



SEMINARIO

LA VALUTAZIONE DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI

Lucca, 13-14 dicembre 2013

RILIEVO DEL DEGRADO DELLE STRUTTURE ESISTENTI

Prof. Maria Luisa Beconcini

Università di Pisa – Dip. Ingegneria Civile e Industriale

Leonardo da Vinci

Assessment of existing structures

Project number: CZ/11/LLP-LdV/TOI/134005

RILIEVO DEL DEGRADO DELLE STRUTTURE ESISTENTI

- Il degrado del calcestruzzo armato 3 – 26
- Rilievo dei difetti interni 27 – 34
- Classificazione del legno e rilievo del degrado 35 - 51
- Determinazione del tiro nelle catene 52 - 58

Il degrado del calcestruzzo armato

Il calcestruzzo, almeno in assenza di specifiche cause di degrado (ambienti acidi o solfatici, gelo-disgelo,...) può presentare la durabilità di una pietra naturale: lo dimostrano costruzioni vecchie di millenni (epoca romana) ancora in perfetto stato di conservazione.

Per il calcestruzzo armato il discorso è in parte diverso, a causa della corrosione delle armature.

Difetti originari del calcestruzzo

- Riduzione della resistenza del cls per quantità eccessiva di acqua d'impasto
- Cls poroso per insufficiente compattazione
vespai: riducono localmente la resistenza del cls, espongono le armature alla corrosione
- Micro- e macrofessurazioni prodotte da inadeguati provvedimenti di stagionatura: favoriscono la penetrazione degli agenti aggressivi
- Spessore del copriferro minore di quello richiesto dalle condizioni ambientali
- Posizione delle barre di armatura diversa da quella di progetto



Degrado del calcestruzzo

Il degrado del calcestruzzo è favorito e reso più rapido in presenza di difetti originari

CAUSE

meccaniche: abrasione, erosione, urto, esplosione

fisiche: gelo-disgelo, incendio

strutturali: sovraccarichi, assestamenti, carichi ciclici

chimiche: reazione alcali-aggregati, attacco acido, attacco da solfati, attacco da solfuri, dilavamento da acque pure

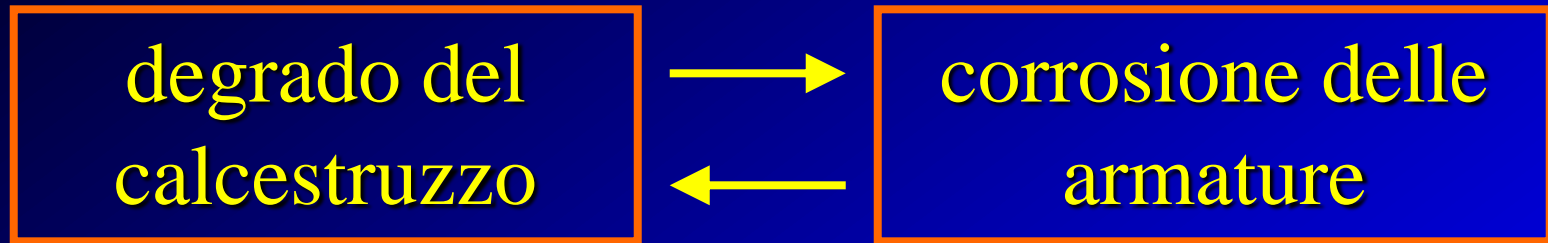
biologiche

corrosione delle armature:

Il calcestruzzo, per la sua elevata alcalinità, è l'ambiente ideale per proteggere le barre d'acciaio.

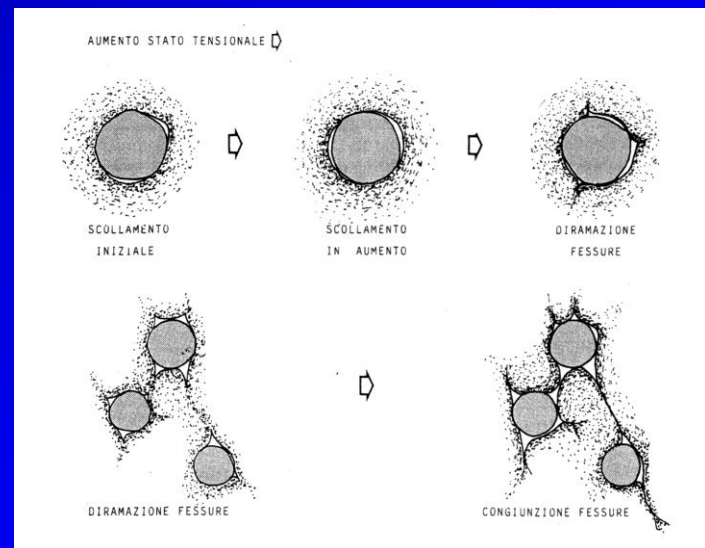
In effetti, se la progettazione delle strutture, la scelta e la messa in opera dei materiali vengono effettuate secondo le prescrizioni normative attuali, tale protezione può rimanere attiva per 50-75 anni, più o meno la vita attesa delle costruzioni.

Ma in condizioni ambientali di elevata aggressività o nei casi in cui il confezionamento e la messa in opera non siano state eseguite correttamente, il calcestruzzo può perdere le sue caratteristiche protettive e provocare la corrosione delle armature, in tempi ben più brevi.



Il degrado del calcestruzzo, principalmente l'alterazione chimico-fisica del copriferro, innesca la corrosione delle armature.

La corrosione delle armature (ossidazione) è accompagnata da un aumento di volume, che dapprima provoca scollamento; all'aumentare delle tensioni agenti, le fratture si allargano fino a provocare la disgregazione del cls.





Corrosione delle armature

In soluzioni alcaline con $\text{pH} > 11,5$ e in assenza di cloruri, il ferro si ricopre di un sottilissimo film di ossido, dello spessore di pochi strati molecolari.

In queste condizioni, che sono dette di passività, la sua velocità di corrosione è praticamente nulla.

Un calcestruzzo correttamente confezionato e messo in opera si comporta come una soluzione alcalina e quindi passiva perfettamente le armature.

Nel tempo, il calcestruzzo può perdere le caratteristiche protettive, essenzialmente per tre motivi:

Carbonatazione:

partendo dagli strati più esterni e passando a quelli più interni, l'alcalinità del cls può essere neutralizzata dall'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno, per cui il contenuto acquoso del cls passa da $\text{pH} > 13$ a $\text{pH} < 9$.

Cloruri:

a contatto con ambienti contenenti cloruri, nel calcestruzzo possono penetrare questi ioni fino a raggiungere le armature.

Se alla superficie delle armature si supera un tenore critico di cloruri, il film protettivo può rompersi localmente.

Correnti vaganti:

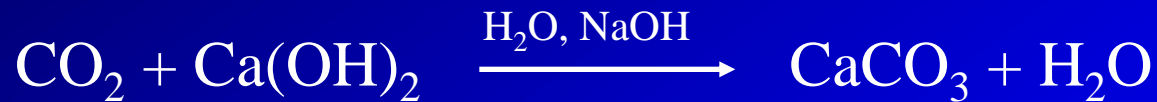
nel caso di strutture interessate da campi elettrici e quindi percorse da correnti vaganti che interferiscono con le armature, il film protettivo può venire distrutto.

La distruzione del film protettivo è la condizione necessaria perché la corrosione possa avvenire.

Una volta distrutto il film, la corrosione si produce solo se alla superficie delle armature sono presenti acqua e ossigeno, oppure, nel caso di correnti vaganti, se l'interferenza continua nel tempo.

CARBONATAZIONE DEL CALCESTRUZZO

L'anidride carbonica presente nell'atmosfera (0,04% in ambiente rurale, 0,2 % in ambiente cittadino), a contatto con il calcestruzzo, tende a neutralizzare, a partire dagli strati più esterni, i suoi componenti alcalini.



La velocità con cui avanza la carbonatazione dipende da molti fattori:

ambientali: umidità, temperatura, concentrazione dell'anidride carbonica

caratteristiche del cls stesso: alcalinità, porosità

La velocità di carbonatazione aumenta all'aumentare di tutti i fattori sopra elencati, ad eccezione dell'umidità.

L'umidità influisce sulla velocità di carbonatazione secondo due meccanismi che hanno effetto opposto:

il trasporto dell'anidride carbonica all'interno del cls ha luogo più facilmente attraverso i pori riempiti d'aria, molto più lentamente in quelli riempiti d'acqua

la reazione di carbonatazione avviene solo in presenza d'acqua ($UR > 40\%$)

L'intervallo di UR più pericoloso per la carbonatazione è compreso fra il 50 e l'80%.

Velocità di carbonatazione

La reazione di carbonatazione inizia dalla superficie esterna del calcestruzzo e poi interessa le regioni più interne.

La penetrazione nel tempo segue una legge del tipo:

$$s = K \cdot t^{1/n}$$

s = spessore dello strato carbonatato [mm]

t = tempo [anni]

K = coefficiente di carbonatazione

n $\left\{ \begin{array}{l} \cong 2 \text{ per la maggioranza dei calcestruzzi} \\ > 2 \text{ per calcestruzzi molto compatti} \end{array} \right.$

Il parametro K dipende da fattori ambientali (umidità, temperatura, contenuto di anidride carbonica) e da fattori legati al calcestruzzo (quantità di cemento, tipo di cemento, porosità)

Nelle strutture esistenti è possibile misurare nelle diverse parti dell'opera la penetrazione della carbonatazione, s_1 , e quindi, nota l'età della struttura, t_1 , determinare sperimentalmente il coefficiente K .

$$K = \frac{s_1}{\sqrt{t_1}}$$

In questo modo si può prevedere con precisione la progressione futura della carbonatazione.

$$s = K \cdot \sqrt{t}$$

Valori del parametro K misurati su strutture esposte all'atmosfera e protette dalla pioggia:

$2 < K < 5$ mm/anno^{1/2} per calcestruzzi di elevata compattezza

$5 < K < 8$ mm/anno^{1/2} per calcestruzzi di media compattezza

$8 < K < 12$ mm/anno^{1/2} per calcestruzzi di bassa qualità

La carbonatazione di per sé non provoca alcun danno al cls; anzi, ne riduce la porosità, aumenta la durezza e porta a una maggiore resistenza meccanica.

Ha invece importanti conseguenze sulle armature perché il pH, da valori iniziali di 13-14, passa a valori vicini alla neutralità, cioè al di sotto del valore 11,5, necessario per assicurare, in assenza di cloruri, le condizioni di passività.

Una seconda conseguenza è la liberazione di cloruri nell'acqua dei pori, che così diventa più aggressiva.

CORROSIONE DA CLORURI

I cloruri rappresentano una causa frequente di corrosione delle armature.

Le normative attuali vietano l'uso di materie prime che ne contengano una significativa concentrazione, ma in opere realizzate in passato è possibile verificare la presenza di cloruri, introdotti o con l'acqua di impasto, con sabbia di mare non lavata, o con alcuni additivi.

I sali a base di cloruri possono penetrare dall'ambiente esterno: in particolare, strutture marine, opere stradali su cui si spargono sali disgelanti.

L'attacco corrosivo può aver luogo solo quando la concentrazione dei cloruri ha un valore sufficientemente alto nel cls a contatto con le armature.

Inoltre, il contenuto di cloruri necessario per danneggiare il film protettivo dipende dal potenziale delle armature, che a sua volta è legato alla quantità di ossigeno che raggiunge la loro superficie.

Quindi:

la corrosione può aver luogo per un contenuto di cloruri relativamente basso quando il cls è esposto all'aria

è necessario un contenuto molto più alto quando il cls è immerso in mare.

Particolarmente degradabili sono le strutture soggette ad **immersione temporanea**



Nelle strutture che presentano fenomeni di degrado dei materiali, è opportuno estendere gli interventi non solo alle zone in cui il danneggiamento è evidente, ma anche a quelle in cui il degrado è già in fase avanzata o sta progredendo rapidamente.

E' allora importante individuare fino a quale profondità si è estesa la carbonatazione del calcestruzzo e/o la penetrazione degli ioni cloruro.

Sulla base delle misure del degrado attuale, si possono fare anche previsioni circa i probabili tempi di propagazione.

La **profondità di carbonatazione** si può determinare mediante la prova alla fenolftaleina (UNI 9944):

Sulla superficie del campione, subito dopo l'estrazione, si spruzza un velo di soluzione alcolica di fenolftaleina:

il calcestruzzo carbonatato non modifica il suo colore,

il calcestruzzo non ancora carbonatato assume il colore rosa della fenolftaleina in ambiente alcalino.



La prova deve essere effettuata su una superficie fresca di rottura, perpendicolare alla superficie esterna del calcestruzzo.

Sulla base di una campionatura sufficientemente estesa, è possibile stimare la penetrazione della carbonatazione nelle varie parti della struttura (dove possono variare le condizioni di esposizione e quindi la velocità di penetrazione).

Confrontando la profondità della carbonatazione con lo spessore di copriferro effettivo, misurato sulla struttura, è possibile individuare le zone in cui la carbonatazione ha raggiunto le armature e prevedere i tempi in cui questo si verificherà.

Analisi del **contenuto di cloruri**:

analisi chimiche su campioni rappresentativi di diverse profondità per determinare dei profili di contenuto totale di cloruri.

Si possono utilizzare carote che vengono tagliate in fette oppure campioni ottenuti raccogliendo la polvere prelevata a diverse profondità con un trapano.

Normativa di riferimento

UNI 7087:2002 – Cls. Determinazione della resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo.

UNI 9535:1989 – Corrosione e protezione dell'armatura del cls. Determinazione del potenziale dei ferri d'armatura.

UNI 9944:1992 – Corrosione e protezione dell'armatura del cls. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel cls.

UNI 10322:1994 – Corrosione delle armature delle strutture di cls. Metodo per la determinazione del grado di protezione del cls nei confronti dell'armatura.

Rilievo dei difetti interni tramite misure di propagazione degli ultrasuoni

Principio di base: in un mezzo omogeneo, la velocità con cui gli impulsi vibrazionali si propagano è funzione delle caratteristiche elastiche del mezzo (modulo di elasticità e modulo di Poisson dinamici) e della sua densità.

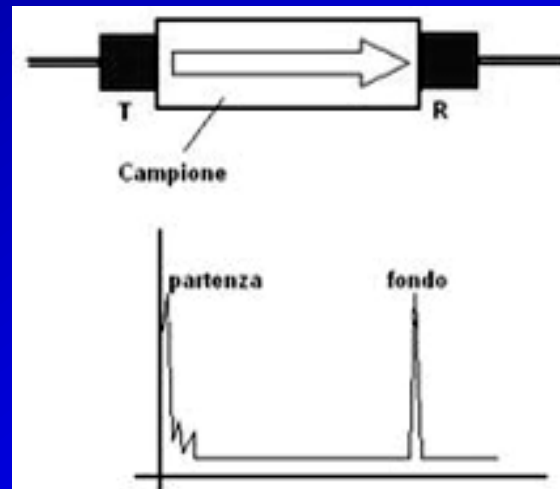
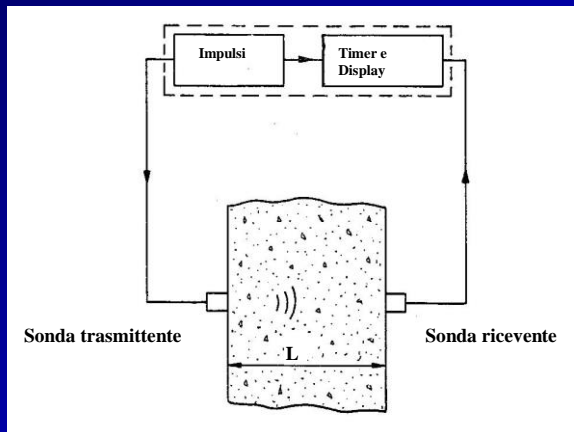
$$V_P = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1 - \nu_d}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}}$$

Nel cls la velocità di trasmissione è legata alla resistenza: in genere a maggiore resistenza corrisponde maggiore modulo elastico, per cui maggiore velocità.

La velocità però è influenzata anche da altri fattori, fra cui la presenza di difetti e le disomogeneità.

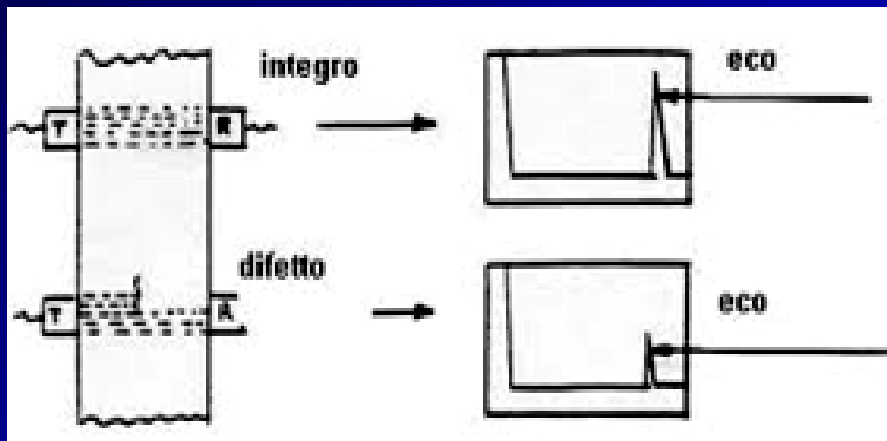
Gli strumenti a ultrasuoni per cls sono provvisti di due sonde che vengono posizionate in punti contrapposti: gli impulsi emessi dalla prima vengono ricevuti dalla seconda dopo aver attraversato il materiale in esame, lungo una traiettoria (generalmente rettilinea) che congiunge i due punti.

E' possibile misurare il tempo impiegato dall'impulso per percorrere tale traiettoria, che permette, nota la lunghezza, di ricavare la velocità delle onde.

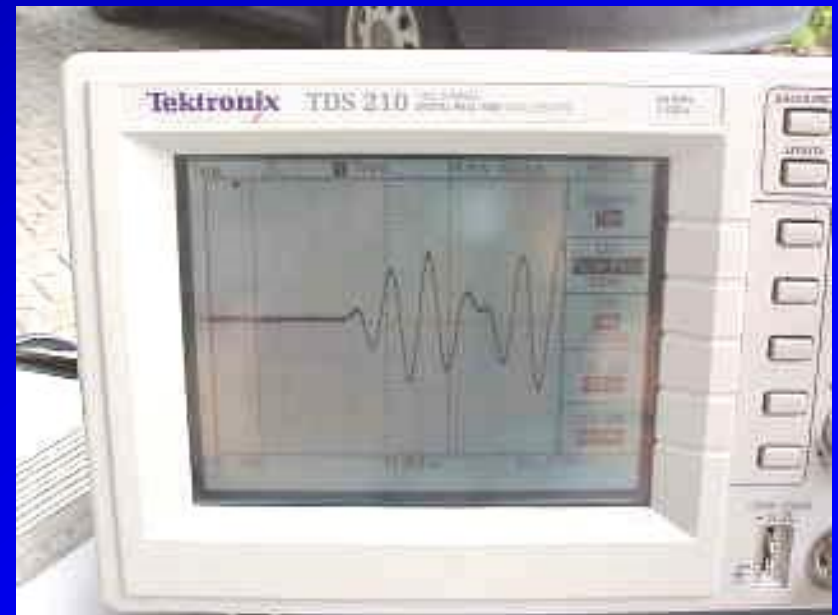


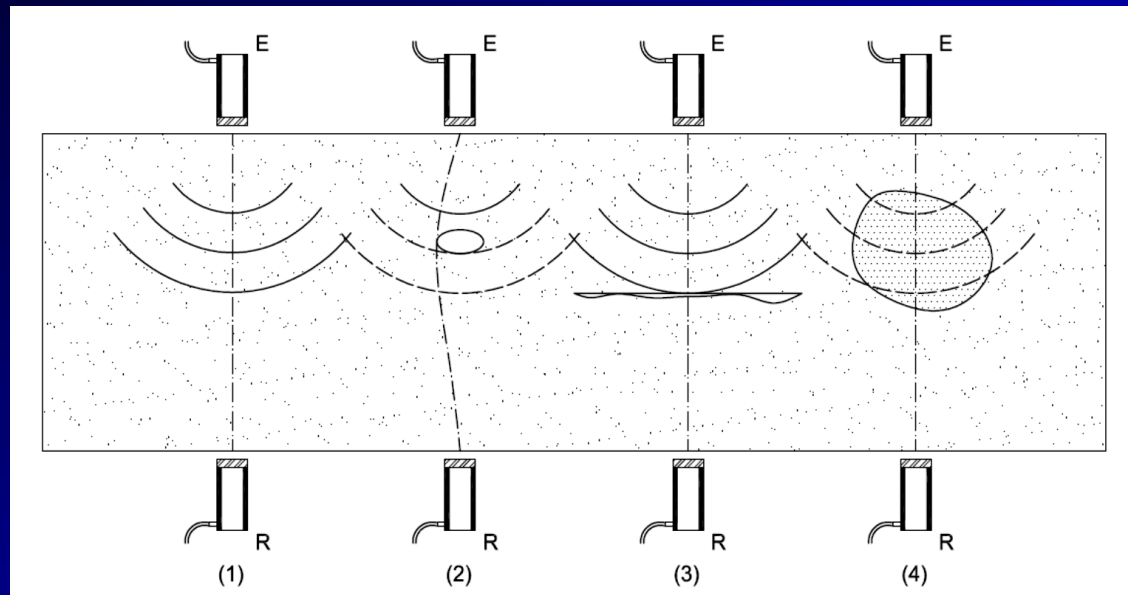
In presenza di disomogeneità o di difetti, le onde ultrasonore subiscono fenomeni di rifrazione e/o di riflessione.

Tali fenomeni influenzano la velocità di trasmissione delle onde e la dissipazione di energia durante il percorso.



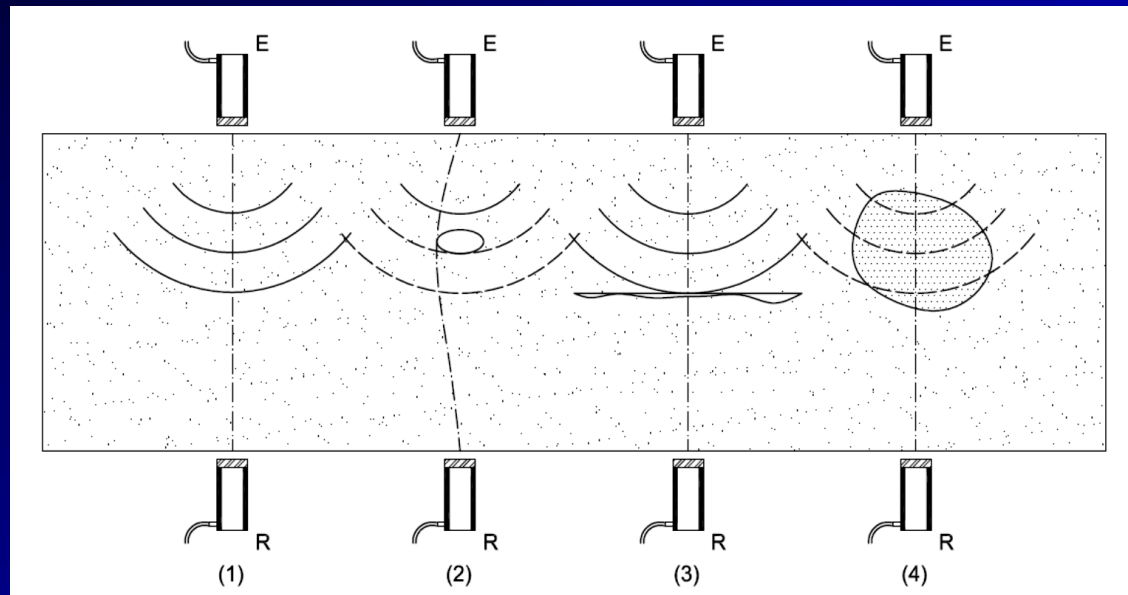
Per valutare l'energia dissipata è utile analizzare l'onda attraverso un oscilloscopio collegato allo strumento a ultrasuoni





traiettoria 1: assenza di difetti: le misure forniscono valori di velocità e di attenuazione relativi al calcestruzzo integro

traiettoria 2: presenza di una cavità macroscopica: riduzione della velocità, causata dall'allungamento del percorso, maggiore attenuazione per fenomeni di riflessione



traiettoria 3: la traiettoria attraversa una fessura che presenta punti di contatto: le onde si trasmettono senza deviazioni, perciò la velocità rimane invariata; gran parte dell'energia viene riflessa causando una maggiore attenuazione

traiettoria 4: zona di materiale di peggiori caratteristiche: riduzione della velocità, l'attenuazione rimane inalterata

Danni da incendio in elementi strutturali in c.a.

Il cls resiste abbastanza bene al fuoco:

- il periodo di tempo nel quale mantiene le sue proprietà è abbastanza lungo
- non vengono emessi fumi tossici
- perdita di resistenza ed abbattimento del modulo elastico si verificano dopo i 300°

La temperatura massima a cui è stato sottoposto un cls è indicata dal colore della superficie:

- rosa o rosso 300° - 600°
- grigio scuro 600° - 900°
- marrone 900° - 1200°
- giallo > 1200°

cls di colore nero è stato soggetto solo al fumo

L'azione del fuoco introduce un forte gradiente di temperatura:

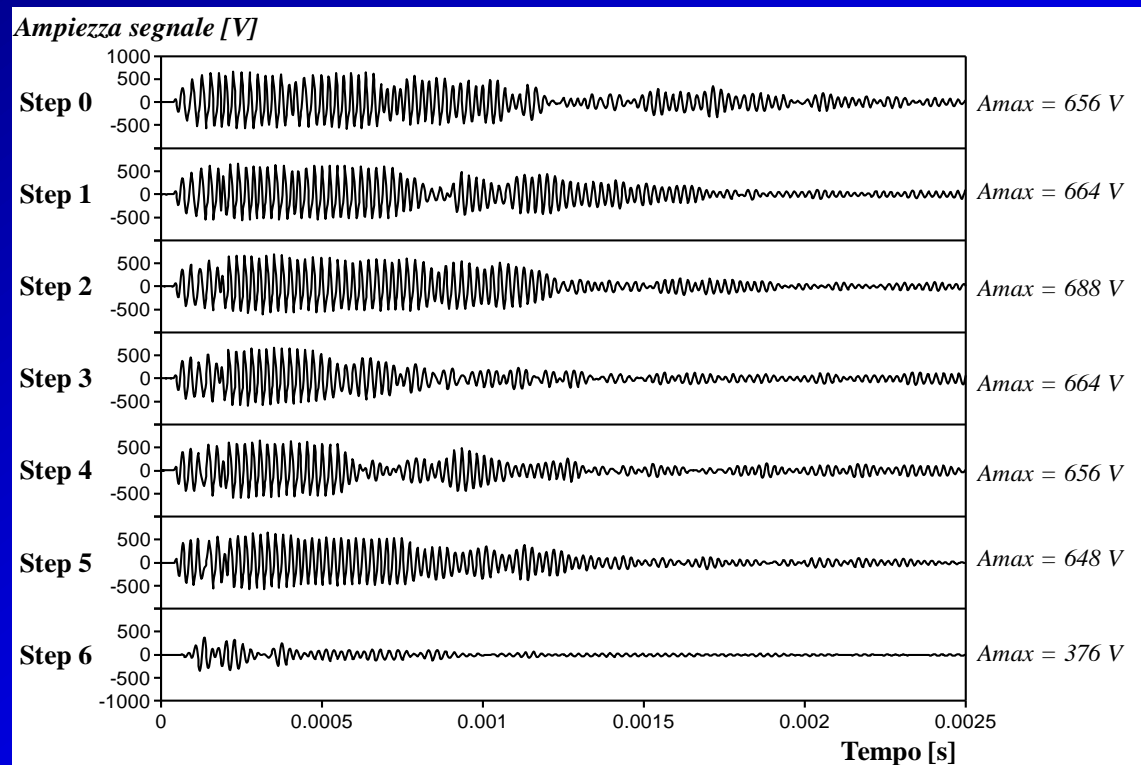
- fra zone esposte e zone meno esposte
- legato alla inerzia termica: la superficie esterna, più calda, tende a distaccarsi
- in presenza di armature: per la diversa conducibilità termica dei due materiali

Le parti a temperatura più alta si dilatano maggiormente, inducendo tensioni di trazione nelle parti più fredde. Queste provocano lesioni, fratture, anche interne, distacco di scaglie.

Prove con ultrasuoni per l'individuazione di danni causati da incendio

Il danneggiamento interno è correlato con l'energia del segnale, piuttosto che con la velocità

segnali ottenuti su un campione via via più danneggiato



Il degrado delle strutture in legno

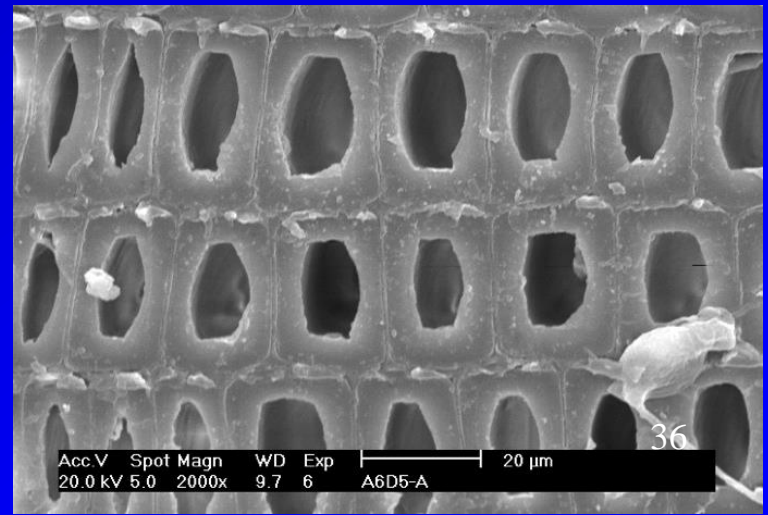
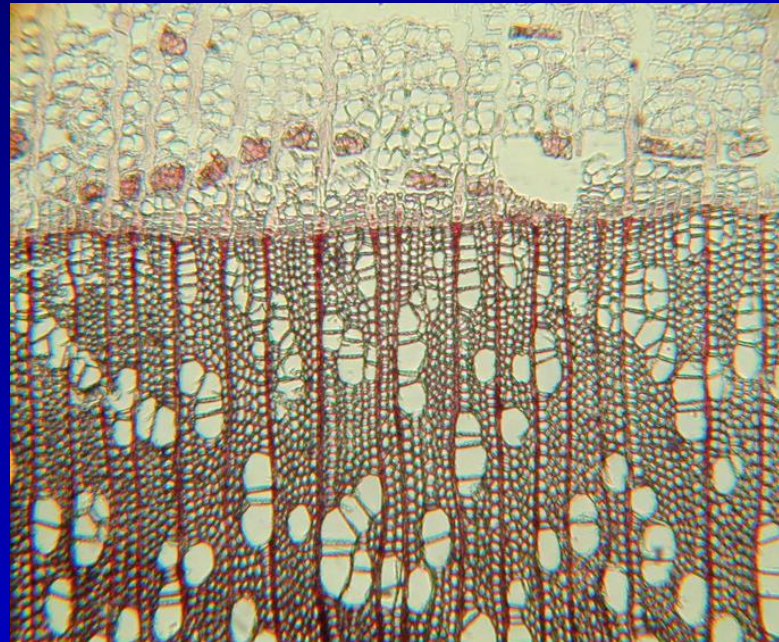
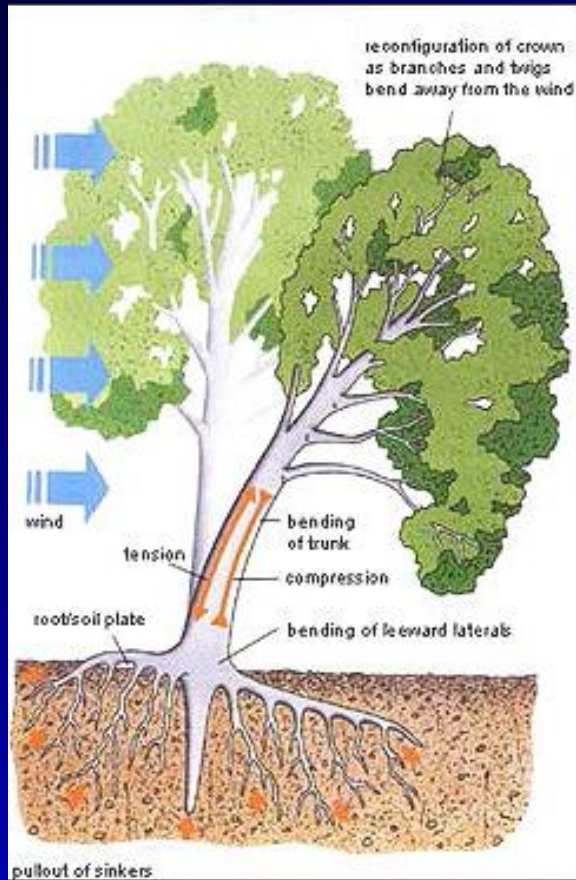


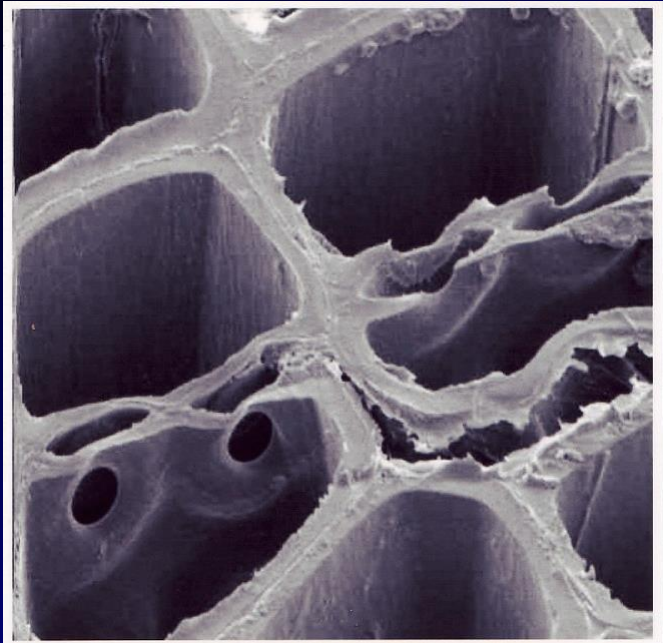
Il legno è un prodotto dell'attività di organismi viventi (alberi)

**Materia fornita da quella parte
del tronco e dei rami che si trova
sotto lo strato corticale**



Gli alberi producono legno per rispondere a due esigenze fisiologiche: sostegno meccanico e conduzione dell'acqua





La costituzione cellulare del legno garantisce sia la funzione di **conduzione** sia quella di **sostegno**.

La costituzione cellulare del legno garantisce un buon rapporto massa volumica/prestazioni.

| Materiale | Massa volumica (Kg/m ³) | Resistenza trazione (kg/cm ²) | Trazione/massa volumica |
|--------------|-------------------------------------|---|-------------------------|
| Acciaio | 7.800 | 15.500 | 1,98 |
| Alluminio | 2.700 | 4.000 | 1,48 |
| Calcestruzzo | 1.900 | 200 (compr.) | 0,11 (compr.) |
| Abete | 500 | 1.000 | 2 |

• Biodegradabilità

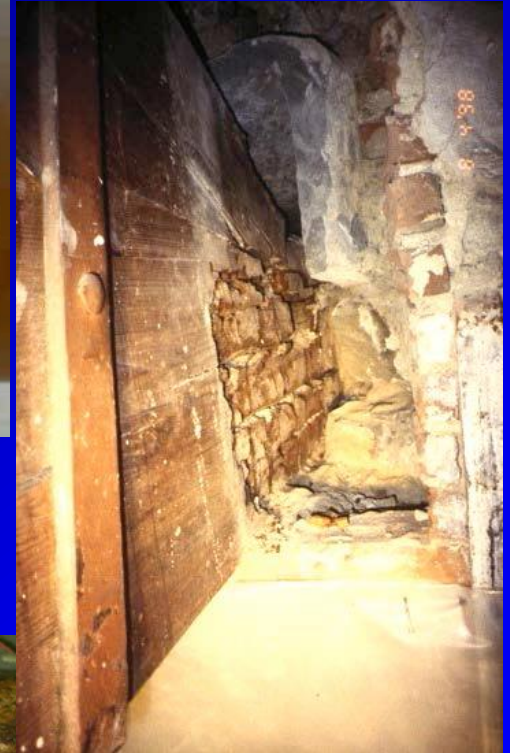
Batteri



Insetti



Funghi



Organismi marini



Insetti

COLEOTTERI

- **Le larve scavano gallerie e si nutrono di cellulosa ed amido**
- **Le gallerie sono piene di “rosame” (polvere)**
- **L’insetto esce e lascia un “foro di sfarfallamento”**
- **L’attacco può ripetersi (deposizione uova) nello stesso manufatto**

ISOTTERI (termiti)

- ***Reticulitermes* non rimane nel legno, lavora al buio**
- **Le altre specie rimangono nel legno ma non si vedono**
- **Danni molto gravi**

Funghi

- **Umidità del legno > 20% (strutture esterne o zone umide). Si fermano essiccando.**
- **Attaccano sia l'alburno che il durame (salvo il durame di alcune specie)**
- **L'attacco è normalmente localizzato ad una zona "umida" dell'elemento**
- **Diminuzione di resistenza totale, ma solo nella zona attaccata**
- **L'azzurramento (bluettatura) non provoca danni meccanici**

Proprietà meccaniche

- Anisotropia
- Elevata correlazione con massa volumica
- Dipendenza dalla durata delle sollecitazioni

- Forte variabilità
 - specie legnosa
 - umidità
 - temperatura
 - difetti

Classificare secondo la resistenza

E' un processo di selezione attraverso il quale *ogni singolo pezzo* di legno può essere inserito in una categoria (gruppo), così da attribuirgli valori affidabili di resistenza e rigidità

Le regole di classificazione sono state sviluppate a fronte di migliaia di prove distruttive, mediante procedure codificate da norme tecniche (DIN, UNI, EN, ...) e decenni di esperienza applicativa.

L'assegnazione di un tipo di legno ad una determinata classe di resistenza viene effettuata in base ai valori caratteristici di resistenza a flessione, modulo di elasticità a flessione e massa volumica, ricavati da prove su campioni

prospetto 1 **Classi di resistenza - Valori caratteristici**

| | | Conifere | | | | | | | | | | | Latifoglie | | | | | | | | |
|---|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | C14 | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 | D18 | D24 | D30 | D35 | D40 | D50 | D60 | D70 |
| Proprietà di resistenza (in N/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Flessione | $f_{m,k}$ | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 18 | 24 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Trazione parallela | $f_{t0,k}$ | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 11 | 14 | 18 | 21 | 24 | 30 | 36 | 42 |
| Trazione perpendicolare | $f_{t90,k}$ | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Compressione parallela | $f_{c0,k}$ | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 25 | 26 | 27 | 29 | 18 | 21 | 23 | 25 | 26 | 29 | 32 | 34 |
| Compressione perpendicolare | $f_{c90,k}$ | 2,0 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 | 3,2 | 7,5 | 7,8 | 8,0 | 8,1 | 8,3 | 9,3 | 10,5 | 13,5 |
| Taglio | f_{vk} | 3,0 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 3,4 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Proprietà di rigidezza (in kN/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Media del modulo di elasticità parallela | $E_{0,mean}$ | 7 | 8 | 9 | 9,5 | 10 | 11 | 11,5 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 9,5 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 17 | 20 |
| Modulo di elasticità parallela al 5% | $E_{0,05}$ | 4,7 | 5,4 | 6,0 | 6,4 | 6,7 | 7,4 | 7,7 | 8,0 | 8,7 | 9,4 | 10,0 | 10,7 | 8 | 8,5 | 9,2 | 10,1 | 10,9 | 11,8 | 14,3 | 16,8 |
| Media del modulo di elasticità perpendicolare | $E_{90,mean}$ | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,37 | 0,38 | 0,40 | 0,43 | 0,47 | 0,50 | 0,53 | 0,63 | 0,67 | 0,73 | 0,80 | 0,86 | 0,93 | 1,13 | 1,33 |
| Media del modulo di taglio | G_{mean} | 0,44 | 0,5 | 0,56 | 0,59 | 0,63 | 0,69 | 0,72 | 0,75 | 0,81 | 0,88 | 0,94 | 1,00 | 0,59 | 0,62 | 0,69 | 0,75 | 0,81 | 0,88 | 1,06 | 1,25 |
| Massa volumica (in kg/m ³) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Massa volumica | ρ_k | 290 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 370 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 | 475 | 485 | 530 | 540 | 550 | 620 | 700 | 900 |
| Massa volumica media | ρ_{mean} | 350 | 370 | 380 | 390 | 410 | 420 | 450 | 460 | 480 | 500 | 520 | 550 | 570 | 580 | 640 | 650 | 660 | 750 | 840 | 1080 |

Nota 1: I valori sopra riportati di trazione, resistenza a compressione, resistenza al taglio, modulo di elasticità al 5%, modulo di elasticità medio perpendicolare alla fibratura e modulo di taglio medio sono stati calcolati utilizzando le equazioni riportate nell'appendice A.

Nota 2: Le proprietà elencate nel prospetto sono compatibili con un'umidità del legno equivalente a una temperatura di 20 °C e un'umidità relativa del 65%.

Nota 3: La disponibilità immediata di legno conformemente alle classi C45 e C50 può non essere consentita.

Nota 4: I valori caratteristici di resistenza al taglio sono riferiti a legno senza lacerazioni, secondo la EN 408. L'effetto delle lacerazioni dovrebbe essere segnalato nei codici di progetto.

Diagnostica in situ

| | | |
|----------------|---|------------------------------|
| NORMA ITALIANA | Beni culturali Manufatti lignei Strutture portanti degli edifici - Ispezione <i>in situ</i> per la diagnosi degli elementi in opera | UNI 11119 LUGLIO 2004 |
|----------------|---|------------------------------|

- Identificazione della specie legnosa
- Determinazione dell'umidità del legno
- Determinazione delle condizioni ambientali e della classe di rischio biologico
- Descrizione generale e rilievo geometrico
- Classificazione secondo la resistenza

Regole di classificazione per elementi strutturali lignei in opera

| CARATTERISTICA | | CATEGORIA IN OPERA | | |
|--|------------------------|----------------------------------|----------------------------|--|
| | | I | II | III |
| Smussi | | $\leq 1/8$ | $\leq 1/5$ | $\leq 1/3$ |
| Lesioni varie Cretti da gelo Cipollature | | assenti | assenti | ammissibili, purché in misura limitata |
| Nodi singoli | | $\leq 1/5$ ≤ 50 mm | $\leq 1/3$ ≤ 70 mm | $\leq 1/2$ |
| Gruppi di nodi | | $\leq 2/5$ | $\leq 2/3$ | $\leq 3/4$ |
| Inclinazione della fibratura (pendenza %) | in sezione radiale | $\leq 1/14$ (~7%) | $\leq 1/8$ (~12%) | $\leq 1/5$ (20%) |
| | in sezione tangenziale | $\leq 1/10$ (10%) | $\leq 1/5$ (20%) | $\leq 1/3$ (~33%) |
| Fessurazioni radiali da ritiro | | ammissibili, purché non passanti | | |

Tensioni massime per l'applicazione del metodo delle tensioni ammissibili e moduli medi di elasticità a flessione, per le categorie in opera delle principali specie legnose, applicabili per umidità del legno = 12%

| Specie | Categoria in opera | Tensioni massime (N/mm ²) | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| | | compressione | | flessione statica | trazione parallela alla fibratura ¹⁾ | taglio (parallelo alla fibratura) | modulo di elasticità a flessione |
| | | parallela alla fibratura | perpendicolare alla fibratura | | | | |
| Abete bianco (Abies alba Mill.) | I | 11 | 2,0 | 11,5 | 11 | 0,9 | 13 000 |
| | II | 9 | 2,0 | 10 | 9 | 0,8 | 12 000 |
| | III | 7 | 2,0 | 7,5 | 6 | 0,7 | 11 000 |
| Abete rosso (Picea abies Karst.) | I | 10 | 2,0 | 11 | 11 | 1,0 | 12 500 |
| | II | 8 | 2,0 | 9 | 9 | 0,9 | 11 500 |
| | III | 6 | 2,0 | 7 | 6 | 0,8 | 10 500 |
| Larice (Larix spp.) | I | 12 | 2,5 | 13 | 12 | 1,1 | 15 500 |
| | II | 10 | 2,2 | 11 | 9,5 | 1,0 | 14 500 |
| | III | 7,5 | 2,0 | 8,5 | 7 | 0,9 | 13 500 |
| Pini (Pinus spp.) | I | 11 | 2,0 | 12 | 11 | 1,0 | 13 000 |
| | II | 9 | 2,0 | 10 | 9 | 0,9 | 12 000 |
| | III | 7 | 2,0 | 8 | 6 | 0,8 | 11 000 |
| Castagno (Castanea sativa Mill.) | I | 11 | 2,0 | 12 | 11 | 0,8 | 10 000 |
| | II | 9 | 2,0 | 10 | 9 | 0,7 | 9 000 |
| | III | 7 | 2,0 | 8 | 6 | 0,6 | 8 000 |
| Pioppo (Populus spp.) | I | 10 | 1,5 | 10,5 | 9 | 0,6 | 9 000 |
| | II | 8 | 1,5 | 8,5 | 7 | 0,5 | 8 000 |
| | III | 6 | 1,5 | 6,5 | 4,5 | 0,4 | 7 000 |
| Quercia (Quercus spp.) | I | 12 | 3,0 | 13 | 12 | 1,2 | 13 500 |
| | II | 10 | 2,5 | 11 | 10 | 1,0 | 12 500 |
| | III | 7,5 | 2,2 | 8,5 | 7 | 0,9 | 11 500 |

1) La tensione massima a trazione perpendicolare alla fibratura si assume convenzionalmente uguale a zero.

Ispezione visuale



Ispezioni con Resistograph

L'ispezione strumentale, effettuata tramite trapano resistografico (Resistograph), consente di individuare la presenza di attacchi da agenti patogeni nascosti (insetti e/o fungini) e di stimarne le dimensioni, con il fine di determinare la sezione resistente residua.

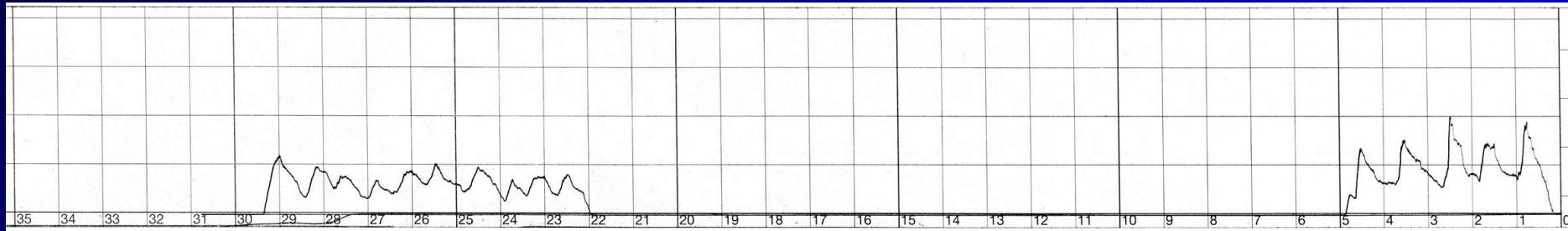
Il Resistograph è un trapano dotato di una lunga punta di piccolo diametro (3 mm), dotata di un movimento combinato di rotazione e di avanzamento a velocità costante, con la quale si pratica un foro nell'elemento in legno da indagare.



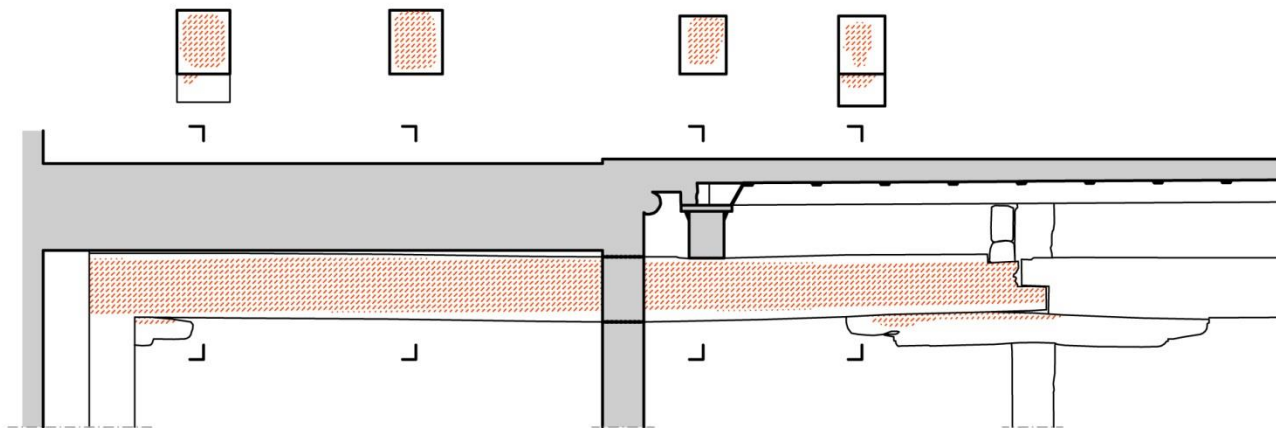
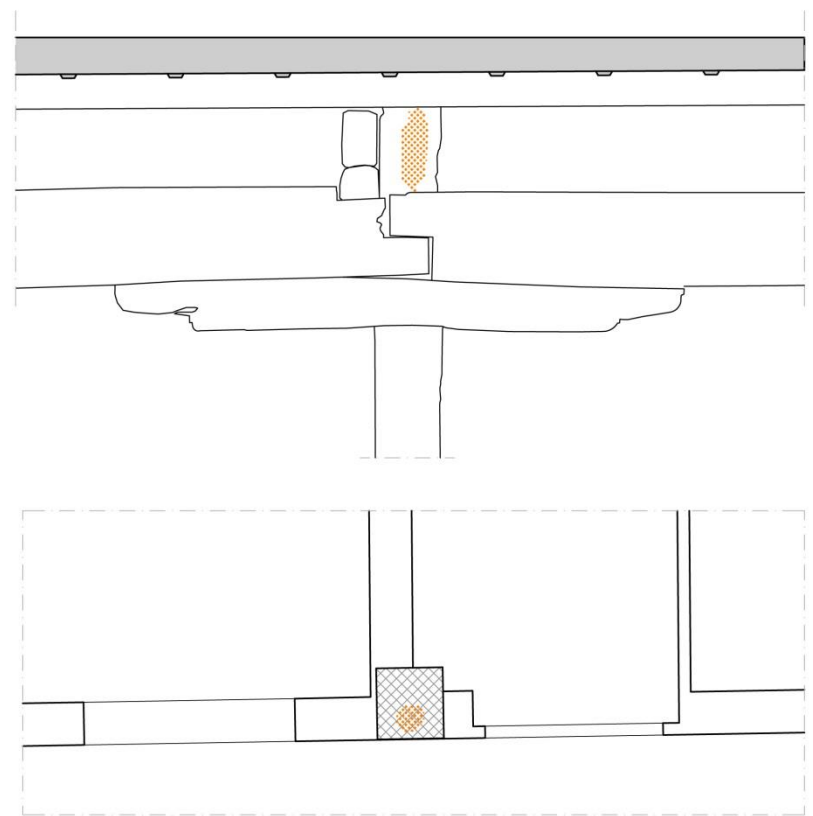
Man mano che la punta avanza, la sua velocità di rotazione varia a seconda della resistenza offerta dal legno; le misure della velocità di rotazione, tradotte in termini di densità convenzionale, sono riportate in un grafico in funzione della profondità progressiva della punta.



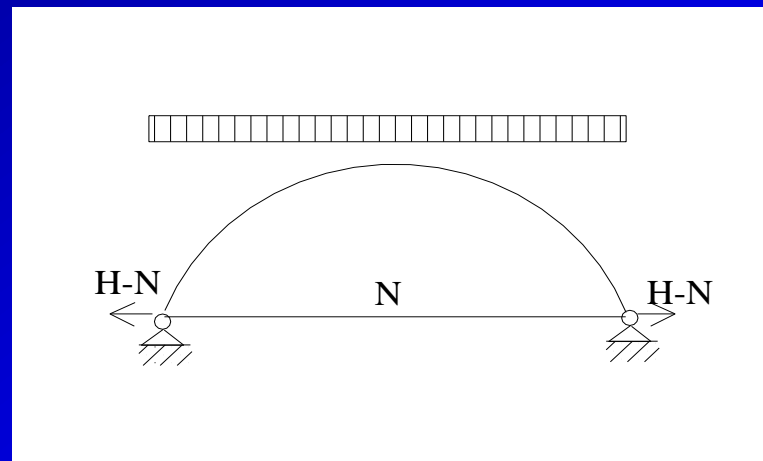
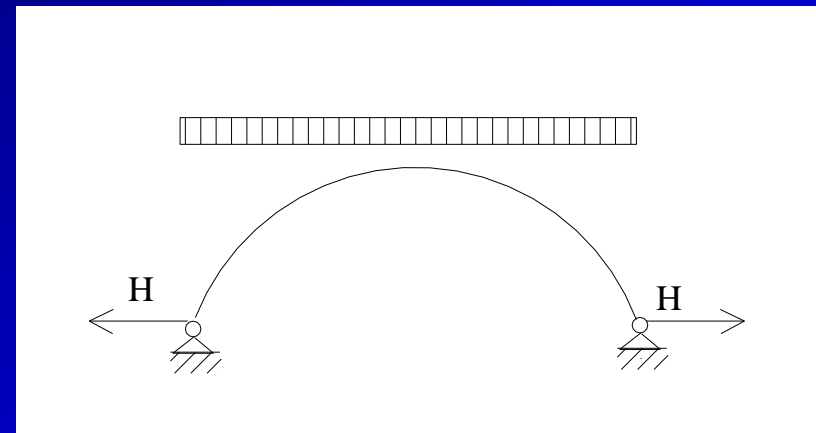
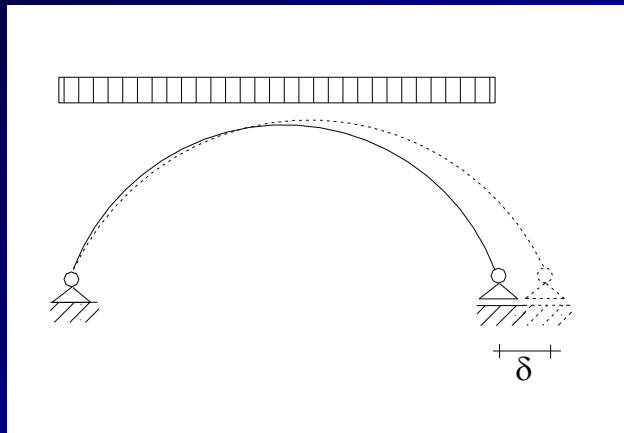
Dall'esame del grafico si possono individuare zone caratterizzate da minore densità, che corrispondono a cavità, fessure, zone putrefatte, ecc.



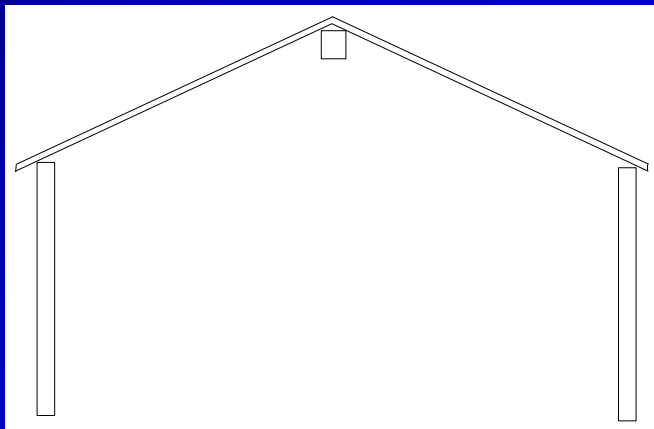
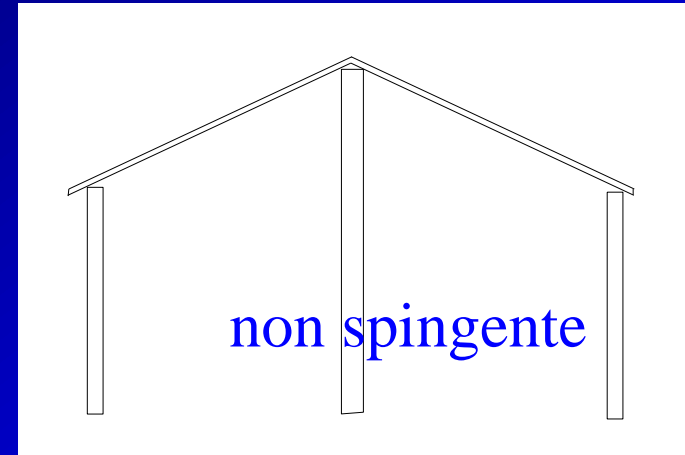
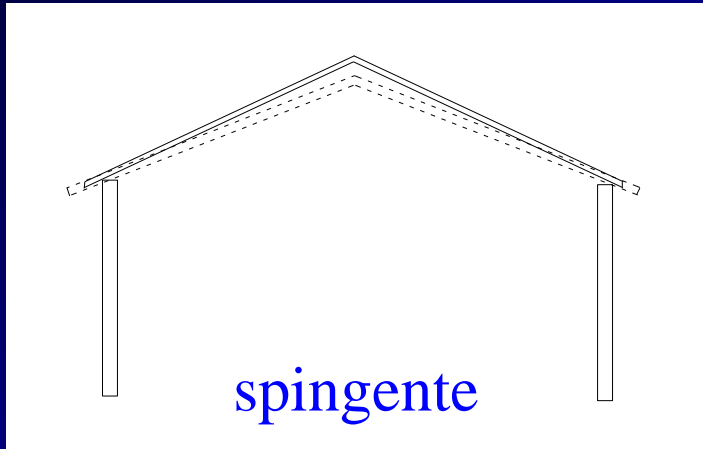
Prove ripetute in più punti di un elemento strutturale forniscono una rappresentazione dell'estensione del degrado all'interno dell'elemento e la determinazione della sezione residua



Strutture spingenti: archi e volte



Altre strutture spingenti



tanto più spingente quanto
meno rigida la trave di colmo

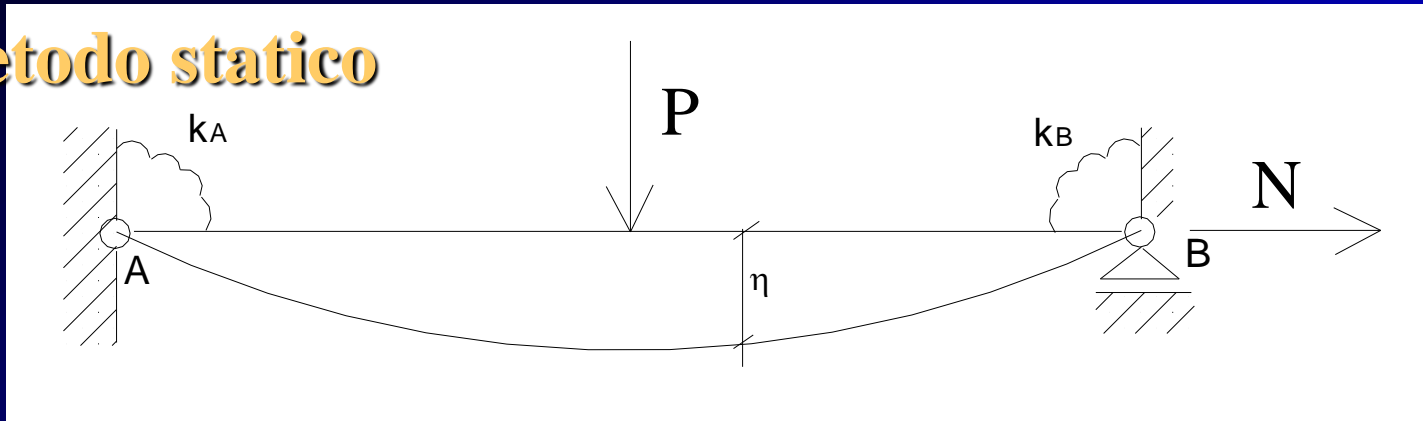
Determinazione del tiro nelle catene metalliche

la determinazione dell'efficienza delle catene e del loro stato di sollecitazione è utile per la valutazione dell'equilibrio di strutture esistenti

se ripetuta a distanza di tempo, può valere da monitoraggio di una struttura dissestata

la determinazione del tiro può essere effettuata tramite prove statiche e/o dinamiche, il cui principio si basa sul fatto che sia la risposta ai carichi statici (inflexione) che la risposta dinamica (frequenza propria di vibrazione) dipendono, oltre che dalle caratteristiche elastiche, anche dal tiro presente

Metodo statico



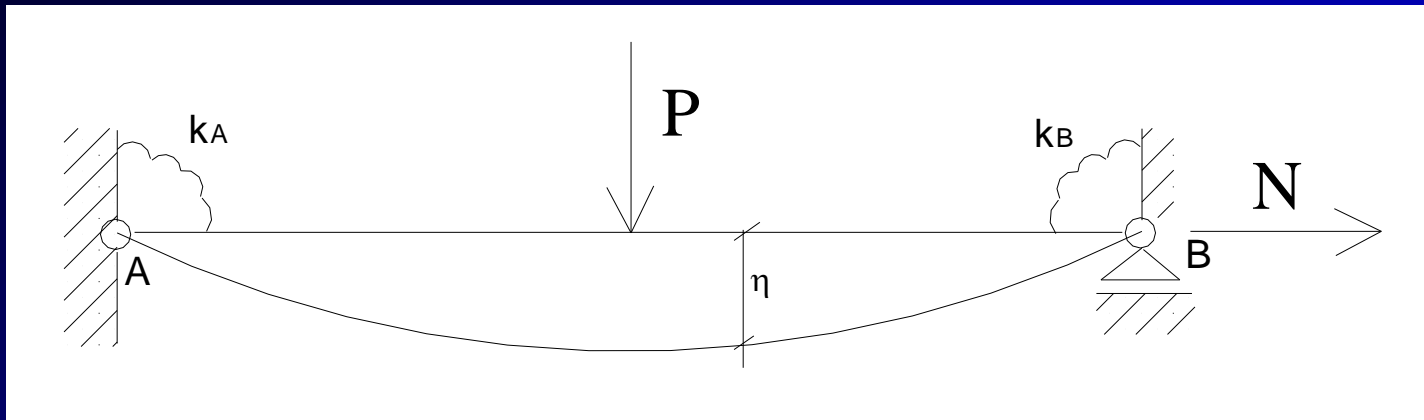
Poiché le catene sono strutture piuttosto flessibili, gli effetti del secondo ordine sono importanti.

Nella catena tesa e caricata trasversalmente, il momento flettente in ciascuna sezione dipende, oltre che dal carico P, dall'effetto del tiro N per la corrispondente inflessione η .

$$M = -N\eta + M_0 \quad M_0 \text{ momento flettente dovuto al solo carico P}$$

derivando due volte:

$$M'' + \alpha^2 M = 0 \quad \alpha^2 = -\frac{N}{EJ}$$



modello strutturale di una catena:

trave molto snella vincolata alle estremità con incastri cedevoli (molle rotazionali di rigidezze k_A , k_B)

l'abbassamento di una sezione sotto un qualsiasi carico dipende, oltre che dalla rigidezza flessionale della catena (che si suppone nota), anche dal tiro N e dalle rigidezze delle molle

risolvendo l'equazione differenziale, si ottengono le espressioni degli abbassamenti η nelle diverse sezioni in funzione di N , k_A , k_B

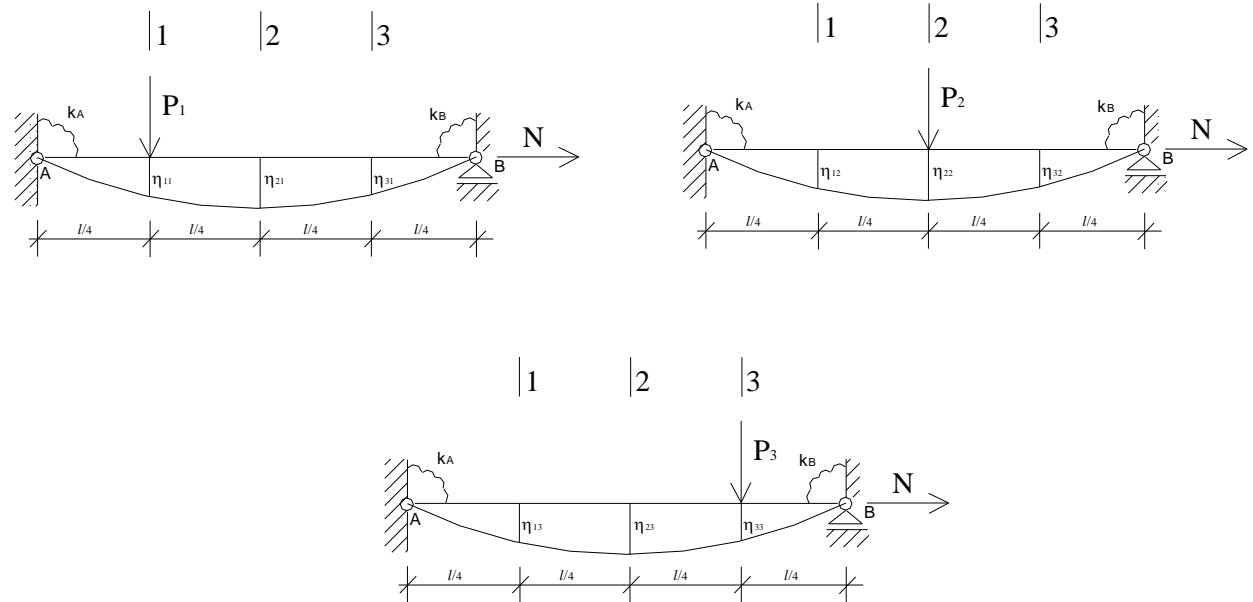
Conduzione della prova

si applica un peso P noto in diverse posizioni lungo la catena (es. ai terzi della luce)

in corrispondenza di ciascuna posizione di P , si misura l'abbassamento in diverse posizioni (es. ai terzi della luce)

in definitiva disponiamo di 9 valori di misure di abbassamento

→ η_{Si}



Elaborazione dei dati

- corrispondentemente, disponiamo di espressioni matematiche che forniscono gli abbassamenti η_{Qi} in funzione del carico P e di N , k_A , k_B
- errore quadratico totale = somma degli scarti fra i valori sperimentali e di calcolo:
$$E^2 = \sum_i (\eta_{Si} - \eta_{Qi})^2$$
- si ricercano i valori di k_A , k_B , N che rendono minimo E^2

Il procedimento dà risultati tanto meglio approssimati quanto più la catena è snella