



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA BASILICATA
Scuola di Ingegneria



Corso di
TECNICA DELLE COSTRUZIONI

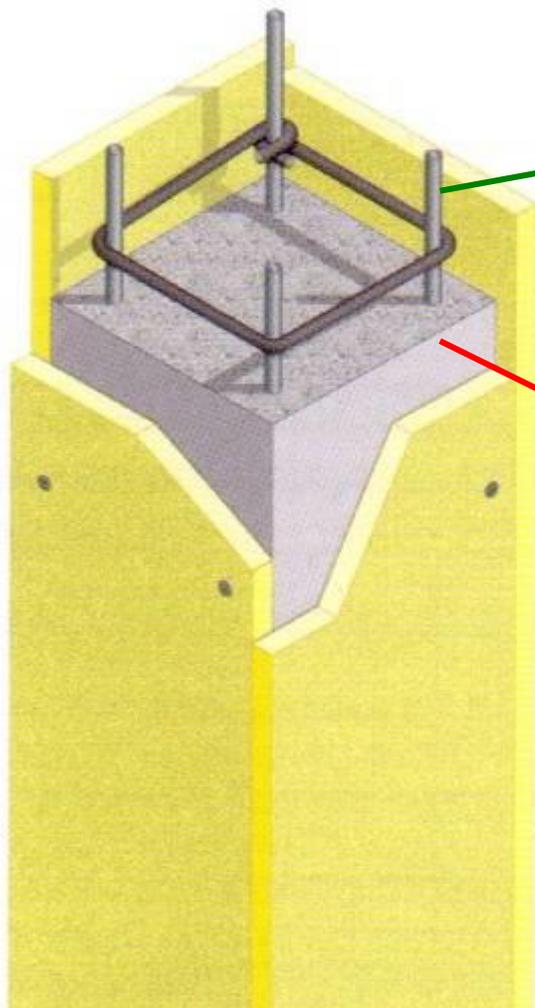
IL MATERIALE e LA TECNOLOGIA del
CEMENTO ARMATO

Docente:
Prof. Ing. Angelo MASI

Collaboratori:
Ing. Vincenzo MANFREDI
Ing. Giuseppe VENTURA

EDIFICI CON STRUTTURA IN CEMENTO ARMATO

CEMENTO ARMATO = CALCESTRUZZO + ACCIAIO



ARMATURE DI ACCIAIO



CALCESTRUZZO



IL CALCESTRUZZO ARMATO (C.A.)

(in inglese **reinforced concrete**; in francese **béton armé**)

Calcestruzzo di cemento +

Acciaio (da c.a.) =

CALCESTRUZZO ARMATO

(propriamente indicato con **conglomerato cementizio armato** ma comunemente chiamato **cemento armato**)

PREGI

- Facilità di esecuzione
(*costo ridotto*)
- Lavorabilità e monoliticità
- Elevata durabilità
(*resistenza agli agenti atmosferici*)
- Buona resistenza al fuoco

DIFETTI

- Elevato peso di volume
($\approx 25 \text{ kN/mc}$)
- Dilatazioni termiche elevate
- Fenomeni di ritiro

IL CALCESTRUZZO

L'ACCIAIO

CARATTERISTICHE

- Materiale **artificiale di tipo lapideo** (si ottiene mescolando in dosi opportune degli inerti naturali con acqua e cemento)
- **Buona resistenza a compressione** (tipicamente 25÷35 MPa)
- **Protegge le barre di armatura dalla corrosione** (ambiente basico)

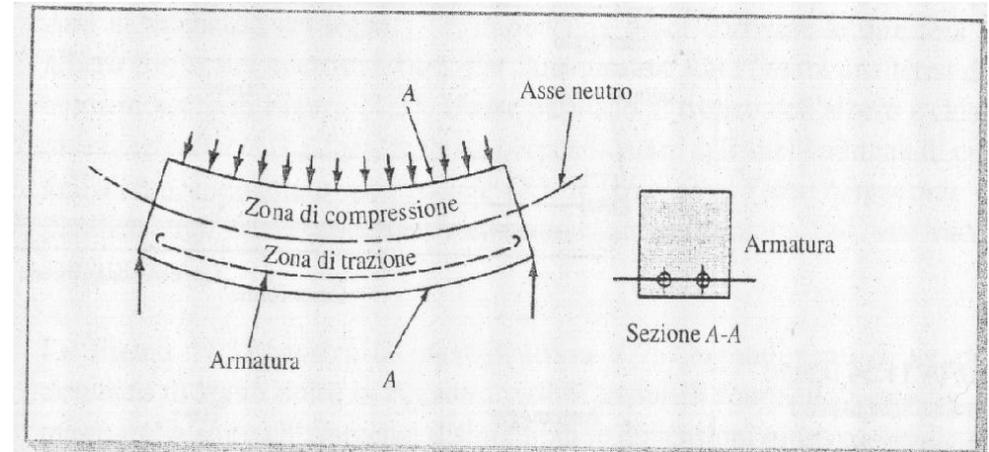
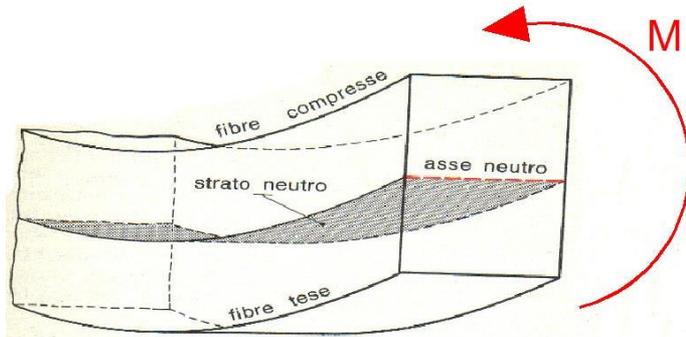
- Materiale **omogeneo**
- **Elevata resistenza sia a compressione sia a trazione** (tipicamente 400-500 MPa)
- **materiale a comportamento duttile**
- **prodotto industriale** (maggiori garanzie sulle proprietà)

DIFETTI

- materiale **non omogeneo**
- **scarsa resistenza a trazione**
- **comportamento fragile**
- **resistenza molto legata alle fase di esecuzione**

- **costo elevato**
- **sensibilità alla corrosione**

IL CALCESTRUZZO ARMATO



- Gli sforzi di trazione (ad es. quelli derivanti dal momento flettente M) sono affidati **esclusivamente all'acciaio**
- Gli sforzi di compressione sono affidati **principalmente al calcestruzzo (CLS)**, ma può contribuire anche l'acciaio)

La collaborazione resistente **calcestruzzo + acciaio** è possibile poiché:

- hanno un valore pressoché coincidente del coefficiente di dilatazione termica ($\approx 10^{-6}$ mm/C°);
- a seguito dei fenomeni che si verificano nel processo di maturazione del calcestruzzo, tra i due materiali si realizza un'elevata aderenza chimico-fisica

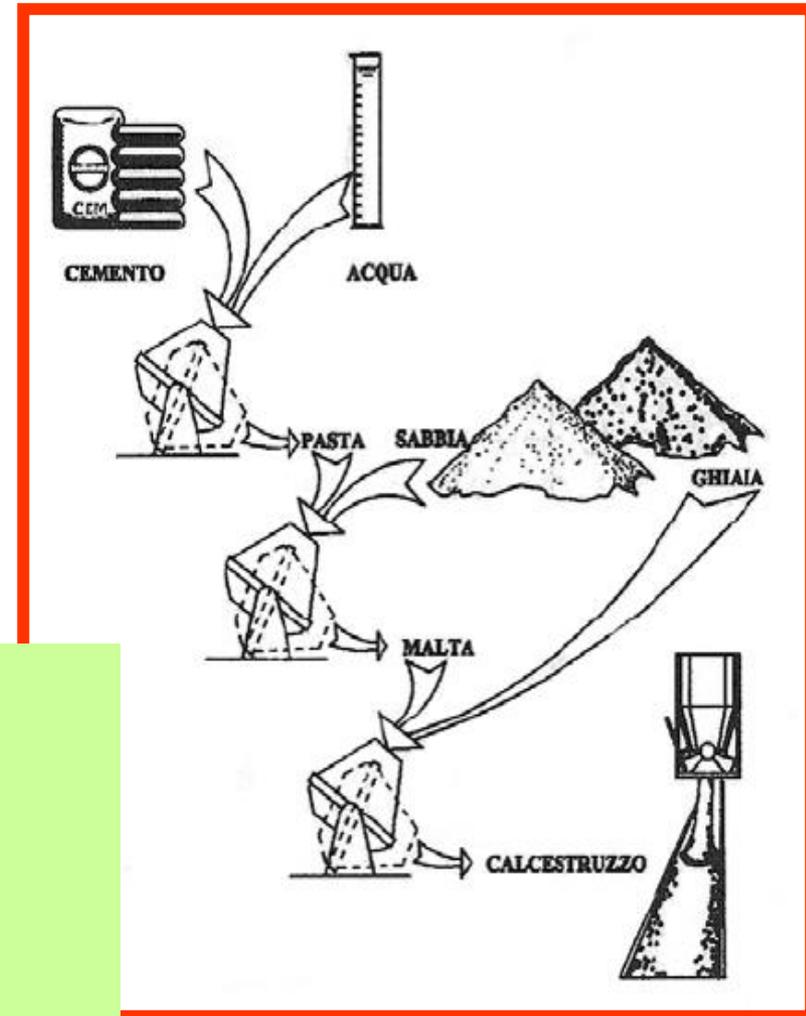
LA TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO

Il CLS si ottiene miscelando i seguenti componenti:

- **Inerti** (scheletro del CLS)
 - +
 - **Cemento** (*legante*)
 - +
 - **Acqua**
 - +
 - **Additivi** (eventuali)

Combinando i diversi componenti si può ottenere (progressivamente):

- Acqua + cemento = **pasta di cemento**
- Pasta di cemento + sabbia = **malta**
- Malta + ghiaia/pietriscio = **calcestruzzo**



LA MATURAZIONE DEL CALCESTRUZZO

La miscela di acqua e cemento (a cui si aggiungono gli inerti) dà luogo al cosiddetto processo di **idratazione**, costituito da una serie di reazioni chimiche che trasformano l'impasto, rendendolo prima una massa plastica e lavorabile e poi un materiale duro e resistente.

In particolare, con il progredire delle reazioni chimiche tra acqua e cemento, si verificano due fenomeni che determinano i suddetti cambiamenti di tipo fisico-meccanico:

- **PRESA**: consiste in una progressiva riduzione ed infine perdita della lavorabilità posseduta inizialmente dall'impasto
- **INDURIMENTO**: successivamente l'impasto subisce un progressivo aumento della compattezza e resistenza.

In realtà i due processi di presa ed indurimento non sono separati, ossia non avvengono in successione uno dopo l'altro, ma si sviluppano contemporaneamente:

la **presa** si sviluppa prevalentemente nell'arco delle prime decine di ore dopo l'impasto, mentre **l'indurimento** richiede alcune settimane.

LA TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO

IL CEMENTO (legante idraulico)

Il **cemento** (di tipo Portland) si ottiene dalla macinazione di una miscela di **calcare** ed **argilla** cotta ad elevate temperature (*clinker*).

Reagendo con l'acqua (*reazione esotermica*) si osservano i fenomeni di **presa** ed **indurimento**.

In funzione della composizione del clinker e della finezza della macinazione si hanno diversi tipi di cemento^(§):

- **Normali R325**
- **Ad alta resistenza R425**
- **Ad alta resistenza e rapido indurimento R525**
- **A basso calore di idratazione R225 (es. per sbarramenti di ritenuta)**
- **Cemento alluminoso**

^(§) La sigla con cui si indicano i diversi tipi di cemento è costituita da una R che sta per Resistenza ed un numero che indica la resistenza in kg/cm² che deve possedere la pasta di cemento dopo una maturazione di 28 giorni.

GLI INERTI

Formano lo **scheletro** del calcestruzzo e costituiscono il 60-80% del volume.

In funzione delle dimensioni dei granuli si hanno:

- **Inerti a grana fine** (*sabbia*, granuli fino a 5mm)
- **Inerti a grana grossa** (*ghiaia o pietrisco*, particelle fino a 50mm).

La **sabbia** utilizzata è quella estratta dai letti di fiumi o dalle cave.

La sabbia di mare non può essere utilizzata perché contiene sostanze (es. cloruri) che favoriscono la corrosione.

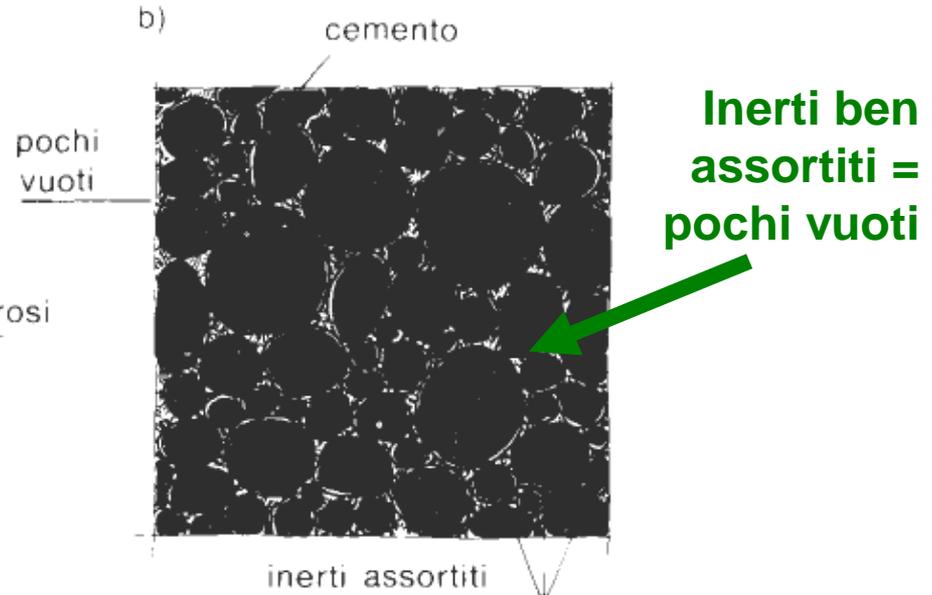
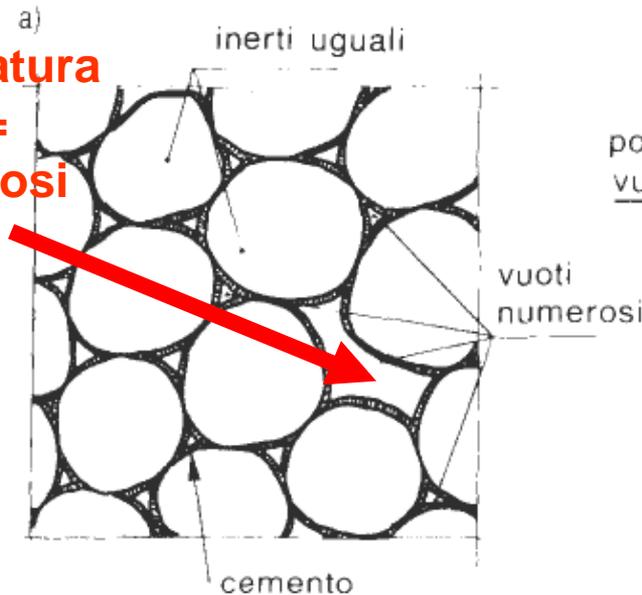
Gli **inerti grossi** sono prodotti dalla frantumazione di rocce (pietrisco) oppure hanno origine naturale (ghiaia presa ad es. da fiumi).

Per ottenere un buon calcestruzzo è fondamentale che la miscela di inerti abbia una corretta composizione e granulometria.

LA TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO: **INERTI**

Per ottenere una **buona compattezza** (→ buona qualità) del cls è necessario un adeguato **assortimento granulometrico** in modo da ridurre al minimo i vuoti

Cattiva dosatura degli inerti = vuoti numerosi e grandi



Possibili problemi derivanti da una granulometria non adeguata:

- Se gli inerti sono in prevalenza composti da granuli molto piccoli (diametro inferiore a mm 10) la quantità di cemento che normalmente si impiega per realizzare il calcestruzzo potrebbe non essere sufficiente a coprire la superficie degli inerti stessi
- Se gli inerti sono in prevalenza composti da elementi molto grossi (diametro superiore a 25 mm) rimangono vuoti molto grandi per il cui riempimento sarebbe richiesta una elevata quantità di cemento

ANALISI GRANULOMETRICA: la curva di FULLER

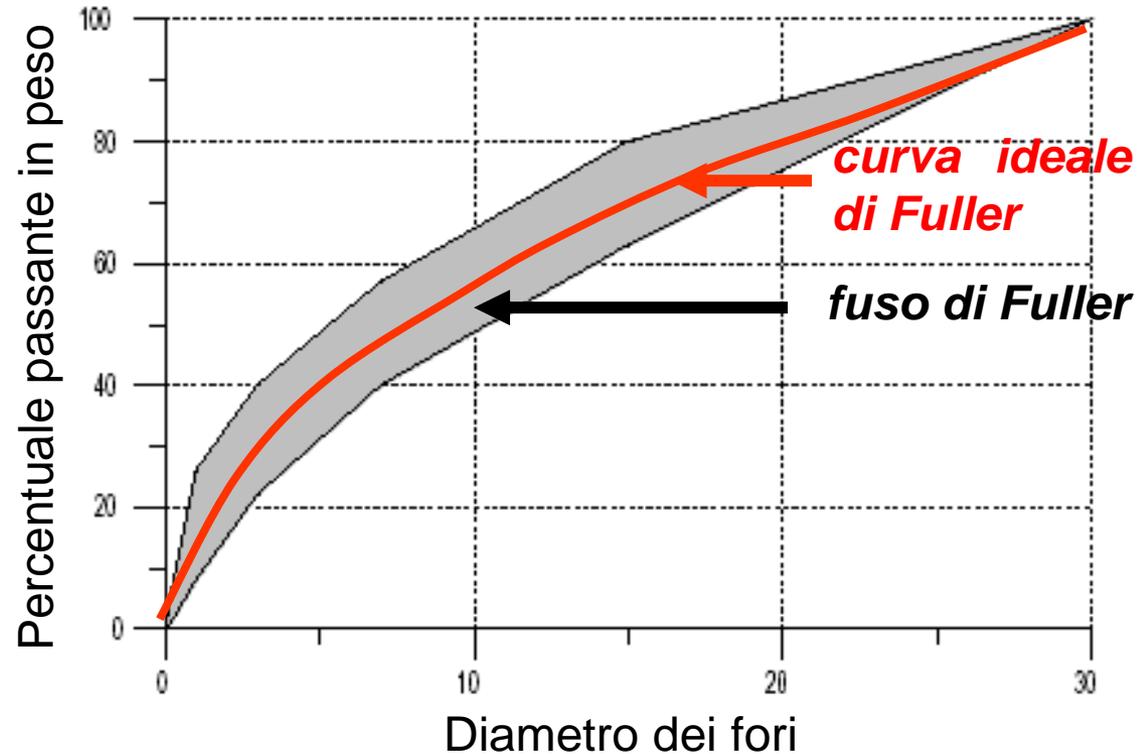
Per dosare in modo adeguato gli inerti viene effettuata una **analisi granulometrica** (costruzione della curva granulometrica).

La curva di Fuller è la curva granulometrica ottimale per gli inerti in quanto è in grado di determinare il minor livello possibile di vuoti.

Colonna di setacci a diametro dei fori
decescente dall'alto verso il basso



Setacci



Equazione della **curva ideale di Fuller**:
$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}$$

LA TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO

ACQUA

- Ha la duplice funzione di consentire:
 - le reazioni di **idratazione con il cemento**
 - la **lavorabilità dell'impasto**.
- L'**acqua** da usare nell'impasto deve essere il più possibile **pura** (quando possibile si consiglia l'uso di acqua potabile).
- In particolare devono essere **evitate acque** contenenti percentuali elevate di **solforati** e acque contenenti **rifiuti di origine organica o chimica**.
- La presenza di impurità interferisce in particolare con il fenomeno di presa, provocando una riduzione della resistenza del conglomerato.

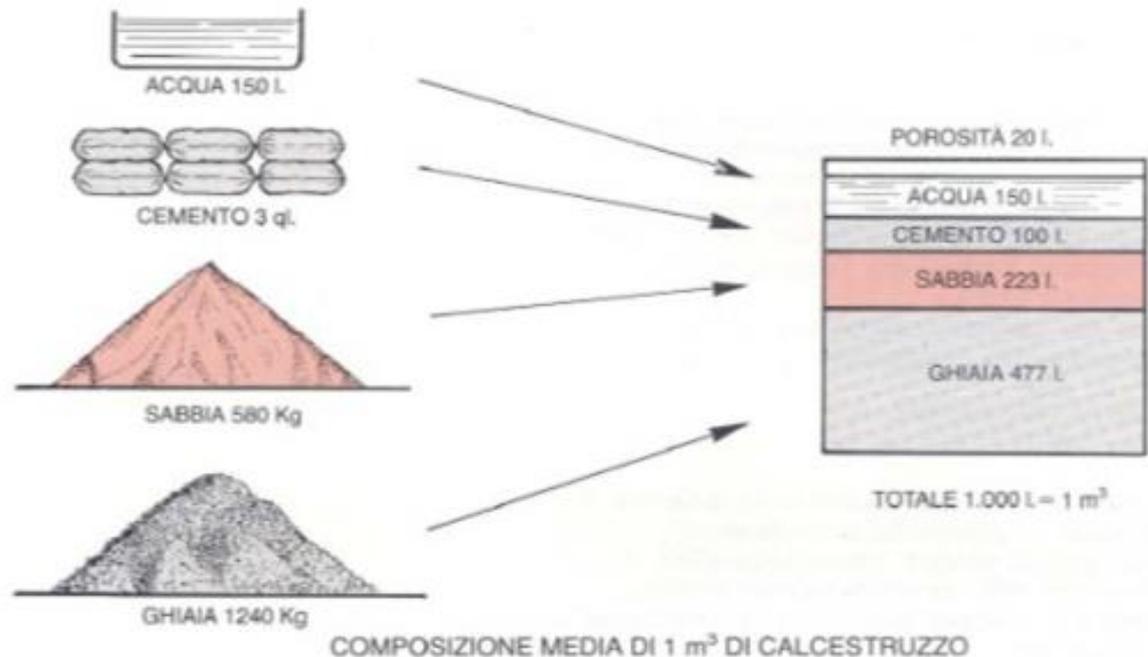
ADDITIVI

Svolgono importanti azioni al fine agevolare la messa in opera (fluidificanti), ridurre gli effetti del *ritiro*, ecc.

LA COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO

Composizione media di 1 m³ di CLS

- 120÷150 litri di acqua
 - 3kN (300kg) di cemento
- 0.4mc di inerte fine (sabbia)
- 0.8mc di inerte grosso (pietrisco e/o ghiaia)



Il **peso di volume del calcestruzzo** (non armato) che si assume nelle analisi dei carichi è circa **24 kN/mc (2400 kg/mc)**

FATTORI CHE INFLUENZANO LA RESISTENZA DEL CLS

Quantità di cemento

- La resistenza del calcestruzzo aumenta con il quantitativo di cemento impiegato.

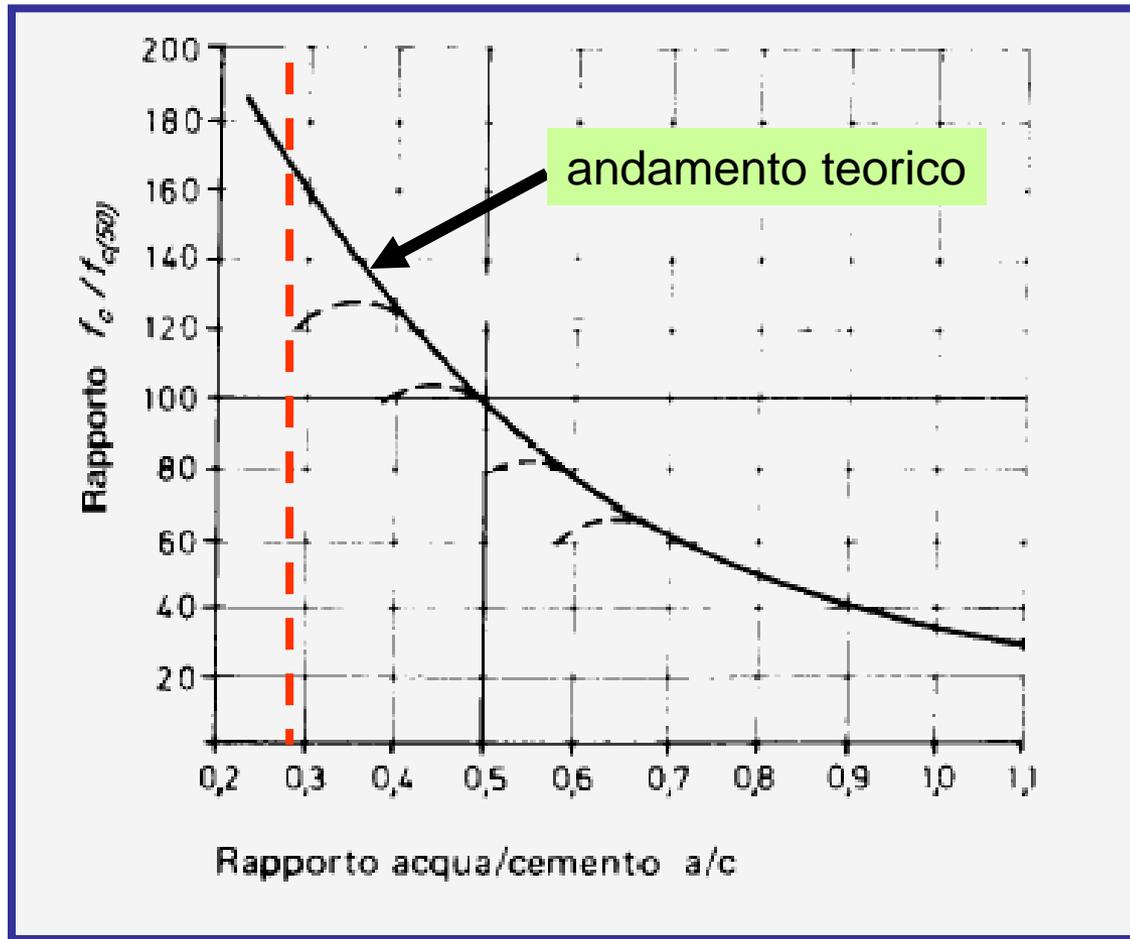
Inerti

- Gli inerti devono essere di buona qualità, puliti e dosati accuratamente.
- Un buon proporzionamento riduce gli spazi vuoti elevando la compattezza e la resistenza

Rapporto Acqua/Cemento (A/C)

- L'eccesso d'acqua determina una rapida riduzione della resistenza del CLS.
- È importante evidenziare che il rapporto A/C strettamente necessario è $0.28 \div 0.30$ (*rapporto stechiometrico*), ma è necessario utilizzare maggiori quantitativi di acqua per ottenere una buona lavorabilità del CLS.
- L'eccesso di acqua aumenta l'entità del ritiro e può arrivare a determinare la separazione degli inerti.

Resistenza del CLS in funzione del rapporto A/C



I valori usuali del **rapporto acqua-cemento** per CLS da gettare in opera sono **compresi tra 0.4 e 0.5**

FATTORI CHE INFLUENZANO LA RESISTENZA DEL CLS

Condizioni ambientali di maturazione del CLS

- Il processo di maturazione (stagionatura) risulta favorito se avviene in ambienti umidi.
- Al contrario il caldo secco può essere dannoso in quanto, provocando una rapida evaporazione dell'acqua dagli strati superficiali, può sfavorire lo sviluppo del fenomeno di presa.
- Il freddo rallenta il fenomeno di presa; inoltre, se l'acqua gela, la formazione di ghiaccio interrompe il processo di idratazione e la crescita di volume rompe i legami già formati.

Compattezza del getto

- Un buon CLS deve presentare una adeguata compattezza (ossia una bassa porosità, importante anche per la protezione delle armature).
- Una buona compattezza si ottiene attraverso un opportuno assortimento granulometrico (fuso di Fuller) e favorendo, in fase di getto, il passaggio della pasta di cemento all'interno dei vuoti (*importanza della vibrazione del getto*).

LA POSA IN OPERA DEL CALCESTRUZZO

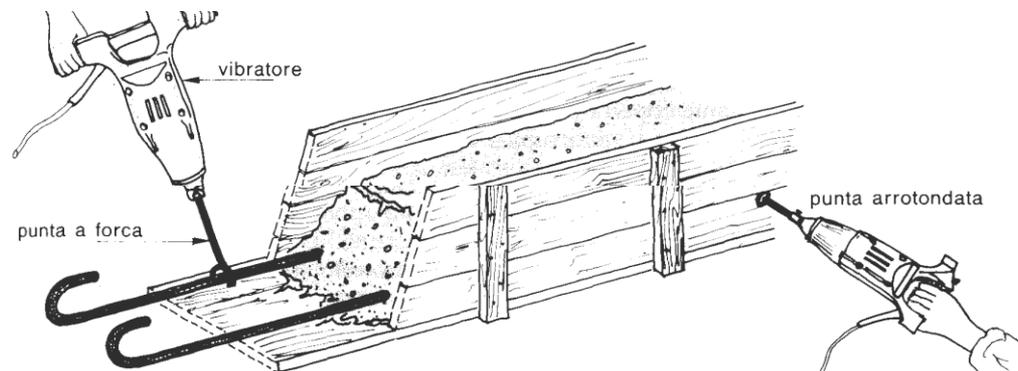
La vibrazione: operazione con la quale si favorisce la compattazione del calcestruzzo

Obiettivi:

- massima compattezza (eliminazione dei vuoti);
- migliorare l'aderenza del calcestruzzo alla armatura metallica.

Tipi di vibratori:

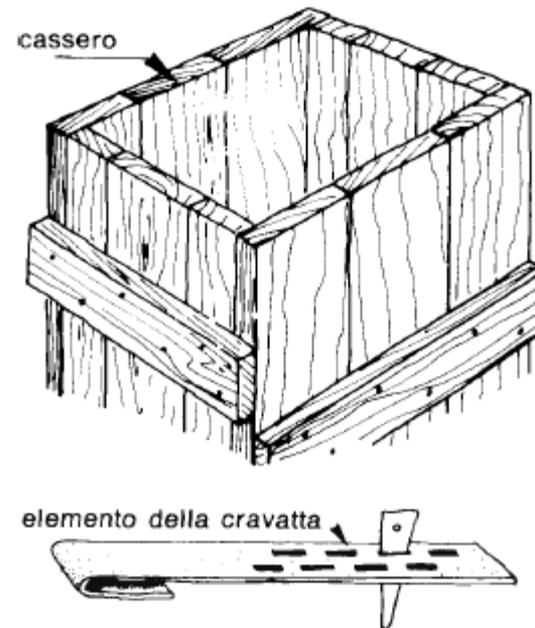
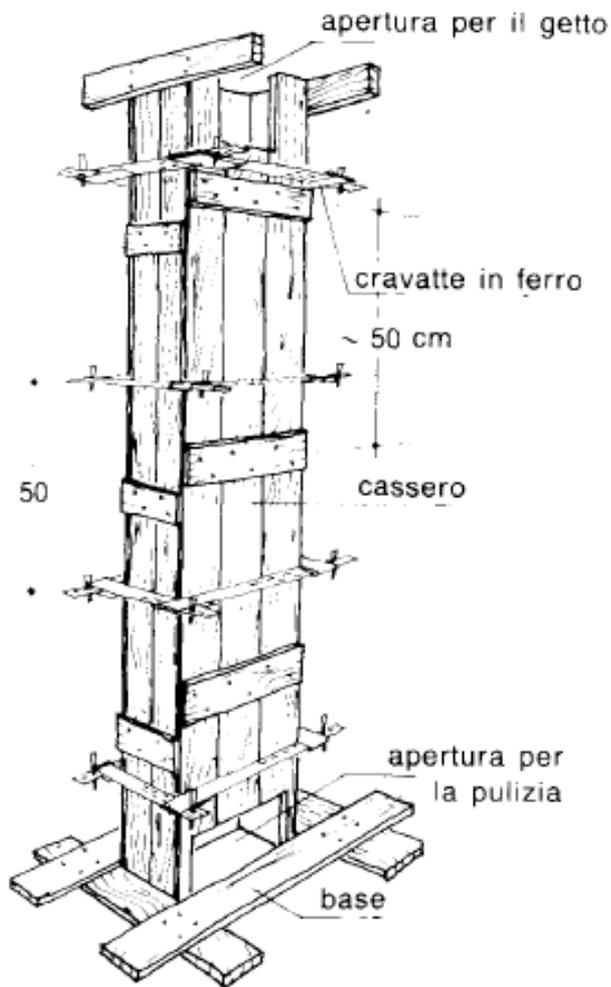
- vibratori interni ad immersione;
- vibratori esterni, che agiscono sulle casseforme;
- vibratori di superfici;
- tavole vibranti



LA POSA IN OPERA DEL CALCESTRUZZO

Cassaforma: struttura di contenimento e di sostegno della massa di CLS fluido (non indurito)

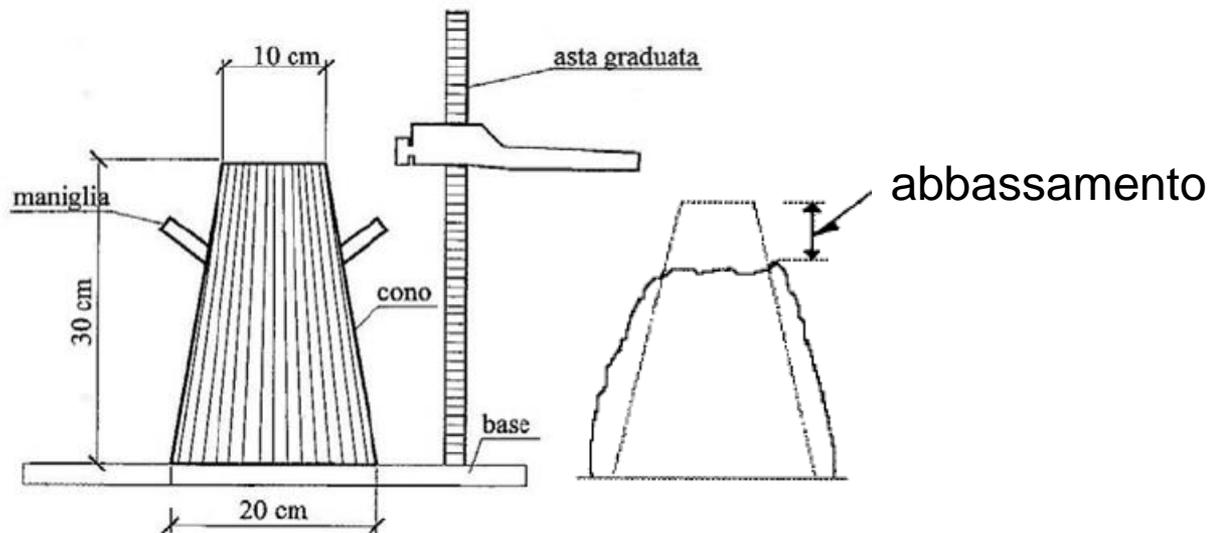
Tipologie: legno, ferro, plastica



Cassaforma in legno e particolari realizzativi

LE PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO

- La **lavorabilità** (o il suo contrario **consistenza**) è un indice delle proprietà del CLS nell'intervallo di tempo che intercorre tra la sua produzione e la messa in opera.
- Generalmente la consistenza è valutata attraverso la misura dell'abbassamento (*slump*) effettuata con il **cono di Abrams**
- In base al valore dell'abbassamento si attribuiscono diverse **classi di consistenza**

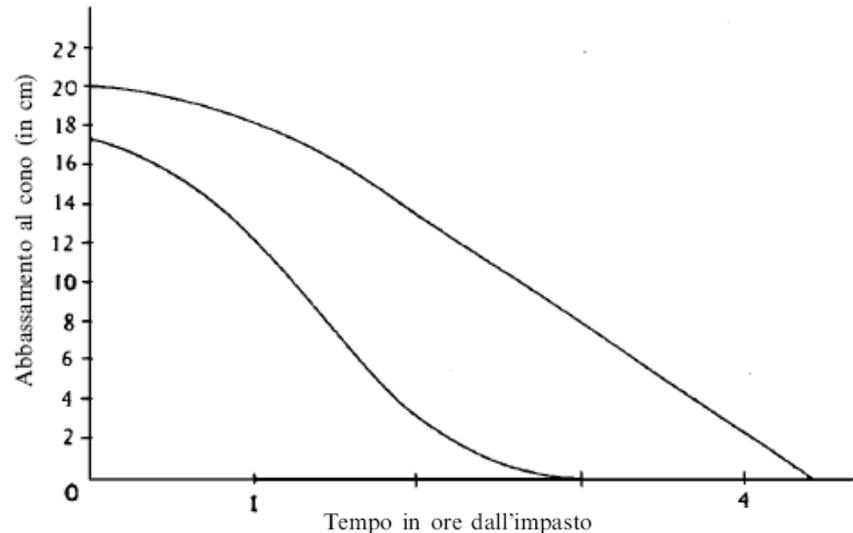


LE PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO

In funzione dell'abbassamento le “*Linee guida sul CLS strutturale*” (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2017) definiscono 5 classi di consistenza da S1 a S5 (da minore a maggiore lavorabilità)

| Classe di consistenza | Abbassamento mm | Denominazione corrente |
|-----------------------|-----------------|------------------------|
| S1 | da 10 a 40 | Umida |
| S2 | da 50 a 90 | Plastica |
| S3 | da 100 a 150 | Semifluida |
| S4 | da 160 a 210 | Fluida |
| S5 | > 210 | Superfluida |

La **perdita di lavorabilità** avviene entro poche ore dall'impasto ed è funzione delle condizioni ambientali (es. temperatura) e dalle caratteristiche dell'impasto (contenuto d'acqua)



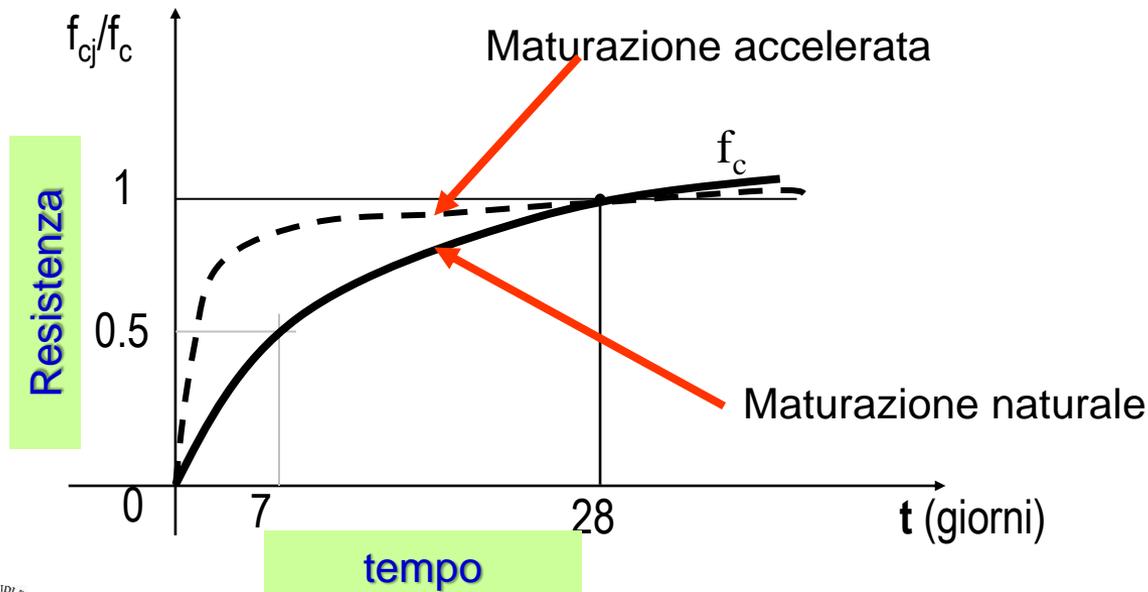
LE PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO

Il fenomeno dell'indurimento (o maturazione) conferisce al cls le proprietà meccaniche finali.

La durata di tale processo è teoricamente "infinita", seppure si sviluppi prevalentemente nel corso delle prime settimane (mesi).

Pertanto anche le proprietà meccaniche, come la resistenza, dipendono dal tempo, ossia dal momento in cui vengono misurate dopo la preparazione della miscela.

Convenzionalmente, si assume come resistenza a compressione di un cls quella misurata dopo 28 giorni di stagionatura.



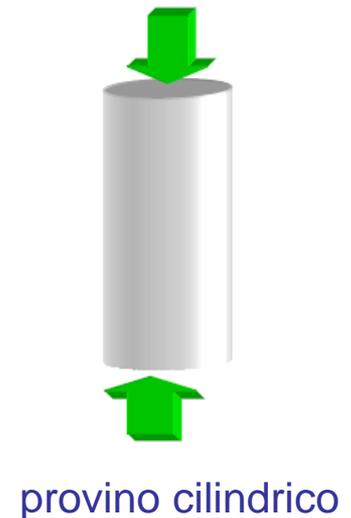
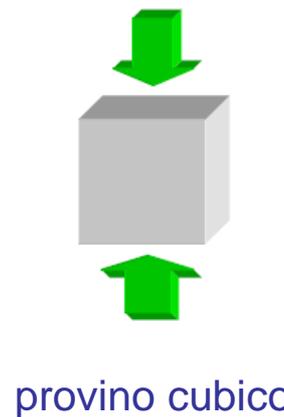
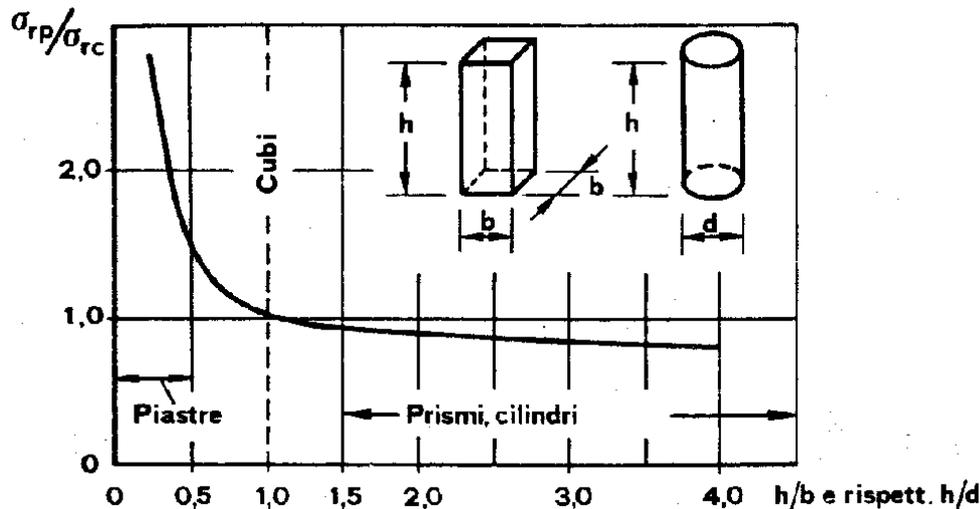
Il processo di maturazione può essere accelerato agendo su temperatura e umidità dell'ambiente.

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS

Si definisce **resistenza a compressione** il valore della tensione di rottura di un provino standard di cls stagionato a 28gg.

In particolare si definisce **resistenza cubica R_c** la resistenza ottenuta attraverso una prova di compressione su un provino cubico (generalmente di spigolo 15-20cm).

La **resistenza cilindrica f_c** è invece ottenuta da un provino cilindrico con altezza $H = 2D$ (D diametro, generalmente di 10-15cm).



Tra la resistenza cilindrica f_c e quella cubica R_c vale la seguente relazione:

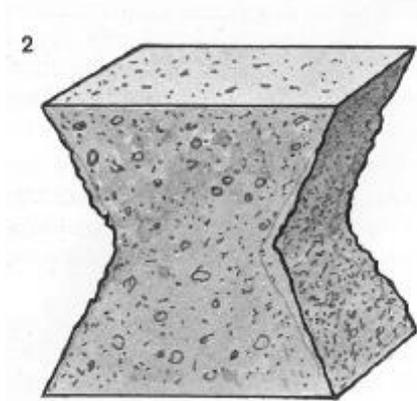
$$f_c \approx 0.83 R_c$$

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS

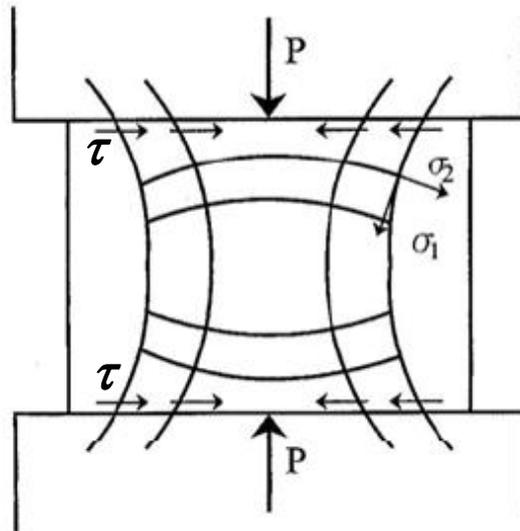
La prova consiste nella applicazione di un carico assiale crescente P e dunque di tensioni normali σ che determinano abbassamenti e dilatazioni trasversali.

Poiché tali dilatazioni sono in parte limitate dall'attrito all'interfaccia piastra-provino, nascono delle tensioni tangenziali τ spurie che portano ad una modalità di rottura del provino a forma di "doppia piramide".

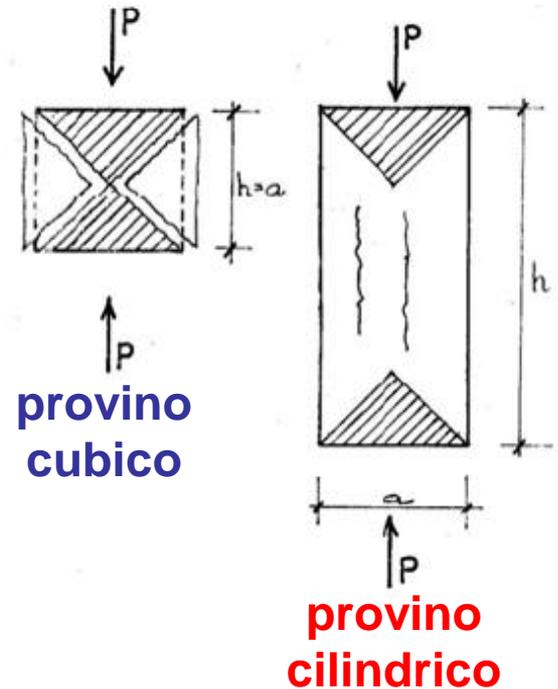
La distanza di estinzione delle tensioni tangenziali determina una distribuzione delle tensioni e modalità di rottura diverse tra provini cubici e cilindrici.



Forma a doppia piramide dopo la prova di compressione



σ_1 = tensioni di compressione
 σ_2 = tensioni di trazione
 τ = tensioni tangenziali



provino cubico

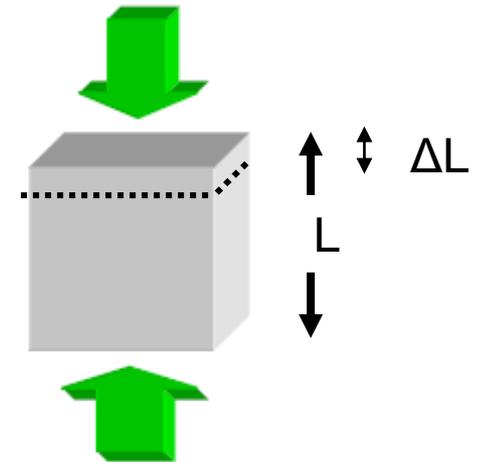
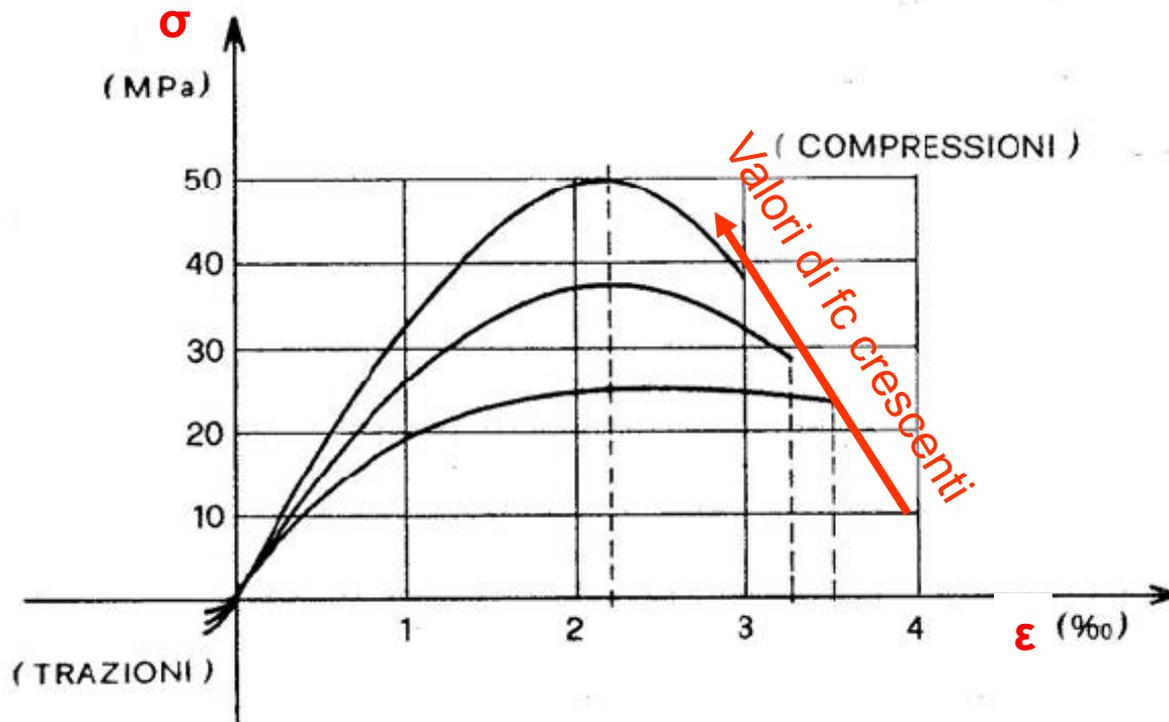
provino cilindrico

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS

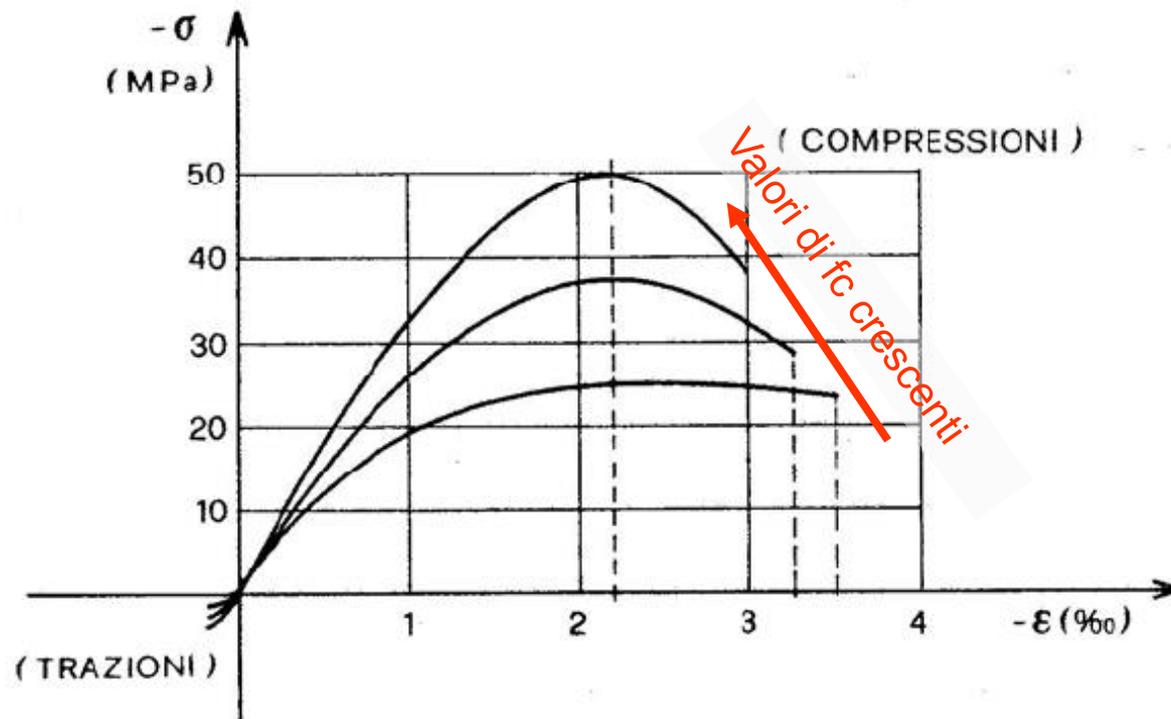
I risultati di una **prova di compressione** sono generalmente restituiti sotto forma di **diagramma tensioni-deformazioni** (σ - ε).

$$\sigma = P/A \text{ (P carico; A area del provino)}$$

$$\varepsilon = \Delta L/L \text{ (\Delta L accorciamento, L lunghezza originaria del provino)}$$



IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS



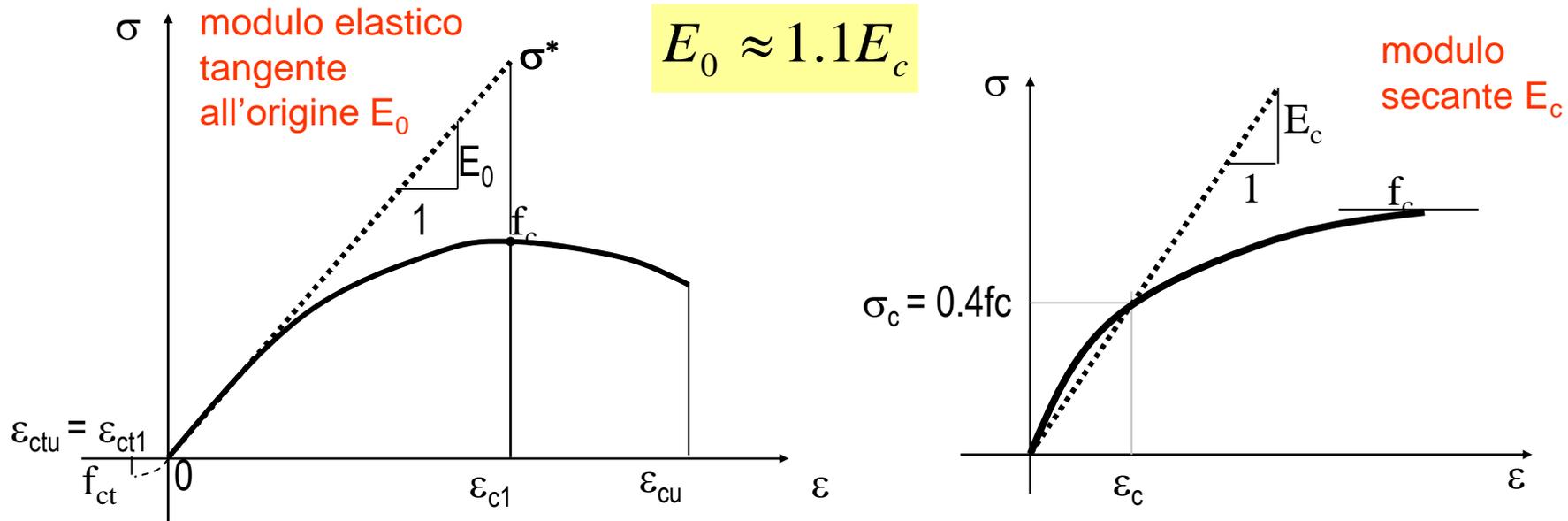
- forte differenza tra resistenze a compressione (molto più elevate) e resistenze a trazione (circa 1/10 di quelle a compressione);
- legame tensioni – deformazioni non lineare, anche per piccoli valori delle tensioni;
- deformazioni ultime (a rottura) molto piccole (ad es. in rapporto all'acciaio);

LE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CLS

Considerando il legame σ - ε di un materiale, si definisce **modulo elastico** **E** il rapporto tra la tensione e la corrispondente deformazione:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Per il CLS si valuta sia il **modulo elastico tangente all'origine** E_0 sia il **modulo secante** E_c (convenzionalmente calcolato per $\sigma = 0.4 f_c$)



La norma NTC-18 fornisce la seguente espressione per il valore medio di E_c :

$$E_{cm} = 22.000 \cdot [f_{cm}/10]^{0,3} \quad [\text{N/mm}^2]$$

(f_{cm} = valore medio della resistenza cilindrica a compressione)

LE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CLS

I valori più importanti che caratterizzano le **deformazioni** del calcestruzzo sono riferiti a:

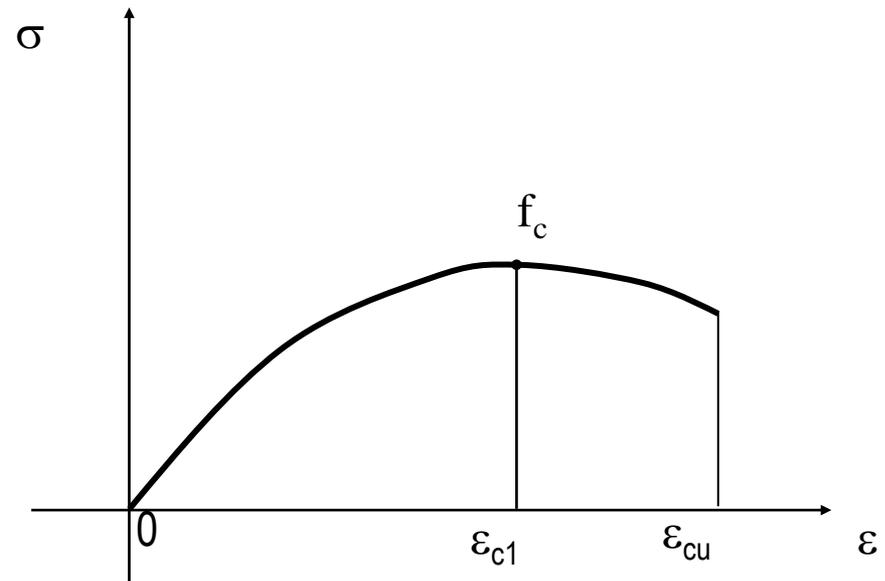
- deformazione ϵ_{c1} relativa al valore massimo di tensione f_c
- deformazione ultima ϵ_{cu}

Per queste grandezze generalmente si assumono i seguenti valori:

$$\epsilon_{c1} \approx 0.0022$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0037 - 0.0008 \frac{f_c - 15}{40}$$

(f_c in MPa)



IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS: IL RITIRO

A causa del processo chimico di idratazione e dell'**evaporazione dell'acqua** di impasto (in eccesso rispetto alle reazioni di idratazione) il cls subisce nel tempo una riduzione di volume (**ritiro**).

La deformazione da ritiro è somma di due aliquote:

ritiro autogeno + ritiro da essiccamento

In **strutture iperstatiche** il ritiro determina autotensioni che devono essere debitamente tenute in conto al fine di evitare o ridurre effetti potenzialmente pericolosi, come ad es. estese fessurazioni.

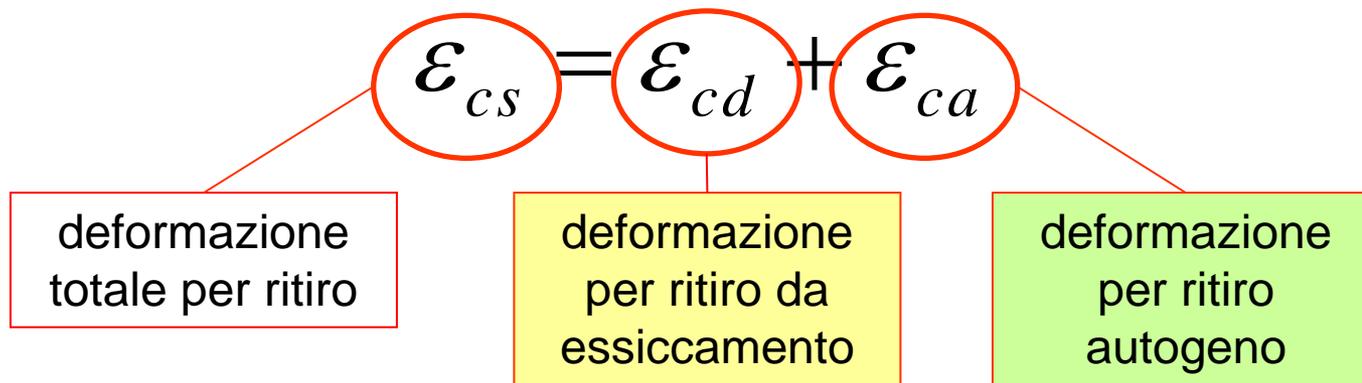
L'**entità del ritiro** dipende da numerosi fattori, tra i quali:

- **contenuto d'acqua**
- **tipo di cemento**
- **quantità dei vuoti**
- **temperatura e umidità di maturazione**
- **geometria dell'elemento**

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS: IL RITIRO

Ritiro autogeno: è la contrazione di volume apparente dovuta alla reazione di idratazione del cemento a partire dal tempo iniziale di presa.

Ritiro da essiccamento: è dovuto alla evaporazione dell'acqua



Dalle NTC18, §11.2.10.6

$$\epsilon_{ca,\infty} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

Ritiro autogeno a tempo infinito

(f_{ck} = valore caratteristico della tensione di rottura a compressione in MPa)

$$\epsilon_{cd,\infty} = k_h \epsilon_{c0}$$

Ritiro da essiccamento a tempo infinito

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS: IL RITIRO

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0}$$

Ritiro da essiccamento a tempo infinito

(NTC18, §11.2.10.6, Tab. 11.2.Va e Vb)

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro da essiccamento:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0} \quad [11.2.7]$$

può essere valutato mediante i valori delle seguenti Tabelle 11.2.Va ed 11.2.Vb in funzione della resistenza caratteristica a compressione, dell'umidità relativa e del parametro h_0 :

Tab. 11.2.Va – Valori di ε_{c0}

| f_{ck} | Deformazione da ritiro per essiccamento (in ‰) | | | | | |
|----------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Umidità Relativa (in %) | | | | | |
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 90 | 100 |
| 20 | -0,62 | -0,58 | -0,49 | -0,30 | -0,17 | +0,00 |
| 40 | -0,48 | -0,46 | -0,38 | -0,24 | -0,13 | +0,00 |
| 60 | -0,38 | -0,36 | -0,30 | -0,19 | -0,10 | +0,00 |
| 80 | -0,30 | -0,28 | -0,24 | -0,15 | -0,07 | +0,00 |

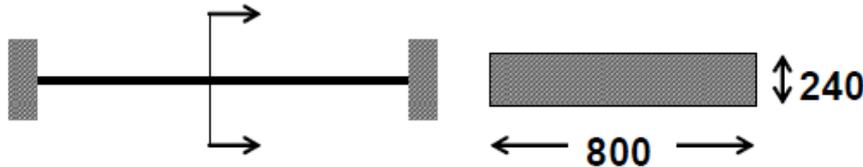
Tab. 11.2.Vb – Valori di k_h

| h_0 (mm) | k_h |
|------------|-------|
| 100 | 1,00 |
| 200 | 0,85 |
| 300 | 0,75 |
| ≥ 500 | 0,70 |

h_0 è la dimensione fittizia (in mm) pari al rapporto $2A_c / u$
 A_c è l'area della sezione in calcestruzzo
 u è il perimetro della sezione in calcestruzzo esposto all'aria.

IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEL CLS: IL RITIRO

Esempio 1: trave a spessore in c.a ($f_{ck}=20\text{MPa}$) umidità relativa $UR=60\%$



$$A_c = 240 \times 800 = 192 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$u = 2 \times 800 + 2 \times 240 = 2080 \text{ mm}$$

$$h_0 = 2A_c/u = 185 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = -25 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0} = 0.87 \times (-0.00049) = -0.426 \times 10^{-3}$$

(NTC18, Tab. 11.2 V_b)

$$k_h = 0.87$$

Esempio 2: trave emergente in c.a 40x60 ($f_{ck}=20\text{MPa}$) umidità relativa $UR=60\%$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = -25 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0} = 0.8 \times (-0.00049) = -0.392 \times 10^{-3}$$

$$A_c = 400 \times 600 = 240 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$u = 2 \times 400 + 2 \times 600 = 2000 \text{ mm}$$

$$h_0 = 2A_c/u = 240 \text{ mm}$$

(NTC18, Tab. 11.2 V_b)

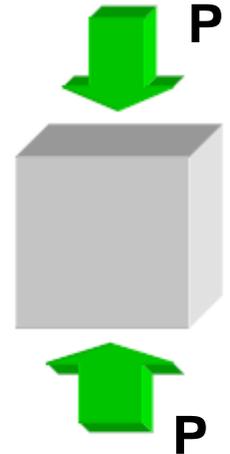
$$k_h = 0.80$$

EFFETTO di RITIRO, VARIAZIONI TERMICHE e VISCOSITA'

A seguito della applicazione di un carico **P**, le deformazioni indotte variano nel tempo in funzione dell'effetto iniziale e di quelli differiti.

In generale, all'istante t , la deformazione del cls è data da:

$$\varepsilon_c(t) = [\varepsilon_{cT}(t) + \varepsilon_{cs}(\tau')] + [\varepsilon_{ce}(t_0) + \varepsilon_{cv}(\tau, t_0)]$$



ε_c deformazione globale all'istante t

ε_{cT} dilatazione termica dovuta alla differenza istantanea di temperatura rispetto a quella iniziale

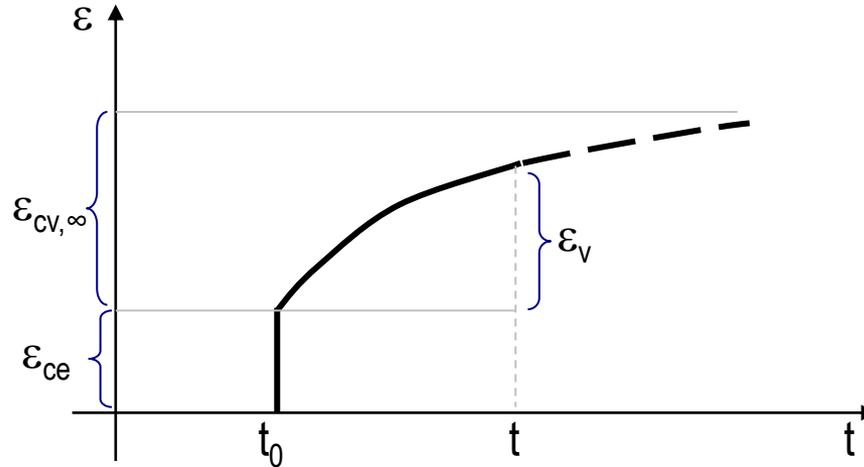
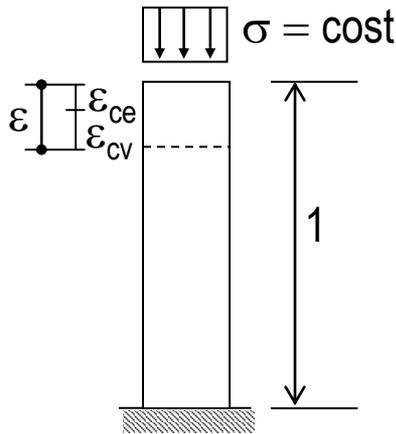
ε_{cs} ritiro progressivo del calcestruzzo, che cresce con l'età

ε_{ce} deformazione elastica istantanea che si manifesta all'istante t_0 di applicazione di un carico

ε_{cv} deformazione viscosa progressiva che cresce con la permanenza del carico stesso

LA VISCOSITA' DEL CLS

Un provino di cls sottoposto a carichi permanenti presenta una deformazione **elastica** ε_{ce} ($t = 0$) ed una **viscosa** $\varepsilon_{cv,\infty}$ che si esaurisce a $t = \infty$



La funzione che definisce le deformazioni (elastiche e viscosi) è del tipo:

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{ce}(t_0) + \varepsilon_{cv}(t, t_0) = \frac{\sigma}{E_0} [1 + \phi(t, t_0)]$$

Dove $\phi(t, t_0)$ è il **coefficiente di viscosità** ed esprime il rapporto tra parte viscosa letta al tempo t e la parte elastica della contrazione sotto tensione costante a partire dall'istante t_0

LA VISCOSITA' DEL CLS

(§ 11.2.10.7 - NTC2018)

In sede di progettazione, se la tensione di compressione del calcestruzzo, al tempo t_0 di messa in carico, non è superiore a $0,45 f_{ck}$, il coefficiente di viscosità $\phi(t, t_0)$, a tempo infinito, a meno di valutazioni più precise (per es. § 3.1.4 di UNI EN 1992-1-1:2005), può essere dedotto dalle seguenti Tabelle 11.2.VI e 11.2.VII in funzione di h_0 :

Tab. 11.2.VI - Valori di $\phi(\infty, t_0)$. Atmosfera con umidità relativa di circa il 75%

| t_0 | $h_0 \leq 75$ mm | $h_0 = 150$ mm | $h_0 = 300$ mm | $h_0 \geq 600$ mm |
|------------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|
| 3 giorni | 3,5 | 3,2 | 3,0 | 2,8 |
| 7 giorni | 2,9 | 2,7 | 2,5 | 2,3 |
| 15 giorni | 2,6 | 2,4 | 2,2 | 2,1 |
| 30 giorni | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 1,8 |
| ≥ 60 giorni | 2,0 | 1,8 | 1,7 | 1,6 |

Tab. 11.2.VII - Valori di $\phi(\infty, t_0)$. Atmosfera con umidità relativa di circa il 55%

| t_0 | $h_0 \leq 75$ mm | $h_0 = 150$ mm | $h_0 = 300$ mm | $h_0 \geq 600$ mm |
|------------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|
| 3 giorni | 4,5 | 4,0 | 3,6 | 3,3 |
| 7 giorni | 3,7 | 3,3 | 3,0 | 2,8 |
| 15 giorni | 3,3 | 3,0 | 2,7 | 2,5 |
| 30 giorni | 2,9 | 2,6 | 2,3 | 2,2 |
| ≥ 60 giorni | 2,5 | 2,3 | 2,1 | 1,9 |

dimensione
fittizia $h_0 = 2A_c/u$

LA VISCOSITA' DEL CLS

La **deformazione viscosa** avviene per **scorrimenti** tra i **grani della matrice cementizia**.

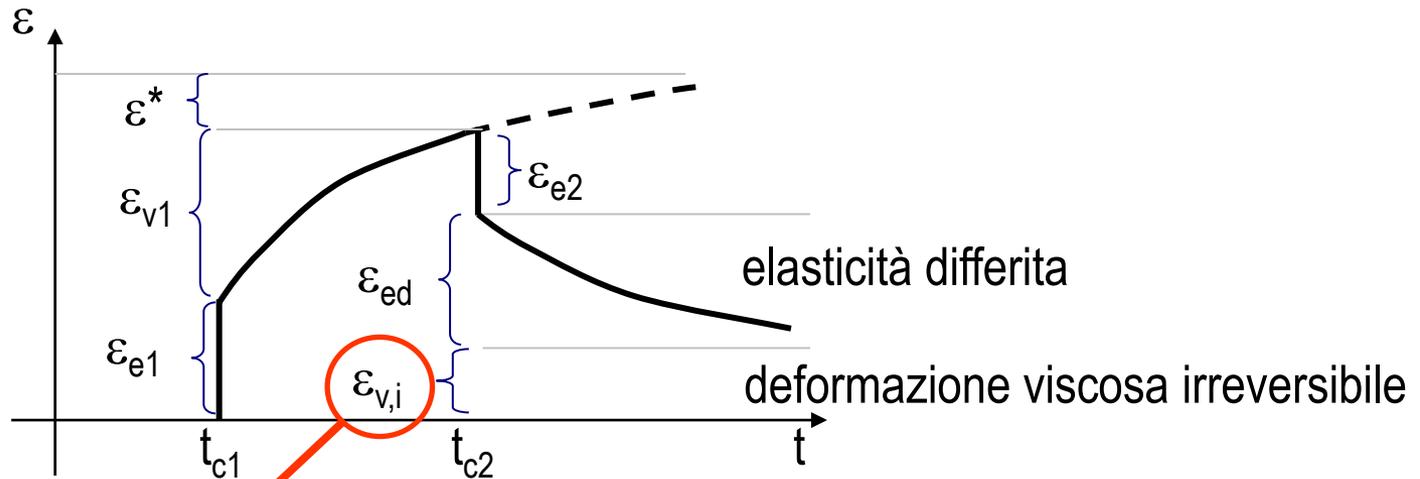
In cls **compatti** e con **elevata resistenza del cemento** tale effetto si riduce notevolmente.

Dalle prove sperimentali è emerso che:

- la deformazione viscosa ϵ_v è circa 2-3 volte quella elastica;
- ϵ_v si ritiene stabilizzata a circa 1200gg dall'applicazione del carico
- per cls di buona qualità in 30gg si raggiunge circa il 30% della deformazione viscosa;
- la deformazione elastica differita per effetto dello scarico rappresenta il 20-30% di quella elastica e procede molto velocemente nei primi 20-30gg per poi stabilizzarsi entro 2-3 anni.

LA VISCOSITA' DEL CLS

Prova con applicazione di un **carico** al tempo t_{c1} e **scarico** al tempo t_{c2}



$\varepsilon_{v,i}$ è la **deformazione viscosa irreversibile**, che dipende da:

- rapporto tensione di carico/tensione di rottura
- durata di applicazione del carico ($t_{c2}-t_{c1}$)
- qualità del calcestruzzo (es. tipo di cemento, porosità)

Calcestruzzo Armato (C.A.): MATERIALI COSTITUENTI

Calcestruzzo di cemento +

Acciaio (da c.a.) =

CALCESTRUZZO ARMATO

- **Gli sforzi di trazione** sono affidati **ESCLUSIVAMENTE all'acciaio**
- **Gli sforzi di compressione** sono affidati **PREVALENTEMENTE al calcestruzzo**

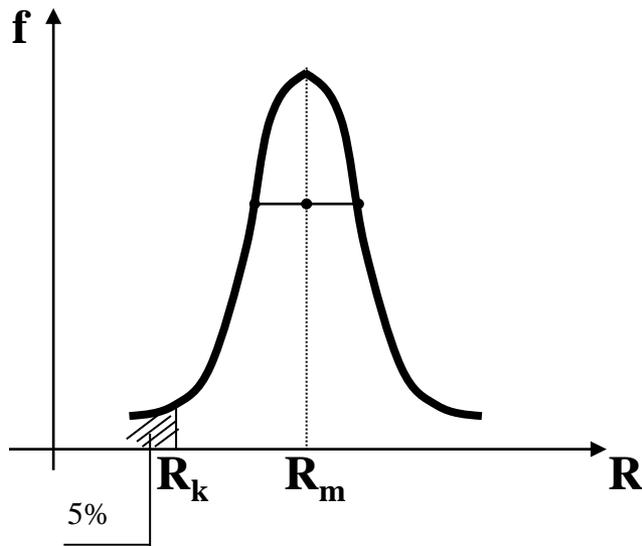
Le **RESISTENZE** di calcestruzzo ed acciaio vengono convenzionalmente identificate mediante il **valore caratteristico R_k** .

DALLE NTC-18

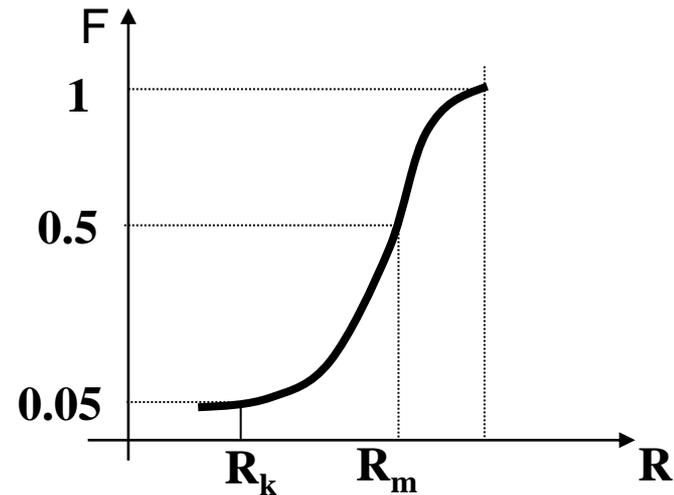
Ai fini della valutazione del comportamento e della resistenza delle strutture in calcestruzzo, questo viene titolato ed identificato mediante la classe di resistenza contraddistinta dai valori caratteristici delle resistenze cilindrica e cubica a compressione uniassiale, misurate rispettivamente su provini cilindrici (o prismatici) e cubici, espressa in MPa.

LA RESISTENZA CARATTERISTICA

Data una popolazione di valori $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$ si definisce **resistenza caratteristica R_k** quella resistenza al di sotto della quale ci si può attendere di trovare il 5% della popolazione di tutte le misure di resistenza.



$f(R)$ funzione densità di probabilità delle resistenze R



$F(R)$ funzione cumulativa di probabilità delle resistenze R

Le caratteristiche meccaniche del CALCESTRUZZO

La norma NTC-18 prevede l'impiego delle seguenti classi di resistenza del cls

| CLASSE DI RESISTENZA |
|----------------------|
| C8/10 |
| C12/15 |
| C16/20 |
| C20/25 |
| C25/30 |
| C28/35 |
| C 32/40 |
| C35/45 |
| C40/50 |
| C45/55 |
| C50/60 |
| C55/67 |
| C60/75 |
| C70/85 |
| C80/95 |
| C90/105 |

Esempio: C20/25

$$f_{ck} = 20\text{N/mm}^2$$

$$R_{ck} = 25\text{N/mm}^2$$

Cls ad altissima resistenza il cui utilizzo è sottoposto ad autorizzazione del CSLP

LE PROVE DI ACCETTAZIONE sul CALCESTRUZZO

La norma NTC-18 prevede due tipi di controlli di accettazione del cls:

- **CONTROLLO TIPO A**
- **CONTROLLO TIPO B**

CONTROLLO TIPO A

È riferito ad un quantitativo di miscela omogenea **non maggiore di 300 m³**.

Si basa su 3 prelievi* (ciascuno dei quali eseguito su un massimo di 100 m³, e comunque almeno un prelievo per ogni giorno di getto) da cui si ottengono le resistenze R_1 ; R_2 ; R_3 , da cui:

$$R_M = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}$$

Il controllo è positivo e il CLS viene accettato se:

$$R_M \geq R_{ck} + 3.5 \quad [\text{N/mm}^2] \text{ e}$$

$$R_1 \geq R_{ck} - 3.5 \quad [\text{N/mm}^2] \text{ (} R_1 \text{ è il minore valore di resistenza dei prelievi)}$$

* Un prelievo è costituito da due provini; la resistenza di prelievo R_i è la media delle resistenze dei due provini

LE PROVE DI ACCETTAZIONE sul CALCESTRUZZO

CONTROLLO TIPO B

Si applica ad opere strutturali che richiedono l'impiego di **più di 1500 m³** di miscela omogenea di cls.

Si basa su almeno 15 prelievi per ogni 1500 m³ di calcestruzzo gettato, e comunque con almeno un prelievo per ogni giorno di getto.

Si definiscono la resistenza media R_M e la deviazione standard σ :

$$R_M = \frac{1}{n} \sum_1^n R_i \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (R_M - R_i)^2}{n - 1}}$$

Il controllo è positivo e il CLS viene accettato se:

$$R_M \geq R_{ck} + 1.4\sigma \text{ [N/mm}^2\text{q]}$$

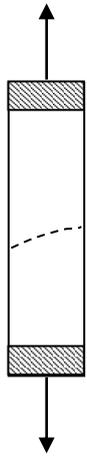
$$R_1 \geq R_{ck} - 3.5 \text{ [N/mm}^2\text{]} \text{ (} R_1 \text{ è il minore valore di resistenza dei prelievi)}$$

La resistenza minima di prelievo R_1 dovrà essere maggiore del valore corrispondente al frattile inferiore 1%.

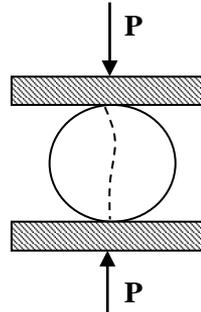
Nel caso si ottenga un **coefficiente di variazione $CoV = \sigma / R_M$** superiore a 0.15 occorrono controlli più accurati.

Non sono accettabili calcestruzzi con $CoV > 0.3$.

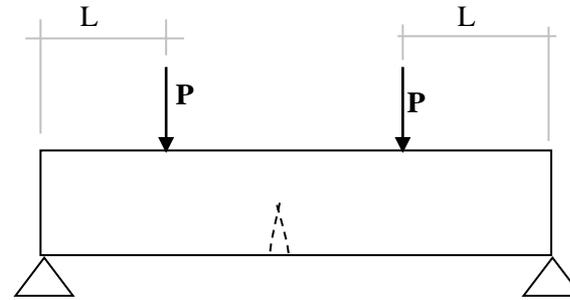
LA RESISTENZA A **TRAZIONE** DEL CLS



a)



b)



c)

a) prova a trazione semplice

b) prova a “fendage” o prova brasiliana

c) prova a flessione semplice

In fase di progettazione la **norma NTC-18** consente di stimare la **resistenza a trazione** attraverso il valore a compressione f_c (f_{ctm} = valore medio della resistenza a trazione)

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{per classi} \leq C50/60$$
$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln[1 + f_{cm}/10] \quad \text{per classi} > C50/60$$

Esempio

$$f_c = 25 \text{ N/mm}^2$$

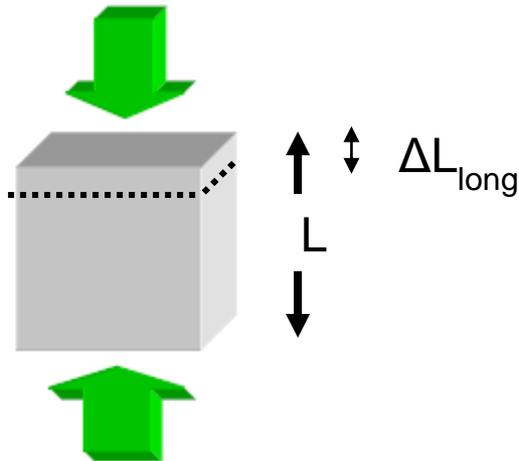
$$f_{ctm} = 2,6 \text{ N/mm}^2$$

LA DEFORMAZIONE TRASVERSALE

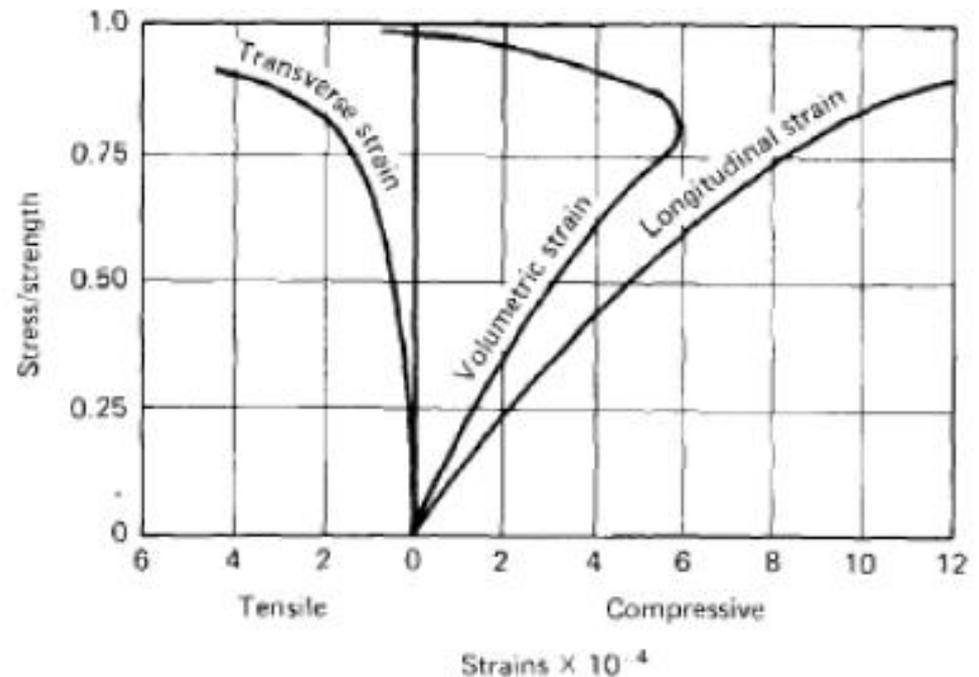
In presenza di uno **sforzamento assiale** il provino di cls subisce anche una **deformazione trasversale** (ϵ_t).

Alla contrazione longitudinale ΔL si affianca una dilatazione trasversale che determina:

$$\epsilon_t = -\nu\sigma/E$$

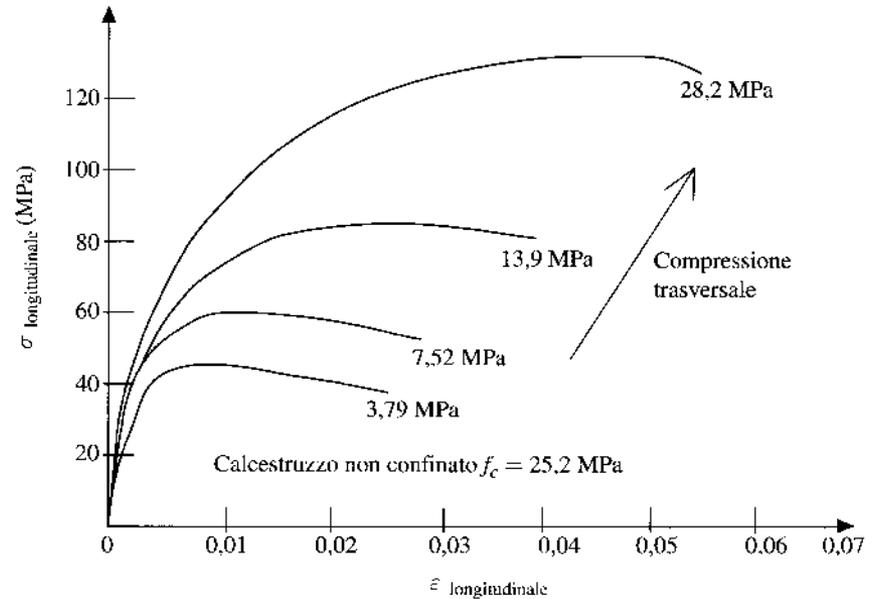
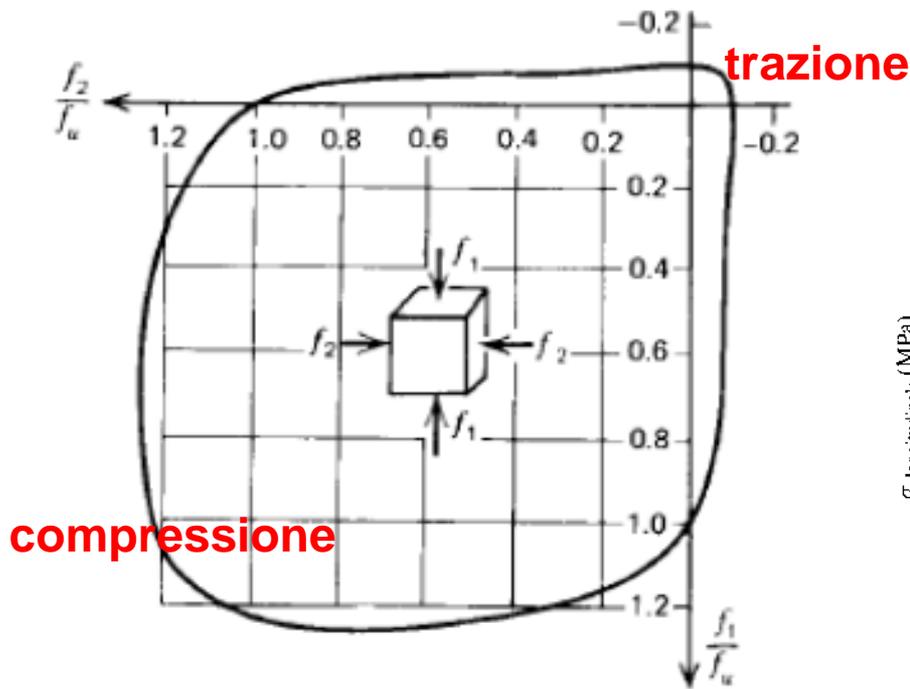


L'andamento è **non lineare** ed è regolato dal coefficiente di Poisson ν , generalmente assunto pari a 0.15-0.2



LEGAME COSTITUTIVI PLURIASSIALI

La presenza di uno **sforzo di compressione** trasversale **aumenta sia la resistenza** a compressione sia la **deformazione ultima** in direzione longitudinale



Legame costitutivo bi-assiale

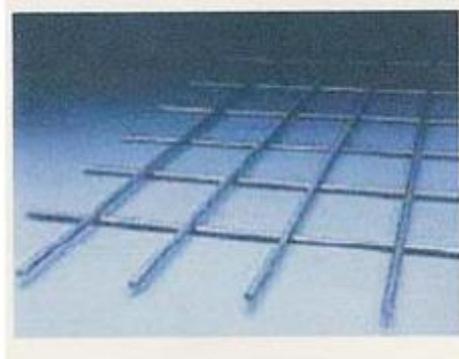
L'ACCIAIO DA CEMENTO ARMATO (C.A.)

- L'acciaio da c.a. è prodotto in stabilimento sotto forma di **barre o rotoli, reti o tralicci**.

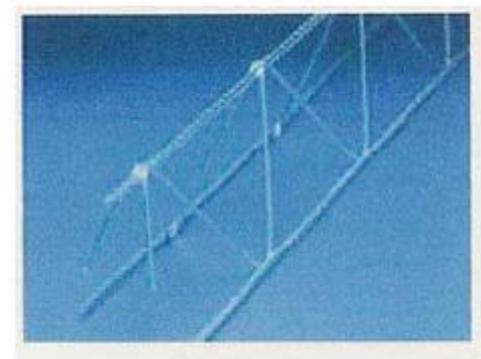


barre

reti

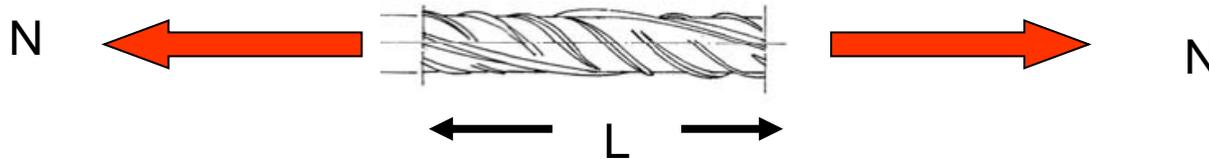


tralicci

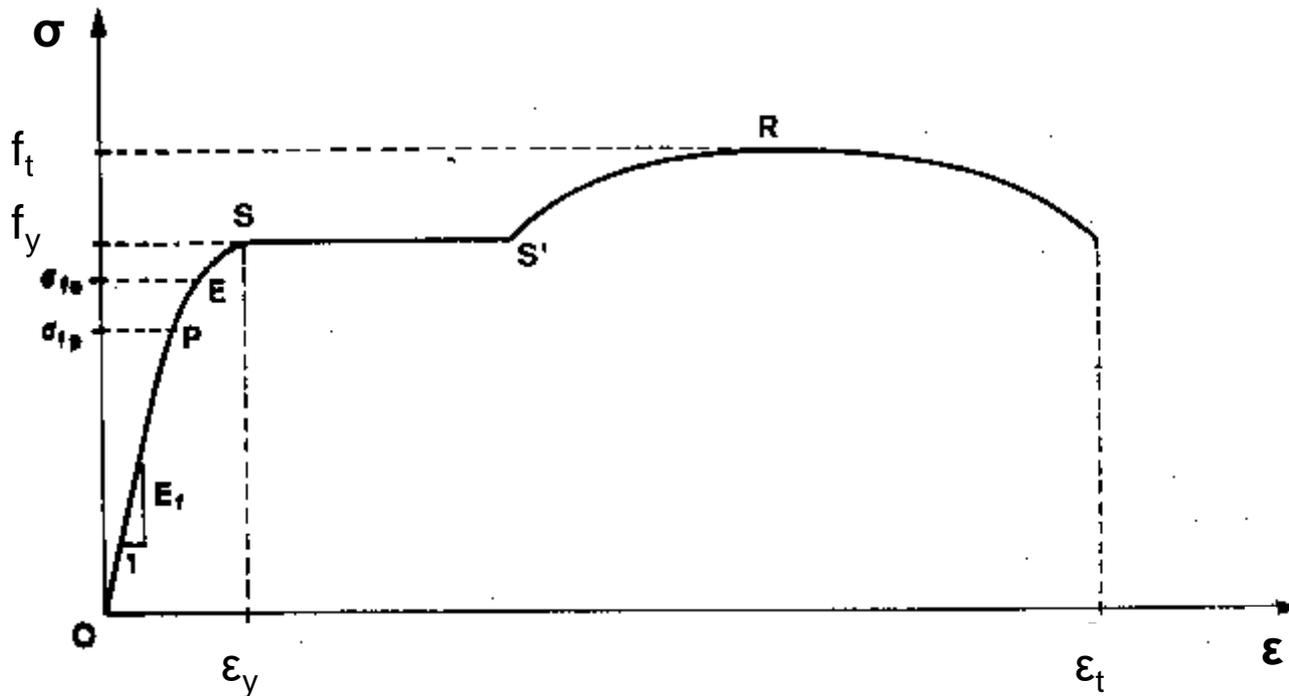


- Le barre di acciaio da c.a. devono essere ad aderenza migliorata e saldabili.
- In commercio sono reperibili barre con diametro variabile da 6 a 40mm (con passo di 2mm).
- I diametri più utilizzati nella pratica sono compresi tra 8 e 26mm.

Proprietà meccaniche dell'ACCIAIO da C.A.



Sottoponendo una **barra di acciaio** da c.a. ad una **prova di trazione** si ottiene il seguente diagramma tensione – deformazione (σ - ϵ):



Proprietà meccaniche dell'ACCIAIO da C.A.

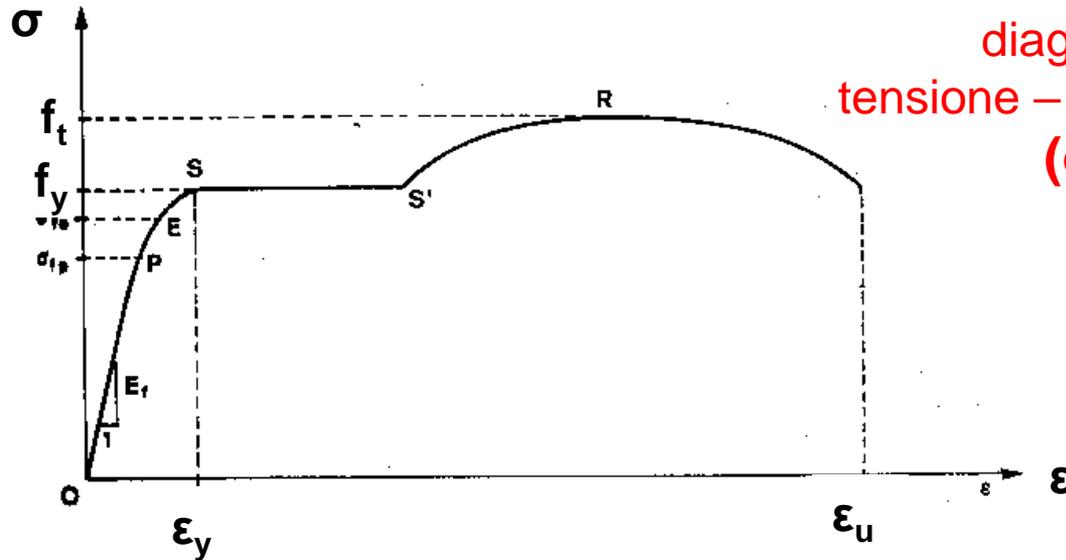
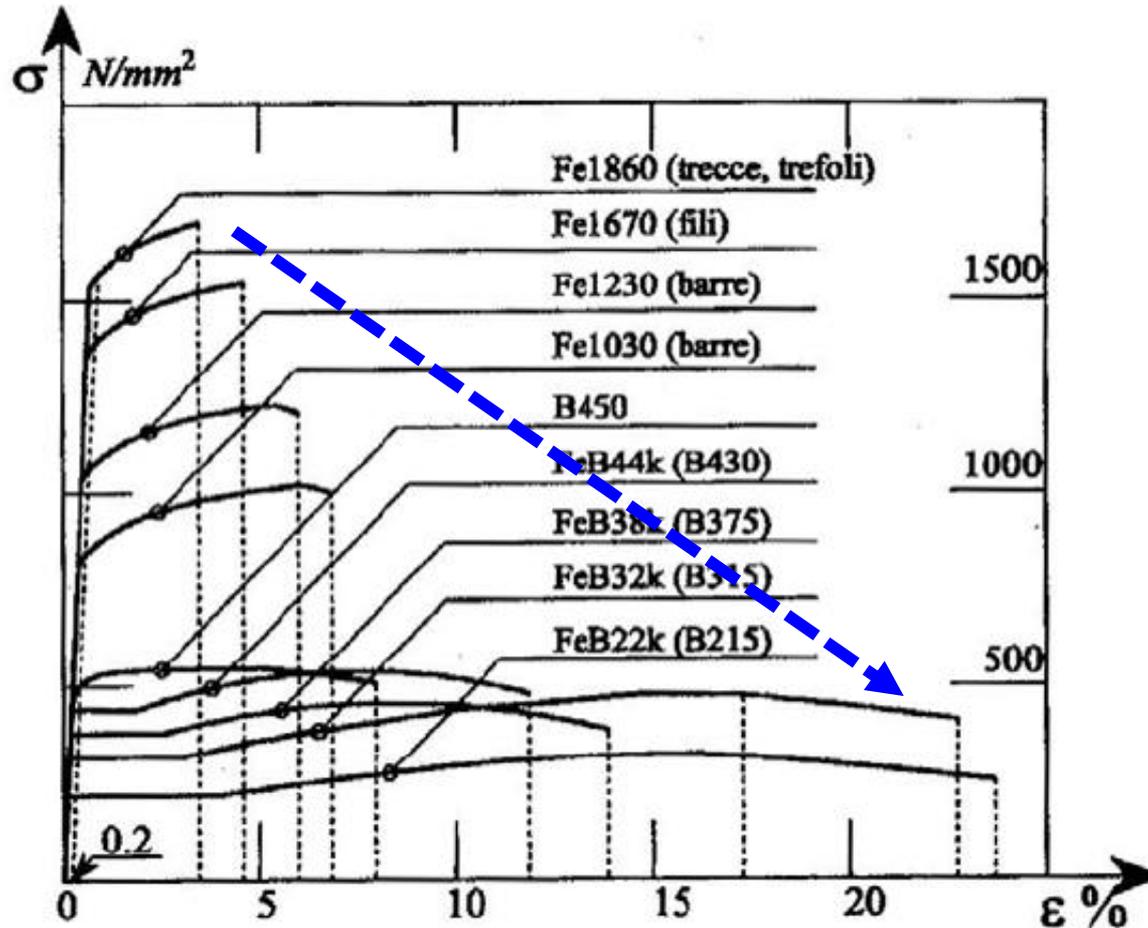


diagramma
tensione – deformazione
(σ - ϵ)

- comportamento “elastico – lineare” fino al limite f_y di snervamento;
- modulo elastico E_s con buona precisione pari, per tutti i tipi di acciaio, a 205000 MPa;
- ripresa della crescita tensionale, dopo un notevole allungamento (snervamento, S-S'), a seguito dell'incrudimento del materiale;
- raggiungimento della massima capacità resistente f_t per elevati valori dell'allungamento ϵ .
- discesa della curva dopo il carico massimo per il fenomeno di strizione del provino fino all'allungamento a rottura ϵ_u

Tipi di ACCIAIO da C.A.

Al crescere della resistenza allo snervamento f_y si osserva una riduzione della deformazione ultima ε_u



Tipi di ACCIAIO da C.A. previsti nelle NTC

La norma italiana NTC-18 prevede due tipi di acciaio per c.a. indicati con le sigle B450A e **B450C** con i seguenti valori nominali delle tensioni caratteristiche e di snervamento:

| | |
|--------------|-----------------------|
| $f_{y, nom}$ | 450 N/mm ² |
| $f_{t, nom}$ | 540 N/mm ² |

$$(f_{t,nom} / f_{y,nom} = 1.2)$$

| CARATTERISTICHE | REQUISITI | FRATTILE (%) |
|---|-------------------|--------------|
| Tensione caratteristica di snervamento f_{yk} | $\geq f_{y, nom}$ | 5.0 |
| Tensione caratteristica di rottura f_{tk} | $\geq f_{t, nom}$ | 5.0 |
| $(f_t/f_y)_k$ | $\geq 1,15$ | 10.0 |
| $(f_y/f_{y,nom})_k$ | $< 1,35$ | 10.0 |
| Allungamento $(A_{gt})_k$ | $\geq 7,5 \%$ | 10.0 |
| Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90 ° e successivo raddrizzamento senza cricche: | | |
| $\phi < 12 \text{ mm}$ | 4 ϕ | |
| $12 \leq \phi \leq 16 \text{ mm}$ | 5 ϕ | |
| per $16 < \phi \leq 25 \text{ mm}$ | 8 ϕ | |
| per $25 < \phi \leq 40 \text{ mm}$ | 10 ϕ | |

Acciaio B450C

L'acciaio B450C è prescritto per le strutture in **zona sismica**.

L'acciaio B450A possiede minore duttilità, infatti è prescritto:

$$(A_{gt})_k \geq 2.5\%$$

PROVE di ACCETTAZIONE dell'ACCIAIO nelle NTC

Entro 30gg dalla data di consegna per ciascun lotto di spedizione devono essere estratti **3 spezzoni** di **ciascun diametro** e sottoposti a **prove di trazione**.

I risultati devono soddisfare i valori limite riportati nella seguente tabella (NTC 2018)

| Caratteristica | Valore limite | NOTE |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| f_y minimo | 425 N/mm ² | (450 – 25) N/mm ² |
| f_y massimo | 572 N/mm ² | [450 x (1,25+0,02)] N/mm ² |
| A_{gt} minimo | ≥ 6,0% | per acciai B450C |
| A_{gt} minimo | ≥ 2,0% | per acciai B450A |
| Rottura/snervamento | $1,13 \leq f_t / f_y \leq 1,37$ | per acciai B450C |
| Rottura/snervamento | $f_t / f_y \geq 1,03$ | per acciai B450A |
| Piegamento/raddrizzamento | assenza di cricche | per tutti |