douglas-fir. Wood Science 8 (4):262-266.
- 19 \_\_\_\_\_ and A. Bentur. 1986. Crack propagation in notched wood specimens with different grain orientations. Wood Science and Technology 20: 145-155.
- 20 Morgner W., P. Niemz and K. Theis. 1980. use of acoustic emission analysis for the investigation of failure and creep process in wood products. Holztechnologie 2 (12): 77-82.
- 21 Nadeau, J. S. 1979. Fracture mechanics: an overview. Proc. 1st Inter. Conf. on Wood Fracture, Banff, Alberta. Forintek Canada Corporation. pp 175-186.
- 22 Patton-Mallory, M. and S. M. Cramer. 1987. Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength. Forest products Journal 37 (7/8): 39-47.
- 23 Pearson, R. G. 1974. Application of fracture mechanics to the study of tensile strength of structural lumber. Holzforschung 28 (1): 11-19.
- 24 Pellicane P. J., J. Bodig and J. R. Goodman. 1982. Simulation of the tensile strength-fracture relationship. Wood Science 14 (4): 168-177
- 25 Petterson, R. W., J. Bodig. 1983. Prediction of fracture toughness of conifers. Wood and Fiber Science 15 (4): 302-316.
- 26 Porter, A. W. 1964. On the mechanics of fracture in wood. Forest Products Journal 14 (8): 325-331.
- 27 Schniewind, A. P. 1977. Fracture toughness and duration of load factor. II. Duration factor for cracks propagating perpendicular-to-grain. Wood and Fiber 9 (3): 216-226.
- 28 \_\_\_\_\_, H. J. Bartels and B. W. Gammon. 1979. Effect of preloading on the fracture toughness of wood. Proc. 1st Inter. Conf. on Wood Fracture, Banff, Alberta. Forintek Canada Corporation. pp 227-239.

- 29 \_\_\_\_\_ and J. C. Centeno. 1973. Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principal systems of crack propagation and the duration factor for crack propagation parallel to grain. Wood and Fiber 5 (2): 152-159.
- 30 \_\_\_\_\_ and D. E. Lyon. 1973. A fracture mechanics approach to the tensile strength perpendicular to grain of dimension lumber. Wood Science and Technology 7: 45-9.
- 31 \_\_\_\_\_, T. Ogama, T. Aoki and T. Yamada. 1982. Effect of specific gravity, moisture content and temperature on fracture toughness of wood. Wood Science 15 (2): 101-109.
- 32 Smith, T. W. and D. T. Penney. 1980. Fracture mechanics analysis of butt joints in laminated wood beams. Wood Science 12 (4): 227-235.
- 33 Tomin M. 1972. Influence of anisotropy on fracture toughness in wood. Wood Science 5 (2): 118-121.
- 34 Triboulot P., P. Jodin and G. Pluvinage. 1984. Validity of fracture mechanics concept applied to wood by finite elements calculations. Wood science and technology 18: 51-58.
- 35 Walsh P. F. 1973. The interaction of butt joints. Journal of the Institute of Wood Science 6 (2): 22-27.
- 36 White, M. S. and D. W. Green. 1980. Effect of the substrate on the fracture toughness of wood-adhesive bond. Wood Science 21 (3): 149-153.
- 37 Zandbergs J. G. and F. W. Smith. 1988. Finite element fracture prediction for wood with knots and cross grain. Wood and Fiber Science 20 (1): 97-106.

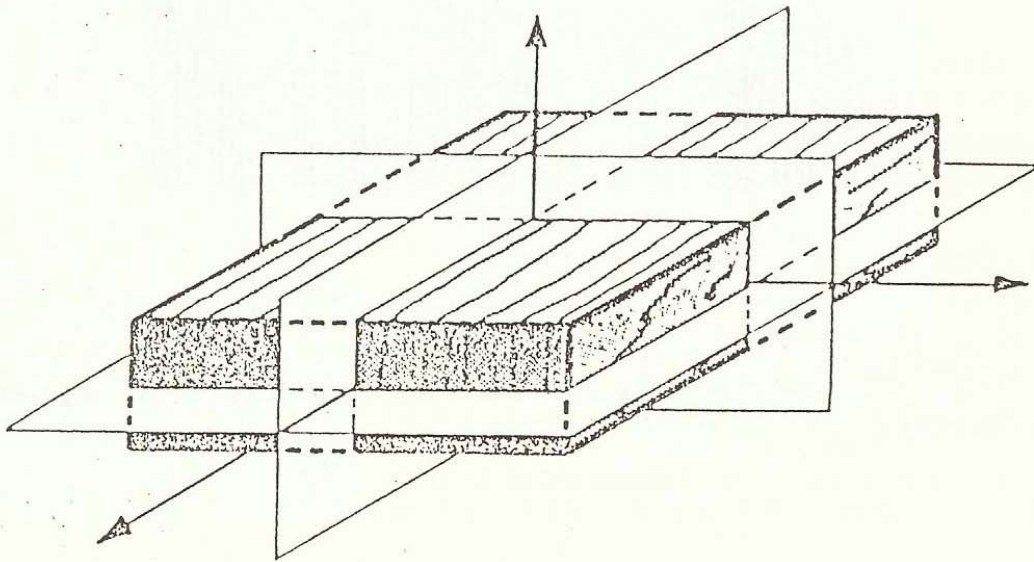
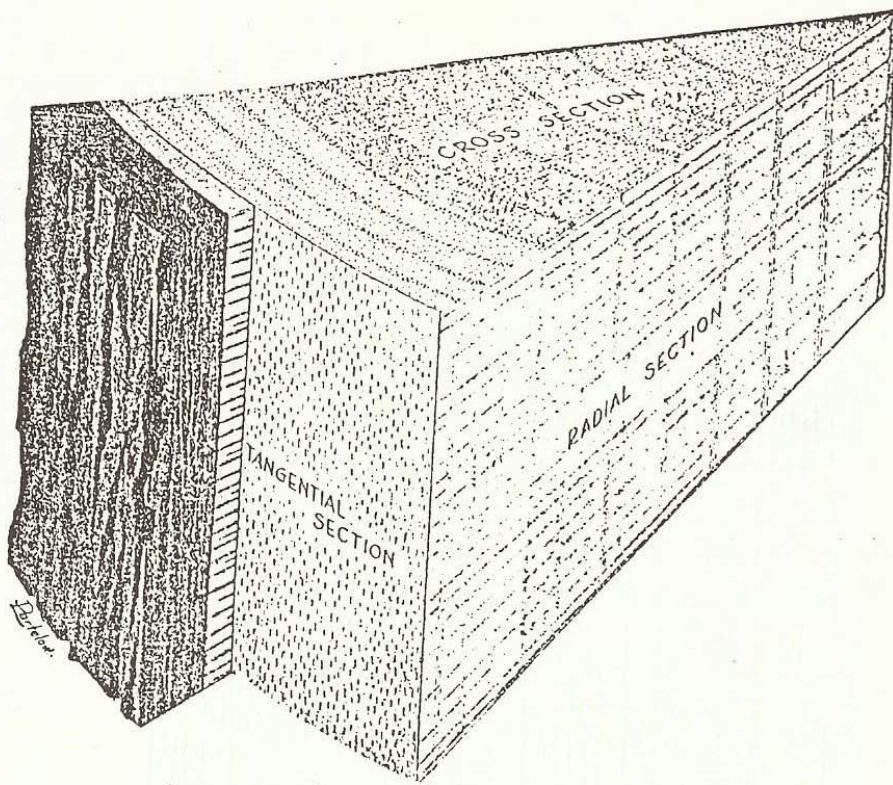


Fig. 1 Struttura del legno e suoi piani di simmetria (adattato da Forsaith 1949 e Bodig e Jaine 1982).

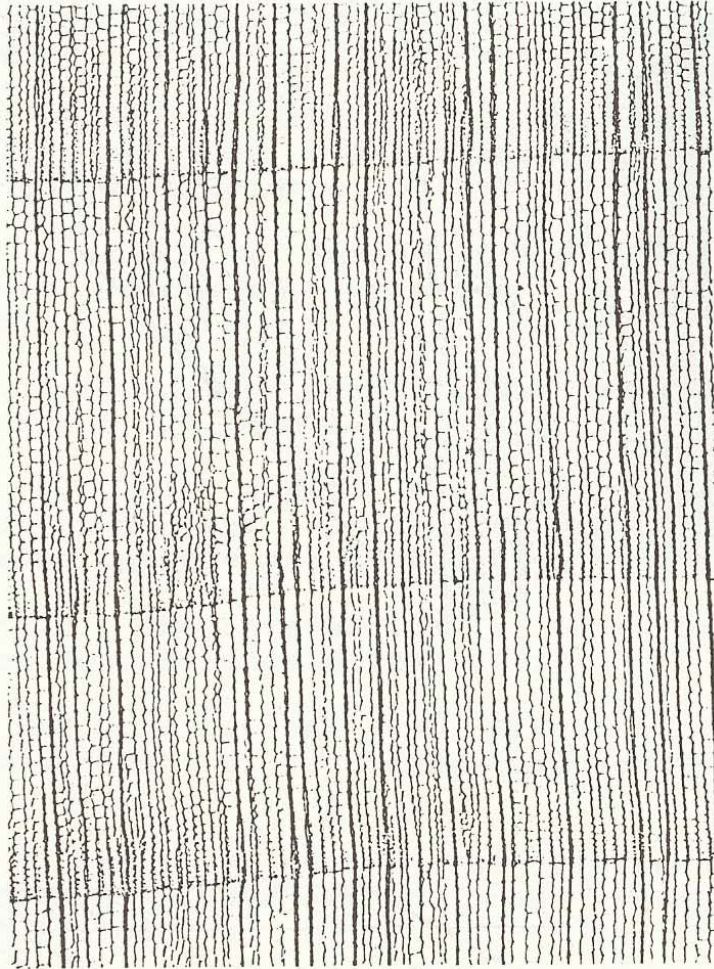


Fig.2 Variazione della struttura in una sezione trasversale di conifera (Bodig e Jaine 1982).

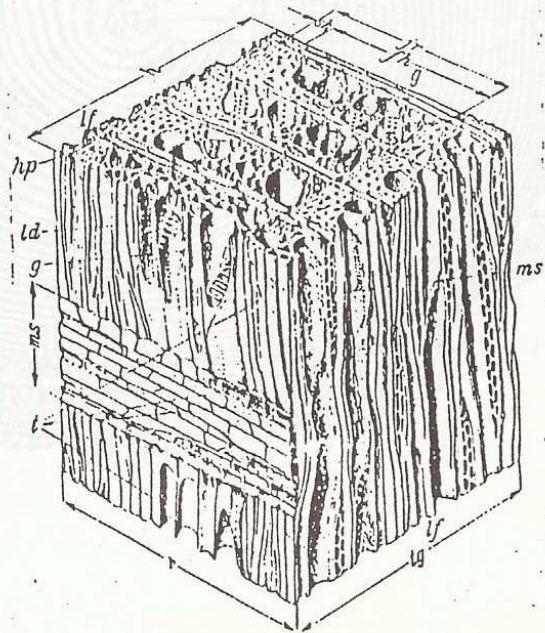
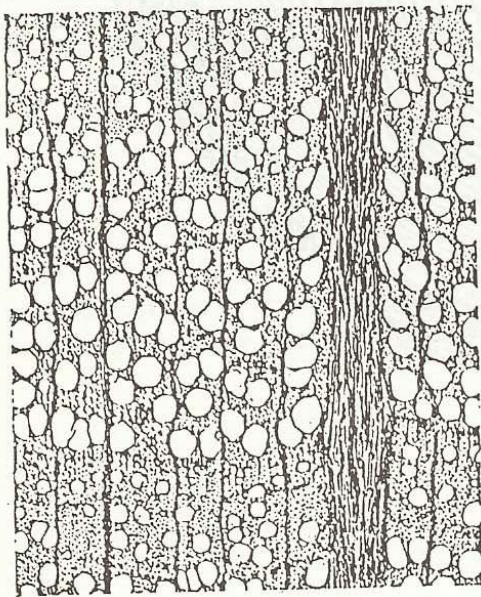
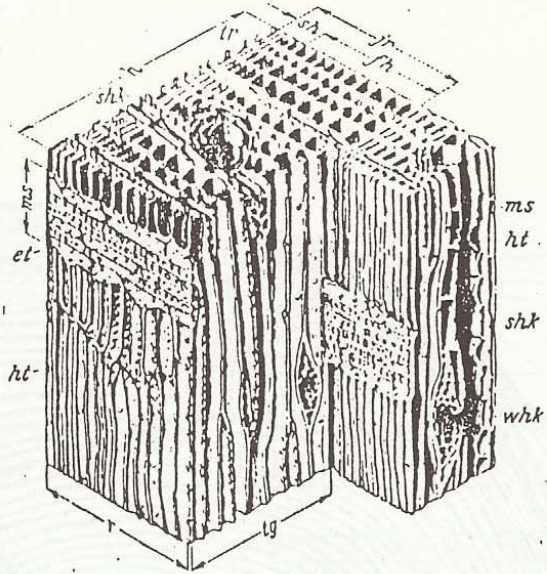
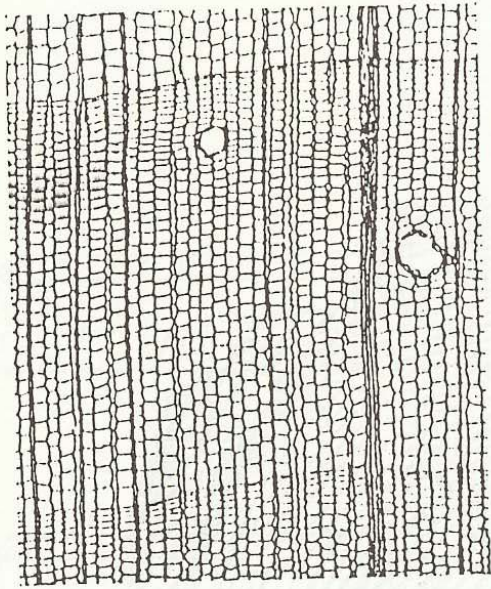


Fig. 3 Struttura di un legno di conifera (sopra) e di latifolia (sotto) (USDA, Forest Products Laboratory)†

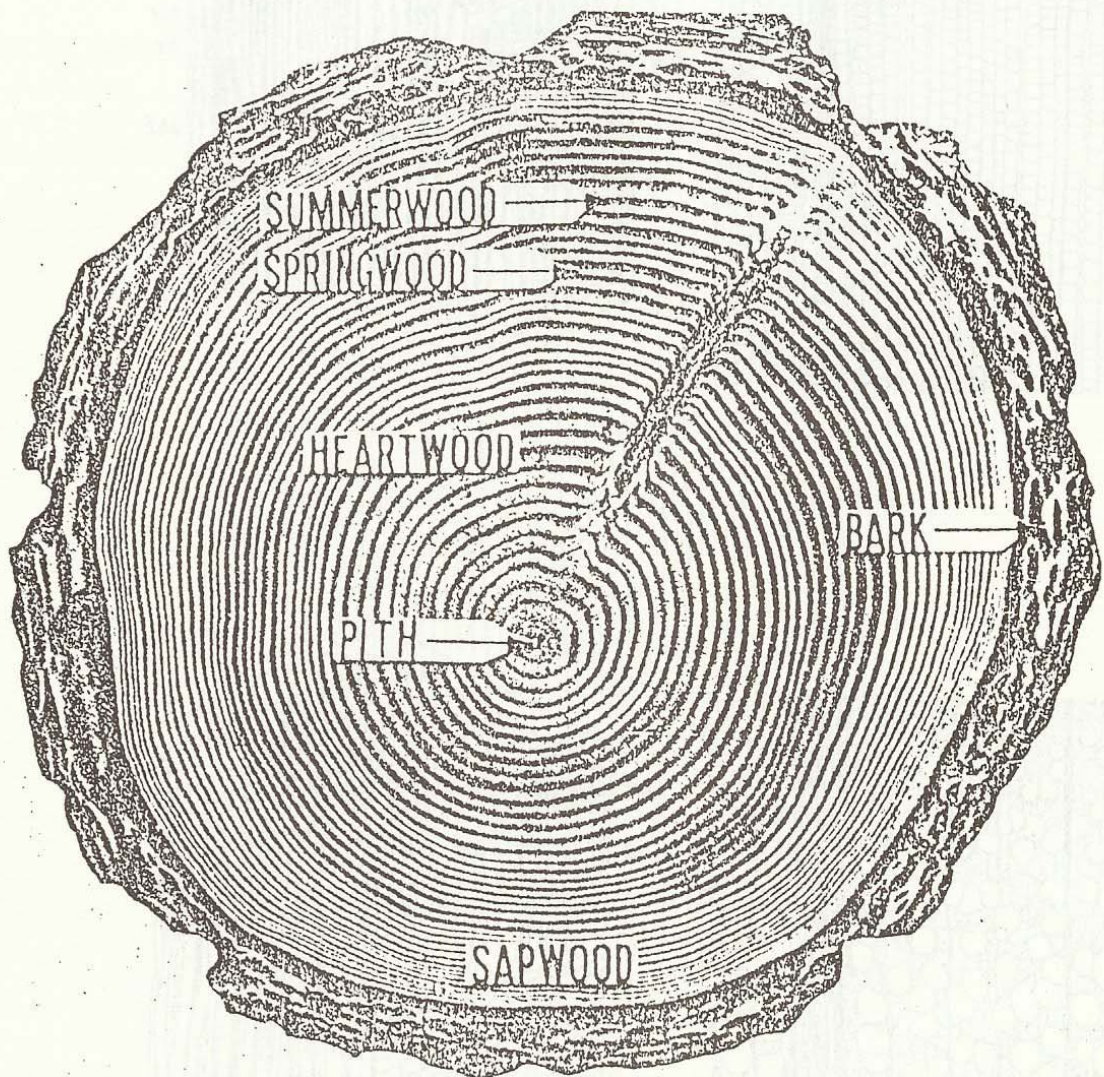
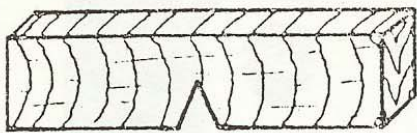
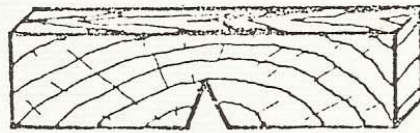


Fig. 4 Differenza fra legno primaverile ed autunnale (da Bodig e Jaine 1982).

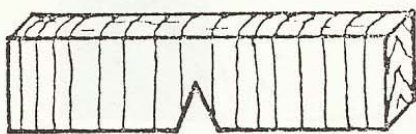




RT



TR



RL



TL



LR



LT

Fig. 5 I sistemi di propagazione di una fessura secondo Schniewind  
(da Schniewind 1973).

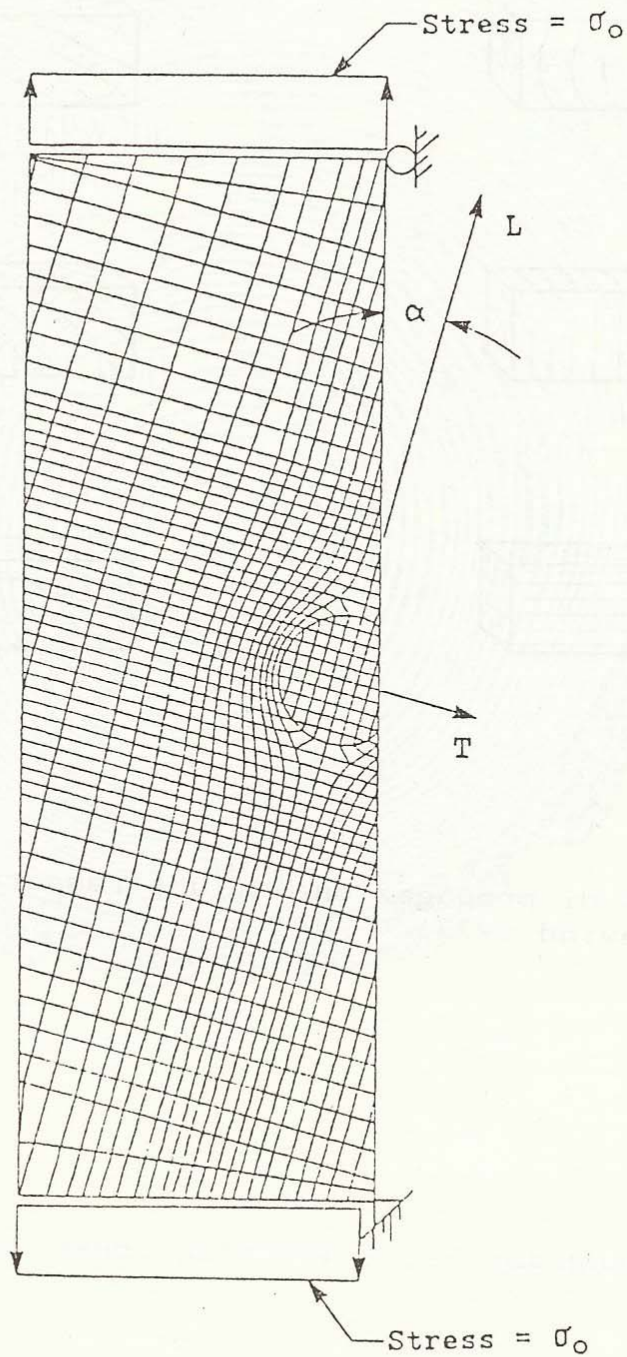


Fig. 6 Analogia idrodinamica nel modello ad elementi finiti di Zandbergs (da Zandbergs 1988).

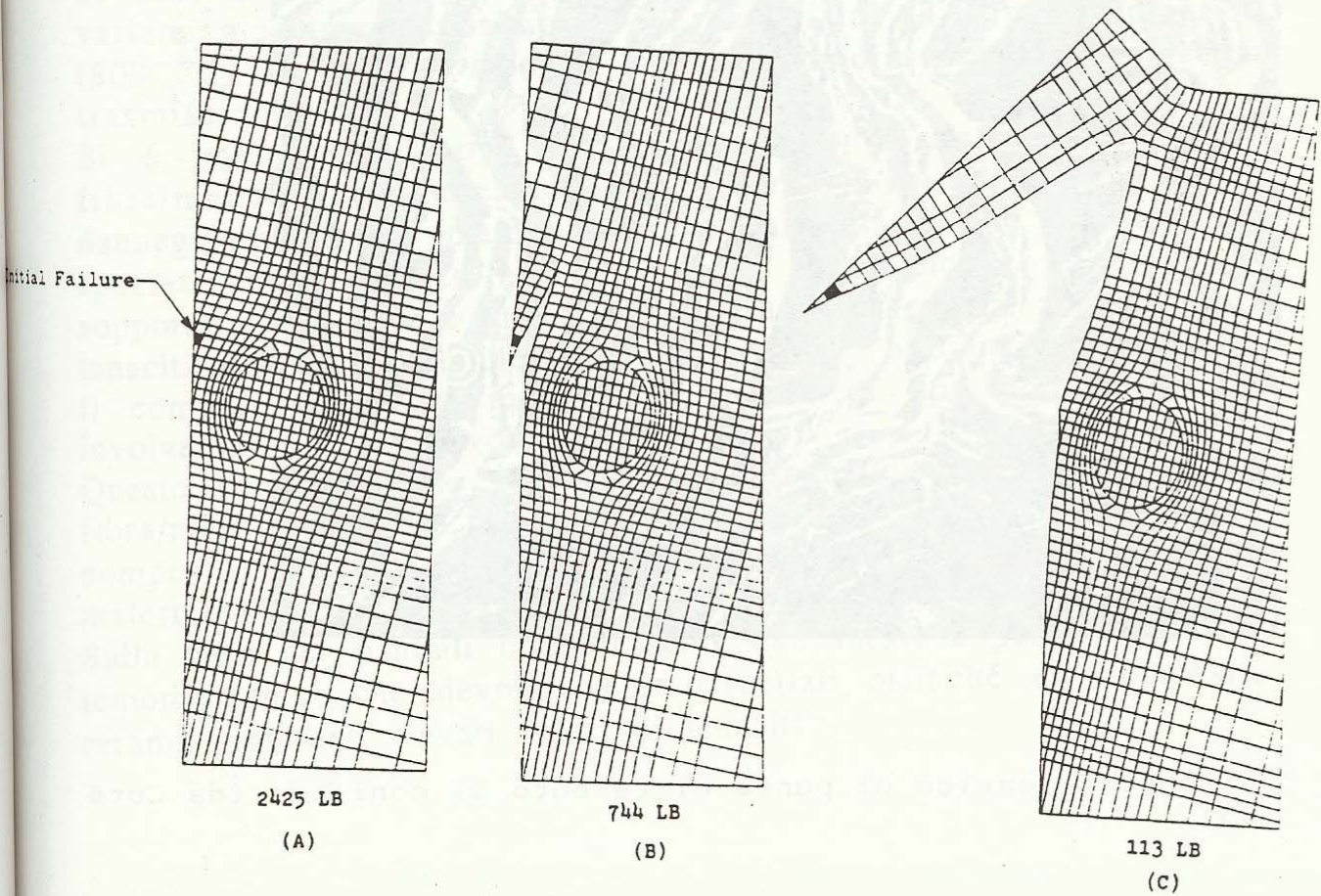
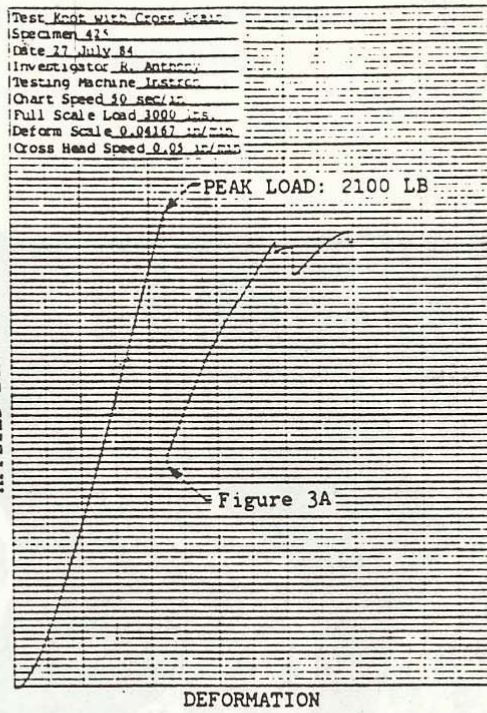
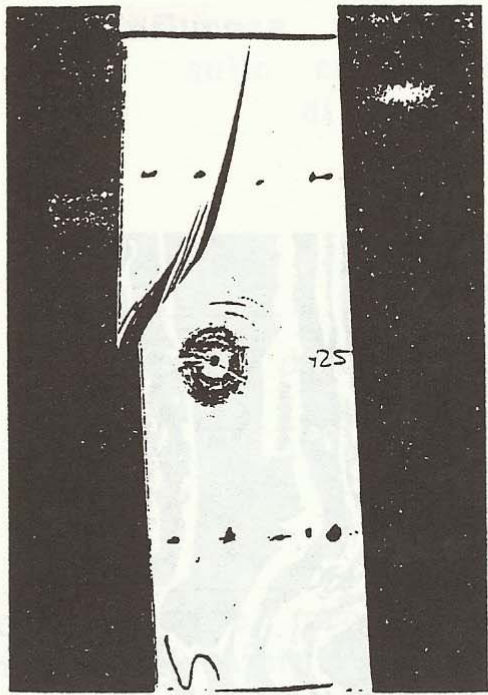


Fig. 7 Confronto tra risultati sperimentali e previsioni ottenute dal modello di Zandbergs (da Zandbergs 1988).

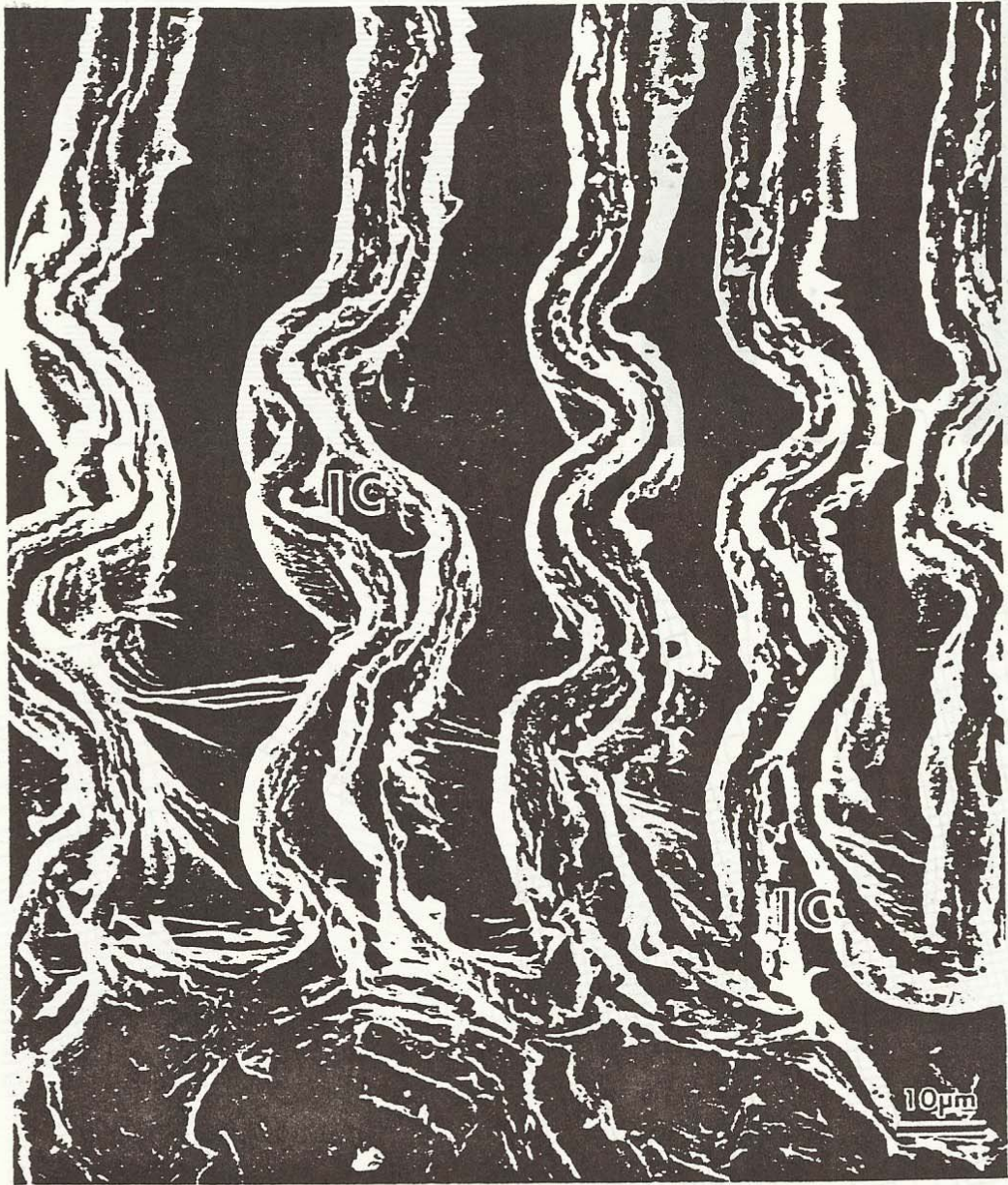


Fig.8 Cedimento a carico di punta di tessuto di conifera (da Coté 1983).