

Il Calcestruzzo strutturale e l'acciaio da c.a.

Tecnologia e
proprietà
meccaniche

Composizione del cls

Il calcestruzzo è un materiale lapideo artificiale composto con aggregati lapidei di diverse dimensioni (inerti) uniti da un legante idraulico (il cemento) la cui attivazione avviene grazie alle reazioni chimiche con l'acqua.

Pertanto i componenti essenziali del cls sono:

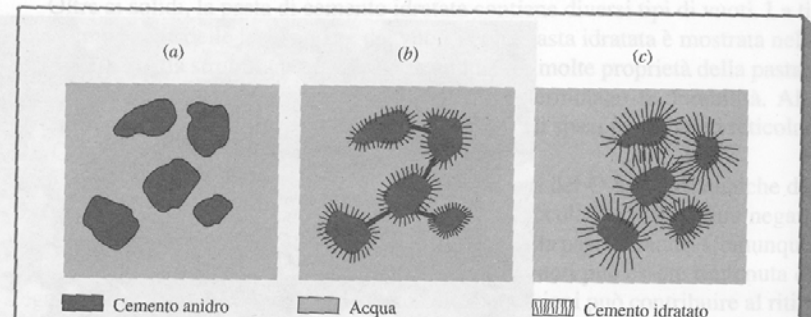
- Il cemento
- Gli aggregati (o inerti)
- L'acqua

Il Cemento

Il cemento (di tipo Portland) si ottiene cuocendo ad alta temperatura (1400 — 1500 C) una miscela di calcare ed argilla (nella proporzione di circa 1:3) e quindi macinando finemente il prodotto di cottura (Klinker).

Diversi tipi di cemento si ottengono modificandone la composizione: aggiungendo pozzolana si ottiene il cemento pozzolanico, con l'aggiunta di loppa d'alto forno si ottiene il cemento d'alto forno, ecc.

Dal punto di vista chimico il cemento è una miscela di silicati ed alluminati di calcio che, anche in virtù della finissima macinazione, sono in grado di reagire rapidamente con l'acqua formando una massa dura, simile alla pietra.



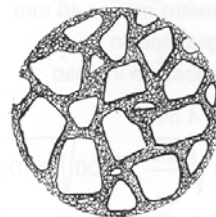
Gli aggregati

Gli inerti formano lo scheletro solido del calcestruzzo e ne costituiscono la percentuale prevalente in peso e volume: la loro qualità è determinante per la buona riuscita del calcestruzzo.

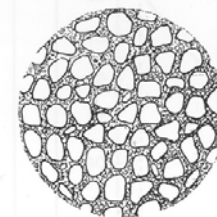
Gli inerti devono riempire al massimo i vuoti dell'impasto, onde rendere minimo il volume occupato dal cemento. A questo scopo si usano inerti di diverso diametro:

- Inerti a grana grossa (ghiaia o pietrisco)
- Inerti a grana fine (sabbia)

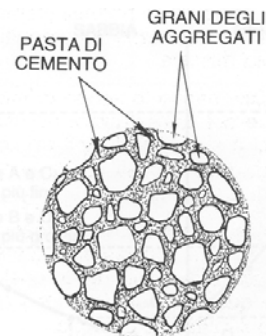
Per ottenere un buon calcestruzzo occorre che la miscela di inerti abbia una corretta granulometria, ottenuta mescolando in proporzioni opportune inerti di tipo diverso.



AGGREGATO GROSSO:
GRANDI VUOTI



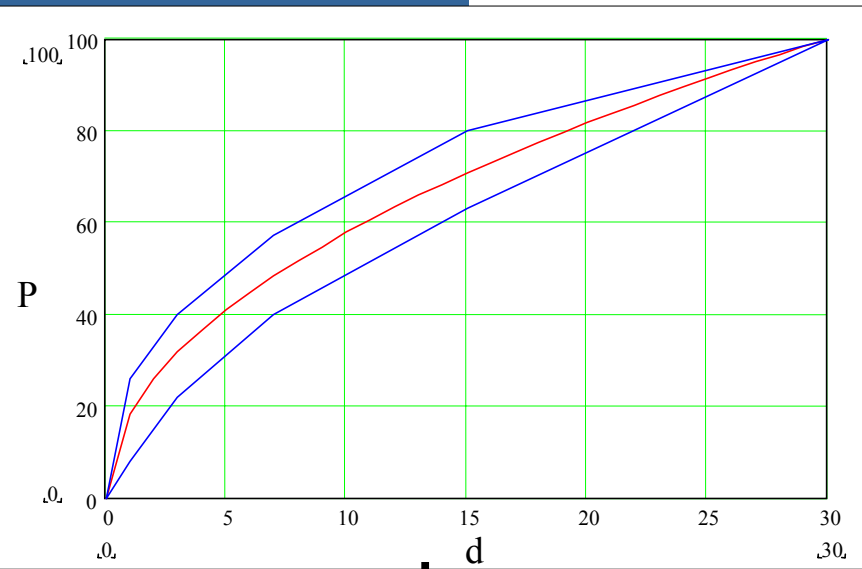
AGGREGATO FINE:
GRANDE SVILUPPO
DI SUPERFICIE



AGGREGATO ASSORTITO:
POCHI VUOTI
MINORE SVILUPPO DI
SUPERFICIE

Granulometria

Il controllo della granulometria si fa tracciando la curva granulometrica della miscela, che si ottiene riportando in un diagramma, in funzione del diametro, la percentuale in peso degli inerti passanti in crivelli con fori di diametro crescente. Un criterio valido per giudicare della qualità della curva consiste nel verificare che essa sia contenuta all'interno di una zona (fuso di Fuller).



Fuso e curva teorica di Fuller

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{d_{\max}}}$$

Caratteristiche degli inerti

L'influenza degli inerti sulla qualità dell'impasto è ovviamente legata anche alle loro qualità intrinseche: gli inerti grossi non devono essere costituiti da rocce tenere di bassa resistenza, mentre le sabbie dovrebbero essere di tipo siliceo piuttosto che calcareo.

Inoltre gli inerti devono essere ben "puliti", cioè privi di argilla e materie organiche che, interponendosi, possono ostacolare l'aderenza tra il cemento e l'inerte.

L'acqua

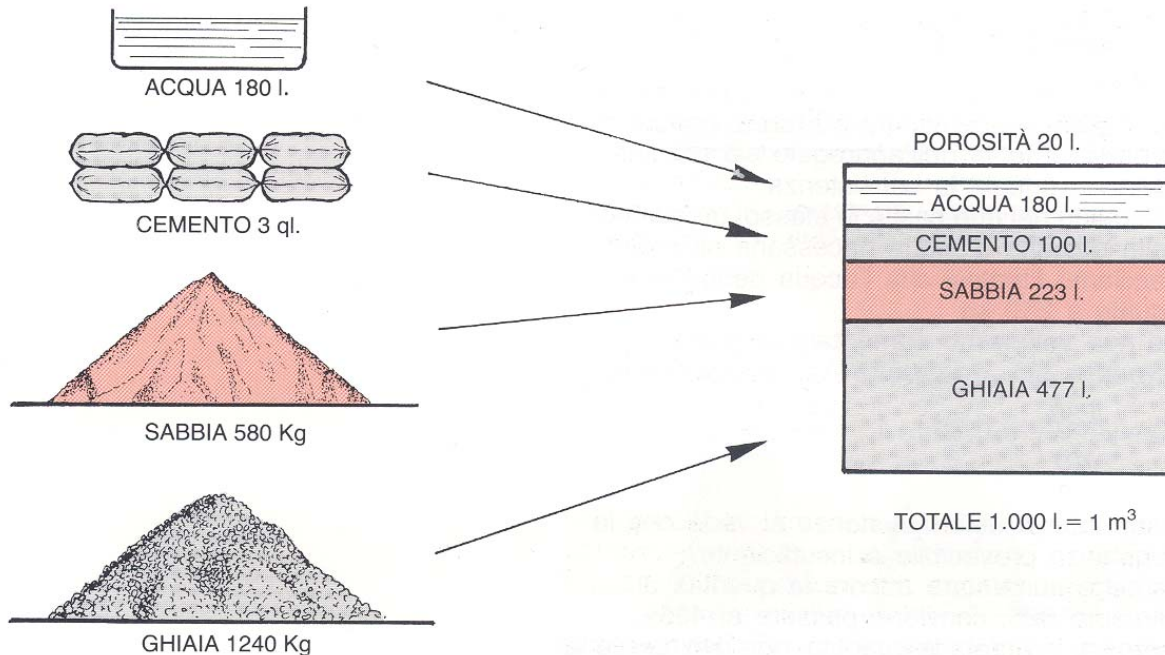
L'acqua, combinandosi con il cemento nel fenomeno dell'idratazione, dà luogo alla "presa" che trasforma l'impasto in una massa solida. Tuttavia l'acqua deve svolgere anche la funzione di lubrificante nell'impasto, rendendolo sufficientemente fluido da essere lavorabile.

Per questo motivo l'acqua impiegata nell'impasto deve essere in quantità superiore a quella strettamente necessaria per l'idratazione del cemento. Peraltro si deve tenere presente che all'aumentare dell'eccesso di acqua peggiorano sensibilmente le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

L'acqua da usare nell'impasto deve essere il più possibile pura, quando è possibile si consiglia quindi l'uso di acqua potabile. In particolare devono essere evitate acque contenenti percentuali elevate di solfati e le acque contenenti rifiuti di origine organica o chimica. La presenza di impurità infatti interferisce con la presa, provocando una riduzione della resistenza del conglomerato.

Composizione media di un m³ di cls

ceřmento	300	Kg/m ³
acqua	180	Kg/m ³
aggregati	1820	Kg/m ³
Totale	2300	Kg/m³



COMPOSIZIONE MEDIA DI 1 m³ DI CALCESTRUZZO

Fattori che influenzano la resistenza

- Quantità di cemento
- Composizione degli inerti
- Rapporto acqua/cemento
- Condizioni ambientali durante la maturazione

Quantità di cemento

La resistenza del calcestruzzo aumenta quasi proporzionalmente al quantitativo di cemento impiegato; tuttavia dosi eccessive ($> 500 \text{ kg/m}^3$) sono inutili o addirittura dannose.

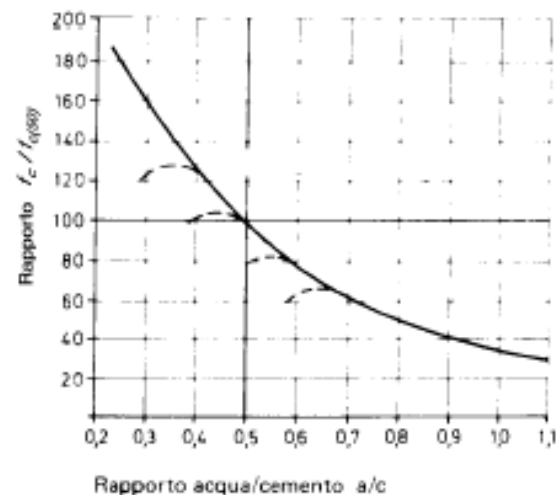
Fattori che influenzano la resistenza (2)

Gli inerti

Gli inerti devono essere di buona qualità, puliti e dosati accuratamente.

Il rapporto acqua/cemento

Per la presa sono necessari circa 30 litri di acqua per ogni quintale di cemento, ma per rendere il cls lavorabile questa quantità deve aumentare (circa il doppio). Tuttavia all'aumentare del rapporto a/c le prestazioni del cls peggiorano drasticamente. L'aggiunta di fluidificanti consente l'impiego di valori più bassi del rapporto a/c



Fattori che influenzano la resistenza (3)

Le condizioni ambientali

La velocità della presa del cemento aumenta rapidamente con la temperatura.

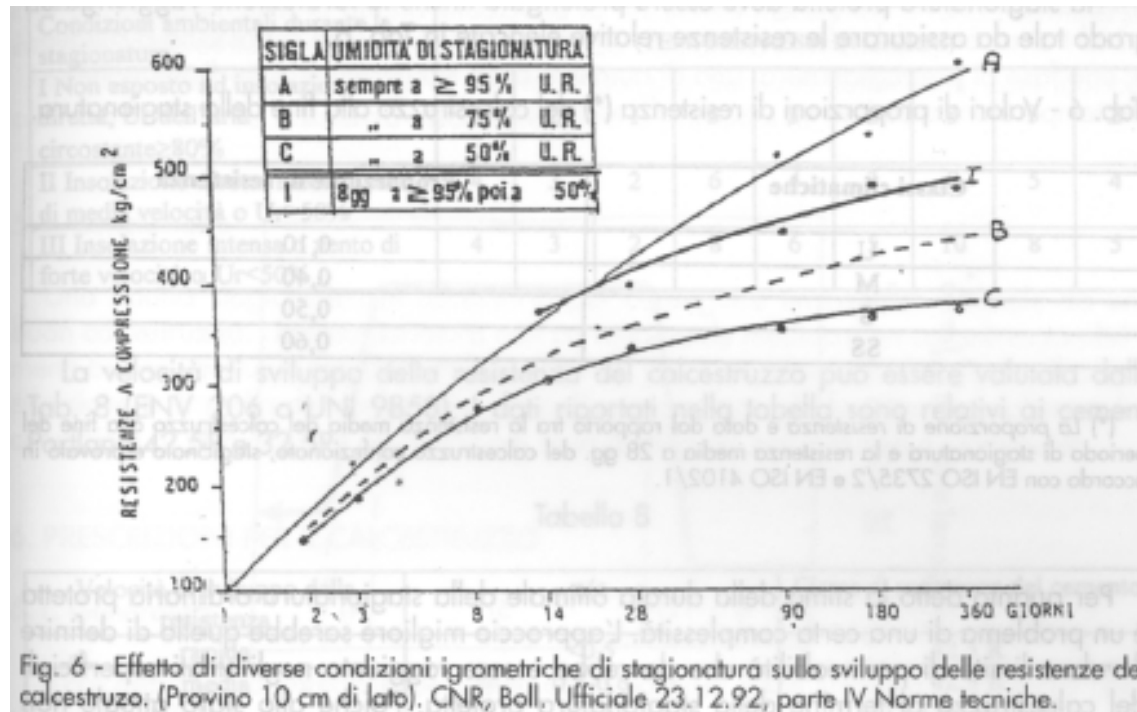
Il caldo secco e l'insolazione diretta sono dannosi, perché producono l'evaporazione dell'acqua superficiale. Il getto in estate deve essere tenuto coperto e bagnato.

Il freddo rallenta la presa. Se l'acqua gela, la formazione del ghiaccio interrompe il processo e la dilatazione rompe i legami già formati.

La stagionatura

I processi chimici della presa del cemento si protraggono per un lungo periodo di tempo (anni); le prestazioni meccaniche variano di conseguenza.

Le condizioni di umidità durante la stagionatura influenzano la resistenza finale del cls



Stagionatura accelerata

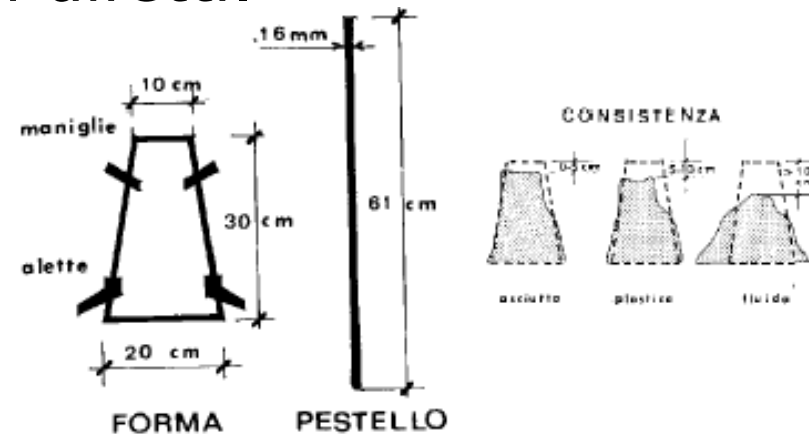
Tra i vari procedimenti di stagionatura accelerata che essenzialmente fanno intervenire un apporto di calore, quello del riscaldamento mediante vapore libero è il più diffuso. Esso consiste nel sottoporre il calcestruzzo, dopo il getto, all'effetto combinato di calore ed umidità mediante invio di vapore saturo a bassa pressione nell'ambiente di trattamento. Un trattamento adeguato può consentire lo sviluppo a 24 ore, od anche a tempi più brevi, di resistenze meccaniche a compressione dell'ordine del 60% di quelle che si potrebbero ottenere a 28 gg. con la maturazione normale (20°C; 100% UR). Per contro, i calcestruzzi maturati a temperature elevate mostrano, in seguito, resistenze finali minori di quelli maturati normalmente. Poiché però in pratica difficilmente si realizza una stagionatura umida per periodi prolungati, ne consegue che anche a tempi lunghi la resistenza effettiva risulta spesso maggiore per i calcestruzzi maturati ad alta temperatura iniziale che per gli altri.

Lavorabilità

La lavorabilità è una proprietà importante del cls, in quanto essa consente di ottenere getti compatti, privi di cavità e di difetti.

La lavorabilità si migliora aumentando il contenuto in acqua, che però riduce la resistenza.

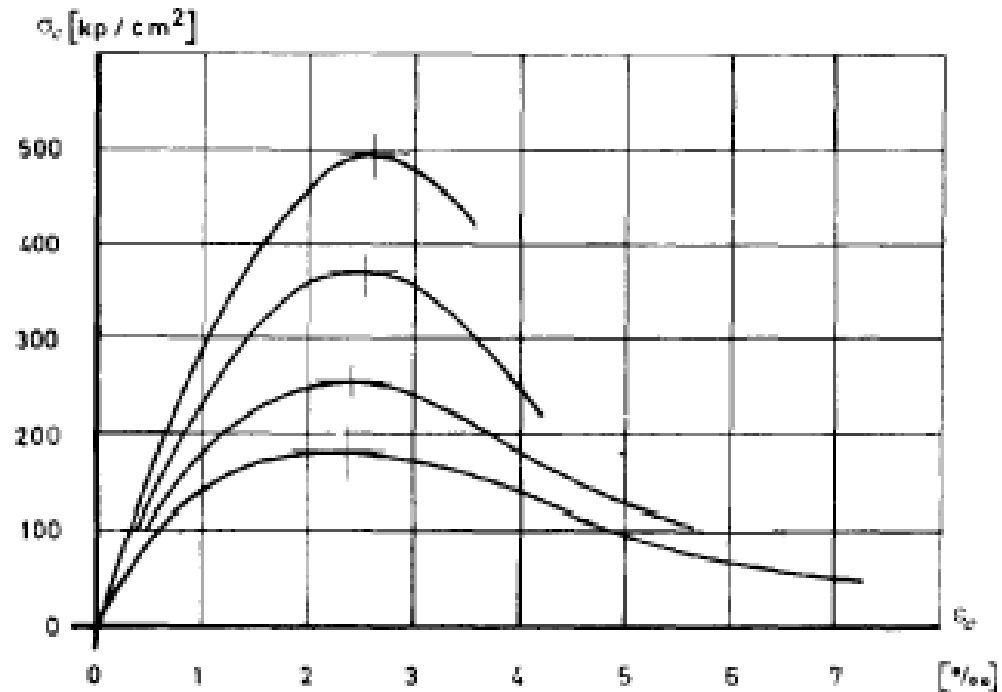
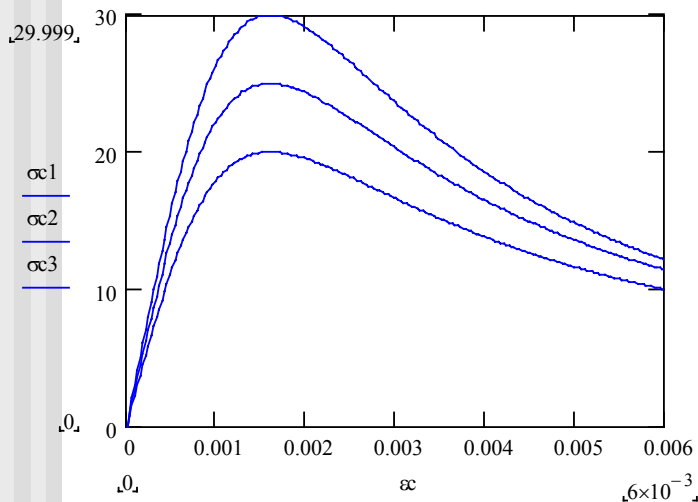
La compattazione si migliora con la vibrazione o con l'aggiunta di fluidificanti.



La lavorabilità si misura con il "cono di Abrams"

Caratteristiche meccaniche

Curve σ - ε di provini di cls con diverse resistenze.



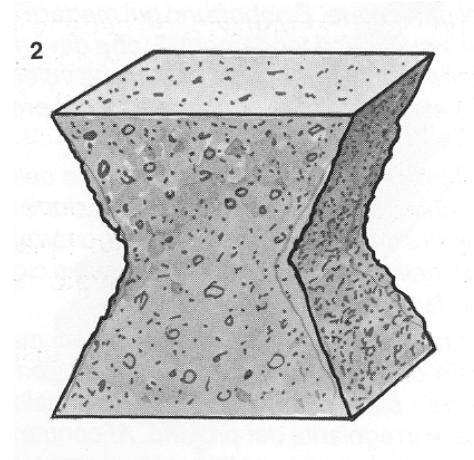
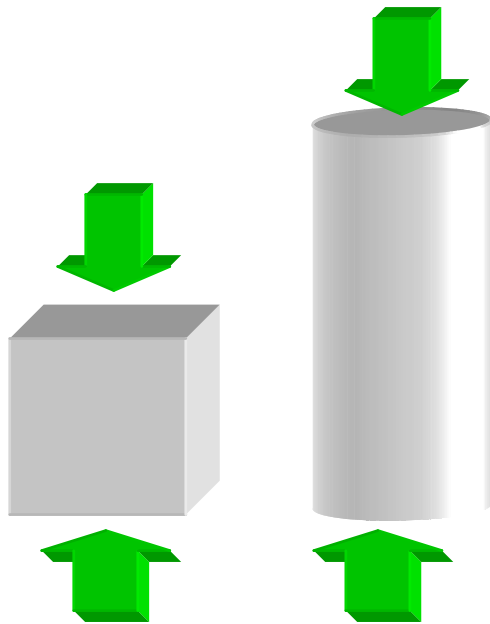
$$\sigma_c = f_c \frac{n\eta}{n-1+\eta^n} \quad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad n = \frac{E_c \varepsilon_{c1}}{E_c \varepsilon_{c1} - f_c}$$

Popovics-Mander

Resistenza a compressione

Si misura su provini cubici con spigolo di 15 cm (resistenza cubica R_c) o cilindrici con $D = 15$ cm e $H = 30$ cm (resistenza cilindrica f_c)

$$f_c \approx 0.83R_c$$



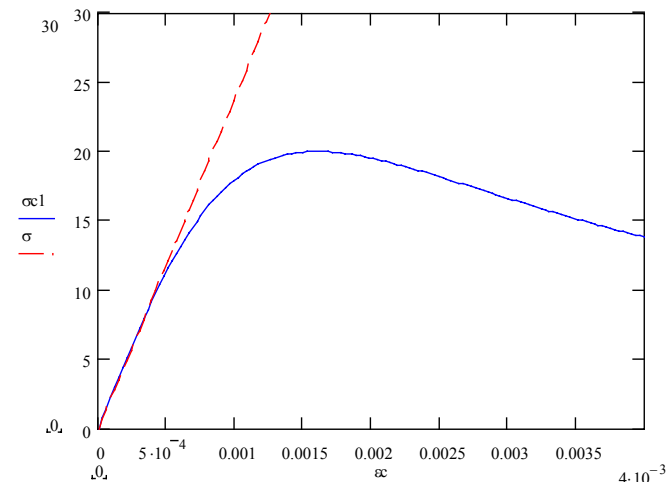
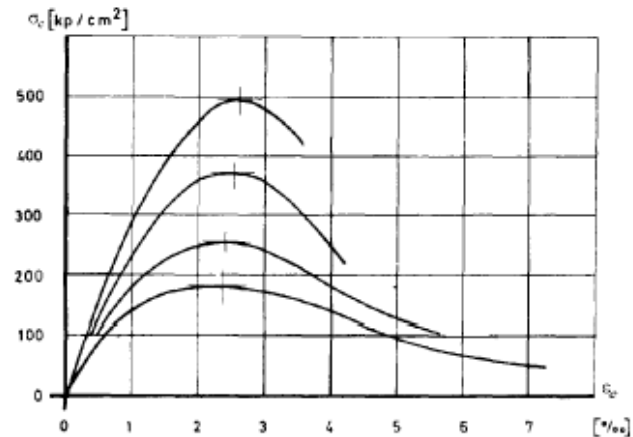
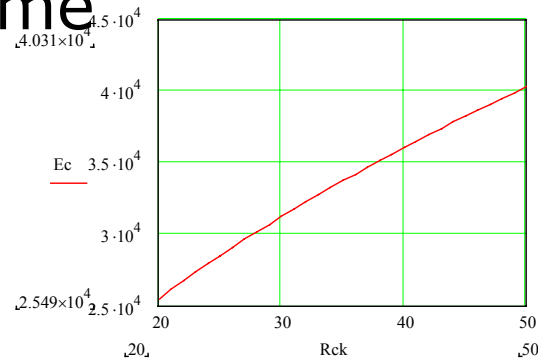
Modulo elastico

Il legame costitutivo del cls manca di una fase lineare ben definita. Il modulo elastico è fissato convenzionalmente come il modulo secante a

$$\sigma = 0.4 f_c$$

Il modulo elastico è correlato alla resistenza. Per la norma italiana si assume

$$E_c = 5700 \sqrt{R_{ck}} \quad (\text{N/mm}^2)$$



Resistenza a trazione

Il calcestruzzo teso ha un comportamento fragile.

La resistenza a trazione si misura spesso mediante prove indirette

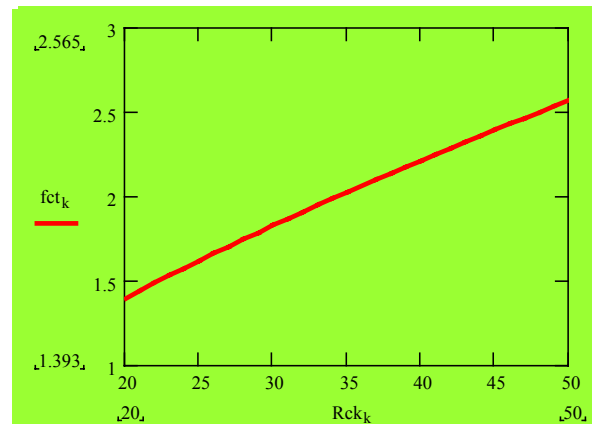
La resistenza a trazione è correlato con quella a compressione.

$$f_{ctm} = 0.27 R_{ck}^{2/3}$$

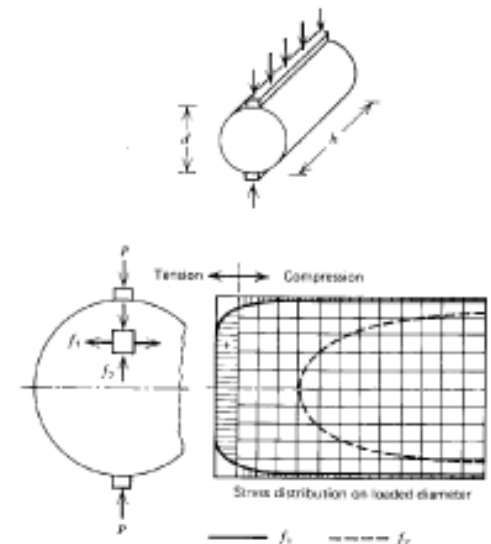
Valore medio della resistenza a trazione

$$f_{ctk} = 0.7 f_{ctm}$$

(N/mm²)



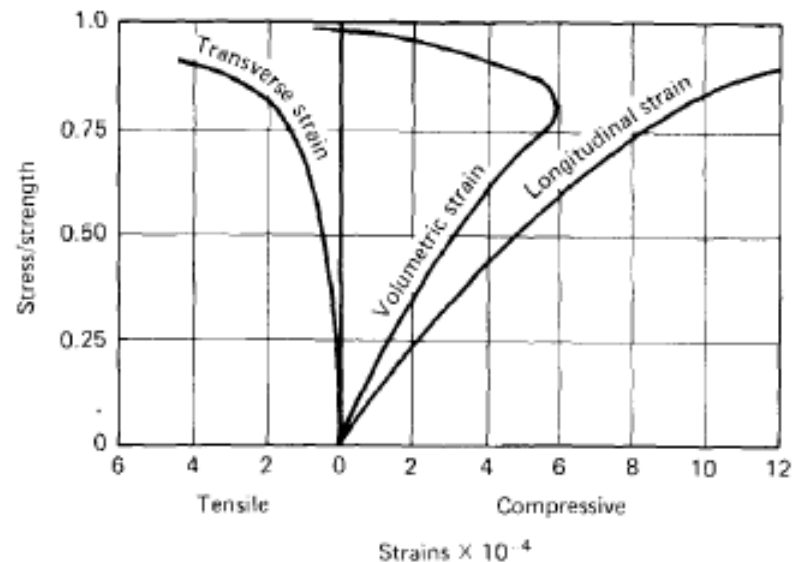
Prova brasiliana



Deformazione trasversale

In fase elastica $\varepsilon_t = -\nu\sigma/E$
con $\nu \approx 0.2$

In prossimità del collasso per schiacciamento la deformazione trasversale cresce rapidamente e la deformazione volumetrica diminuisce e cambia segno (dilatanza)



Deformazione volumetrica

$$\vartheta = \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

Criterio di Mohr-Coulomb

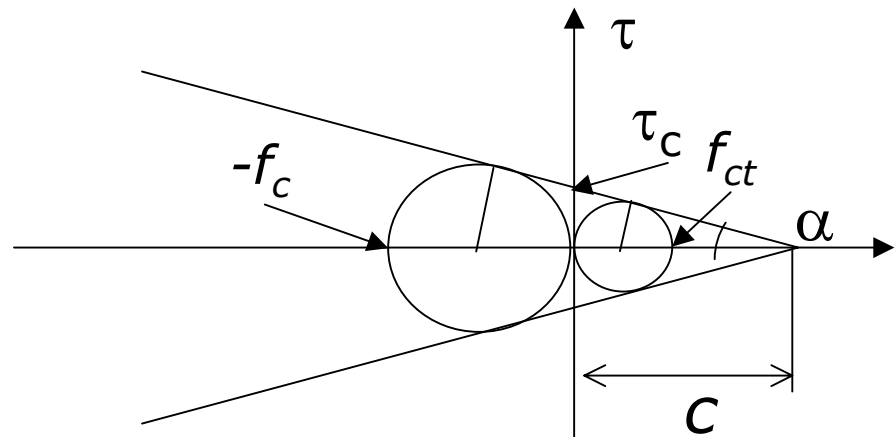
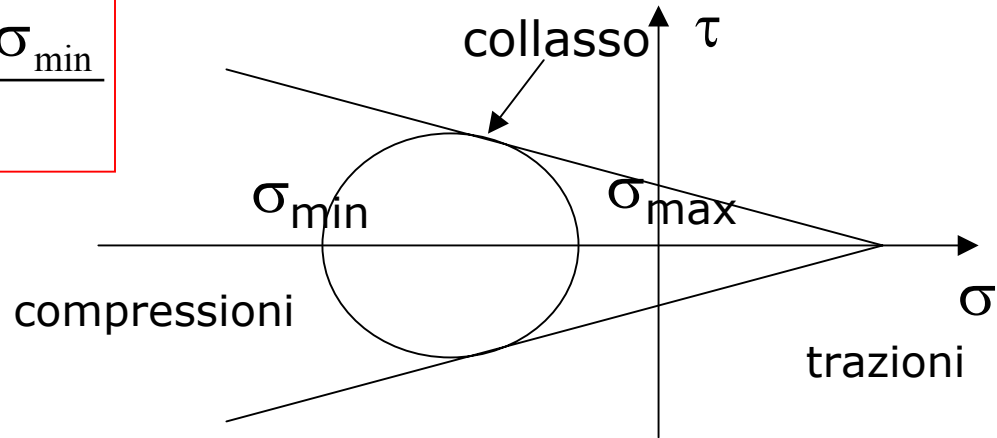
$$\left(c - \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right) \sin \alpha = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\begin{cases} (c + 0.5 f_c) \sin \alpha = 0.5 f_c \\ (c - 0.5 f_{ct}) \sin \alpha = 0.5 f_{ct} \end{cases}$$

$$0.5(f_c + f_{ct}) \sin \alpha = 0.5(f_c - f_{ct})$$

$$\sin \alpha = \frac{f_c - f_{ct}}{f_c + f_{ct}}$$

$$c = \frac{f_c f_{ct}}{f_c - f_{ct}}$$



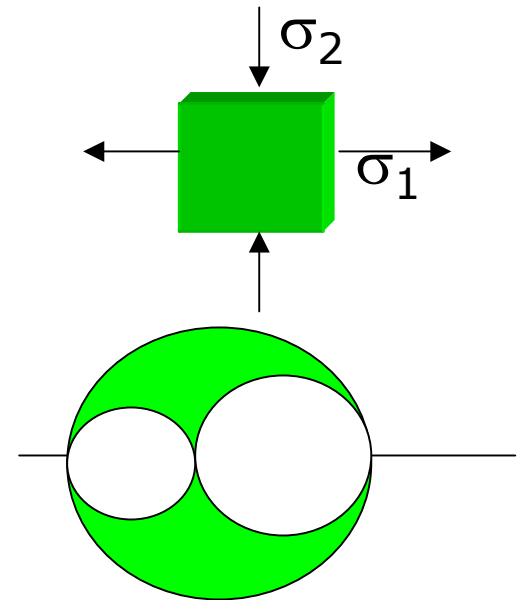
Stati di tensione piani

Se σ_1 e σ_2 hanno lo stesso segno si ha che $\sigma_{\min} \geq 0$ o $\sigma_{\max} \leq 0$ e $\sigma_{ul} = f_c$ o f_{ct} .
Se σ_1 e σ_2 hanno segni diversi, con $\sigma_1 > \sigma_2$

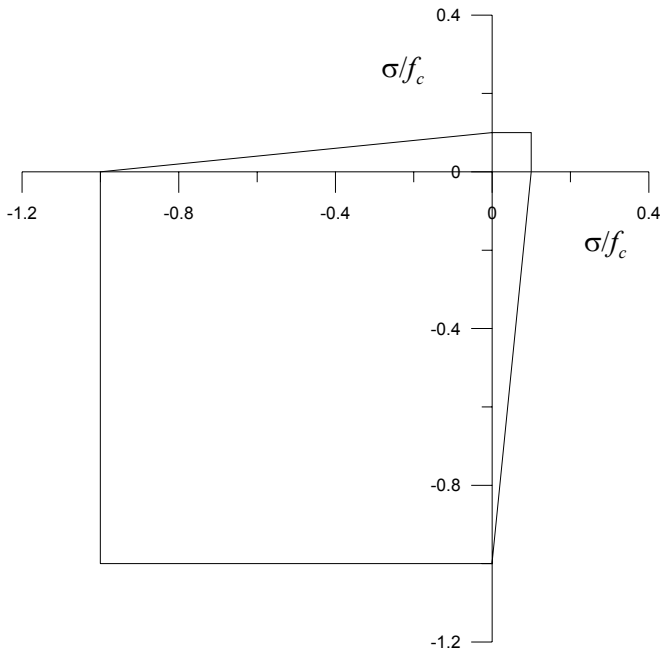
$$\left(c - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \sin \alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

Da questa si deriva

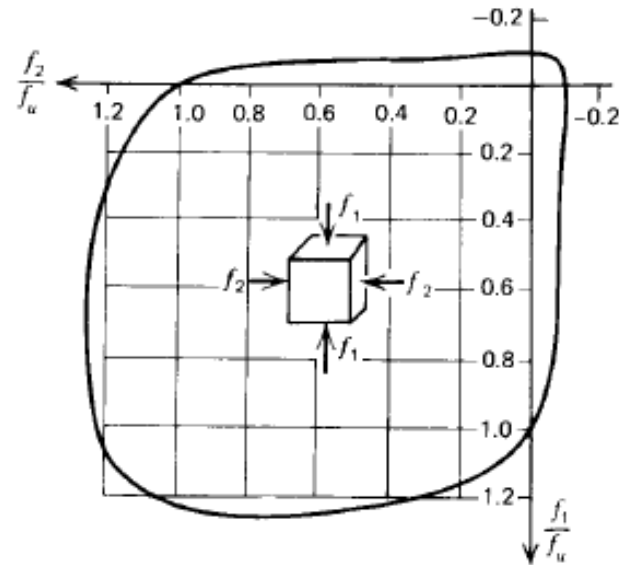
$$\frac{\sigma_1}{f_{ct}} - \frac{\sigma_2}{f_c} = 1$$



Stati di tensioni piani (2)



Teorico



Sperimentale

Confinamento

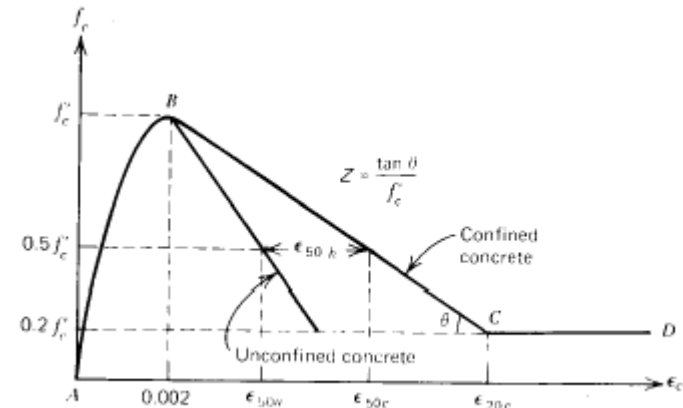
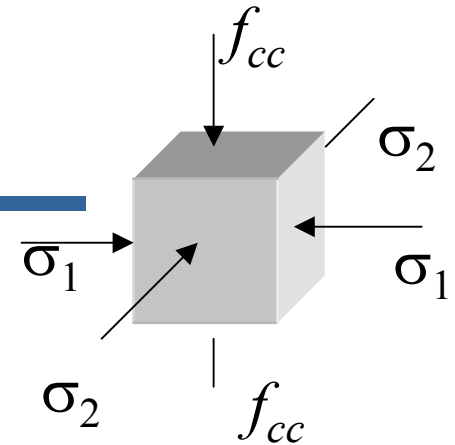
Per $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_p$ uno dei cerchi di Mohr degenera in un punto e la condizione di collasso diviene:

$$\frac{-|\sigma_p|}{f_{ct}} - \frac{-f_{cc}}{f_c} = 1$$

In quanto $\sigma_p < 0$ e $f_{cc} > 0$. Si ricava quindi

$$f_{cc} = f_c + \frac{f_c}{f_{ct}} |\sigma_p|$$

Quindi la resistenza del cls confinato dovrebbe aumentare proporzionalmente al rapporto $f_c/f_{ct} \approx 10$. In pratica si osserva che $f_{cc} \approx f_c + 4\sigma_p$



Ritiro

Il ritiro del cls è un fenomeno che si manifesta con la riduzione del volume del getto.

L'entità del ritiro è fortemente influenzata dal rapporto a/c e dall'umidità ambientale.

t_0 (giorni)	U.R. = 75%		U.R. = 55%	
	$\alpha \leq 20$ cm	$\alpha \geq 60$ cm	$\alpha \leq 20$ cm	$\alpha \geq 60$ cm
1 ÷ 7	0.26×10^{-3}	0.21×10^{-3}	0.43×10^{-3}	0.31×10^{-3}
8 ÷ 60	0.23×10^{-3}	0.21×10^{-3}	0.32×10^{-3}	0.30×10^{-3}
> 60	0.16×10^{-3}	0.20×10^{-3}	0.19×10^{-3}	0.28×10^{-3}

Deformazione di ritiro a $t=\infty$ secondo le norme italiane

t_0 = età conglomerato a partire dalla quale si considera l'effetto del ritiro;

α = dimensione fittizia = $2A_c/u$

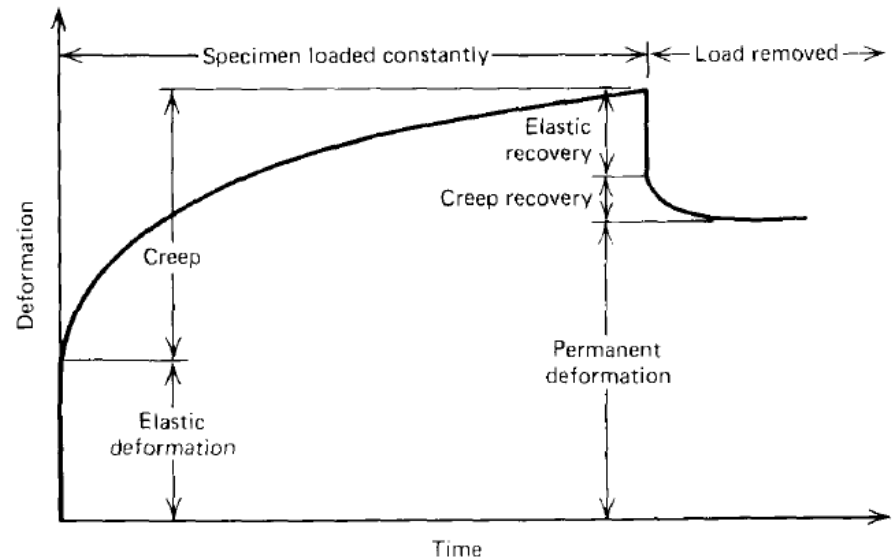
A_c = area della sezione del conglomerato;

u = perimetro della sezione di conglomerato a contatto con l'atmosfera..

Viscosità

Quando un carico viene applicato per un lungo periodo di tempo le deformazioni non si arrestano al momento dell'applicazione, ma continuano a crescere tendendo asintoticamente ad un valore finito.

Nel cls la deformazione viscosa non è interamente removibile; una parte della deformazione rimane anche dopo la rimozione del carico a $t = \infty$



Viscosità lineare

La deformazione viscosa è proporzionale a quella istantanea, per cui la deformazione totale al tempo t prodotta da una tensione $d\sigma$ applicata al tempo τ è:

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma}{E(\tau)} [1 + \phi(t, \tau)]$$

Per una assegnata storia di carico $\sigma(\tau)$ si ha:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t [1 + \phi(t, \tau)] \frac{\dot{\sigma}(\tau)}{E(\tau)} d\tau$$

$\phi(\infty, \tau)$ esprime il rapporto tra le deformazioni viscosa a $t=\infty$ ed istantanea prodotte da un carico applicato al tempo τ

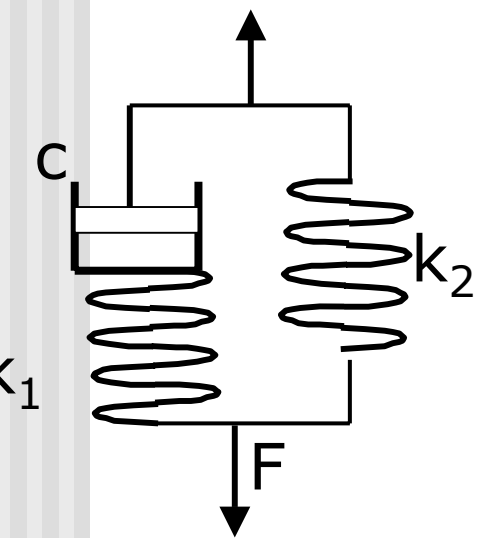
Viscosità nel cls

t_0 giorni	UR=75%		UR=55%	
	$\alpha \leq 20$ cm	$\alpha \geq 60$ cm	$\alpha \leq 20$ cm	$\alpha \geq 60$ cm
3 ÷ 7	2.7	2.1	3.8	2.9
8 ÷ 60	2.2	1.9	3.0	2.5
> 60	1.4	1.7	1.7	2.0

Valori della funzione $\phi(\infty, t_0)$ per il cls, secondo la normativa italiana, in funzione di α e dell'U.R.

L'entità delle deformazioni viscosi è influenzata dal rapporto a/c .

Un semplice modello reologico



Equilibrio

$$c\dot{x}_1 + k_1x_2 + k_2(x_1 + x_2) = F$$

$$c\dot{x}_1 = k_1x_2$$

Da queste

$$c\left(2 + \frac{k_2}{k_1}\right)\dot{x}_1 + k_2x_1 = F$$

La soluzione per la condizione iniziale $x_1(0)=0$ è

$$x(t) = x_1 + x_2 = \frac{F}{k_2} \left[1 - \frac{2k_1}{2k_1 + k_2} e^{-\frac{k_1k_2}{c(2k_1+k_2)}t} \right]$$

Fattore di viscosità

$$x(0) = \frac{F}{2k_1 + k_2}$$

$$x(\infty) = \frac{F}{k_2}$$

$$\frac{x(\infty)}{x(0)} = \frac{2k_1 + k_2}{k_2} = 1 + 2\frac{k_1}{k_2}$$

Rilassamento

Per la condizione $x_1 + x_2 = x = \text{cost}$ e la cond. iniz. $x_1(0) = 0$, dalla seconda equazione

$c\dot{x}_1 = k_1(x - x_1) \Rightarrow c\dot{x}_1 + k_1x_1 = k_1x$ La cui soluzione è

$$x_1(t) = x \left(1 - e^{-\frac{k_1 t}{c}} \right) \quad \dot{x}_1(t) = x \frac{k_1}{c} e^{-\frac{k_1 t}{c}}$$

Per $t=0$ $x_1 = 0$ $\dot{x}_1 = \frac{xk_1}{c}$ $x_2 = x - x_1 = x$

Dalla 1 $F_0 = (2k_1 + k_2)x$

Per $t=\infty$ $x_1 = x$ $\dot{x}_1 = 0$ $x_2 = x - x_1 = 0$

Dalla 1 $F_\infty = k_2x \quad \Rightarrow \quad \frac{F_\infty}{F_0} = \frac{k_2}{2k_1 + k_2}$

Resistenza caratteristica

La resistenza caratteristica di un materiale è quel valore per cui si ha il 5% di probabilità che risulti $R < R_k$

Durante l'esecuzione dei lavori deve essere controllato che il valore caratteristico della resistenza del calcestruzzo non è inferiore a quello fissato in fase di progetto

Prelievi

Per la normativa italiana un prelievo è formato da due campioni, prelevati da uno stesso getto al momento della posa in opera; la media delle resistenze dei due campioni è detta resistenza di prelievo. Il controllo di accettazione si può eseguire secondo due diverse modalità:

- Si esegue un prelievo (2 provini) ogni 100 m^3 di getto con un minimo di 3 prelievi
- Nel caso di costruzioni con più di 1500 m^3 di calcestruzzo è ammesso un controllo di tipo statistico. Viene eseguito almeno un prelievo ogni giorno di getto e, complessivamente, non meno di 15 prelievi ogni 1500 m^3 .

Controlli di accettazione

- Per un prelievo ogni 100 m³ di getto:

Indicando con R_m la media aritmetica delle tre resistenze di prelievo e con R_{\min} il valore minimo tra i tre, il controllo è superato se:

$$R_m \geq R_{ck} + 3.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$R_{\min} \geq R_{ck} - 3.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

- Il controllo di tipo statistico è superato se sono verificate le condizioni seguenti:

$$R_m \geq R_{ck} + 1.4s$$

$$R_{\min} \geq R_{ck} - 3.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

in cui R_{\min} è il valore minimo delle resistenze di prelievo ed s^2 il loro scarto quadratico medio

$$R_m = \frac{1}{n} \sum_i R_i$$

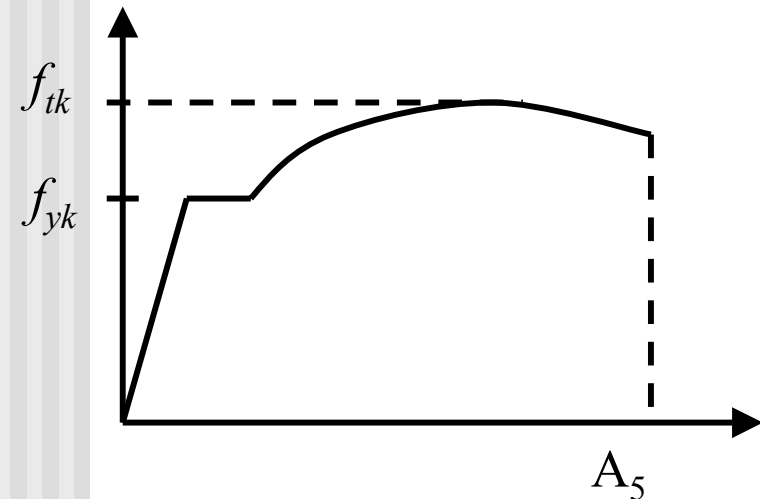
Media e scarto quadratico medio

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (R_i - R_m)^2$$



Acciai da cemento armato

Gli acciai da c.a. vengono prodotti in barre trafilate di diametro compreso tra i 6 ed i 30 mm (26 mm per Feb44). Gli acciai sono classificati sulla base della tensione di snervamento. Gli acciai delle prime due classi sono prodotti in barre tonde e lisce, quelli delle altre due in barre sagomate.



TIP O	f_{yk}	f_{tk}	A_5
	$N / m m^2$	$N / m m^2$	%
F e B 22 k	215	335	24
F e B 32 k	315	490	23
F e B 38 k	375	450	14
F e B 44 k	430	540	12

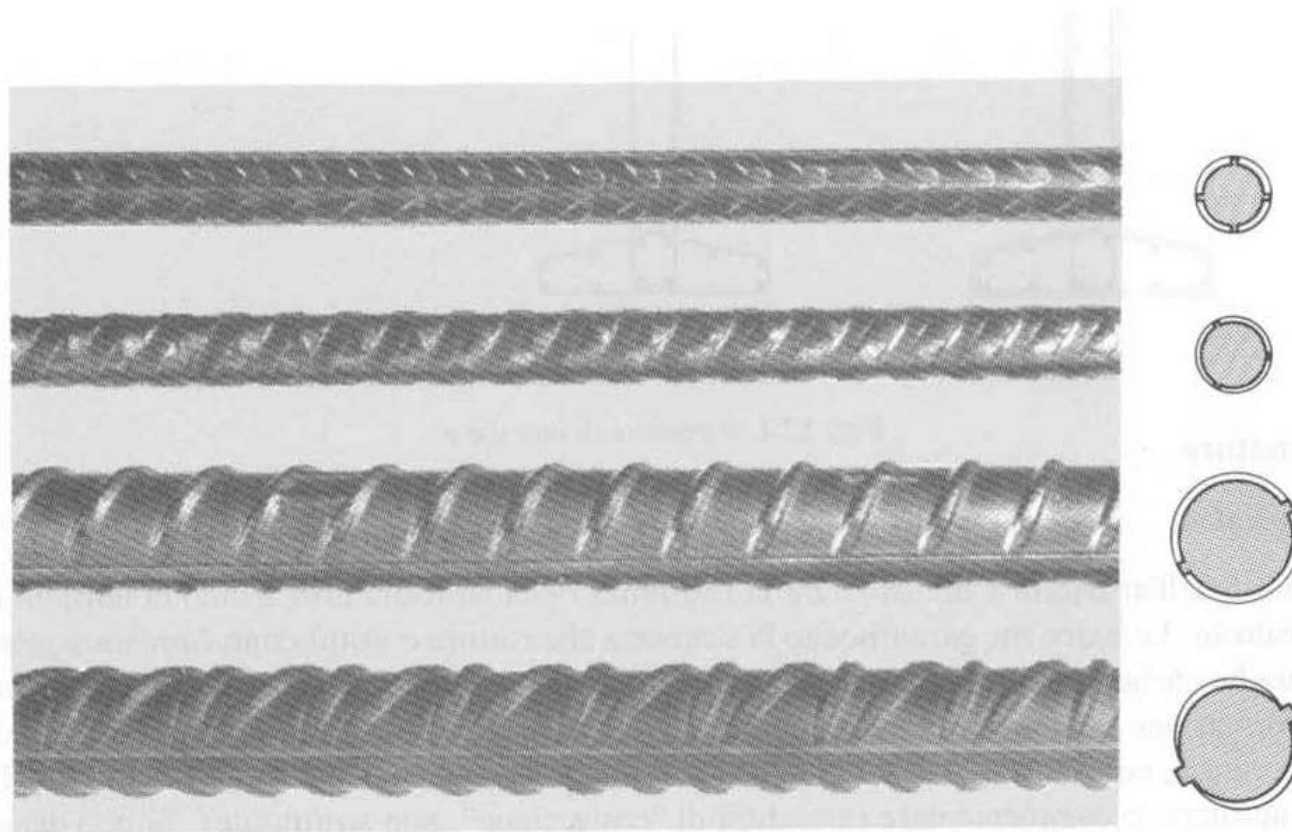
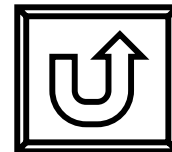
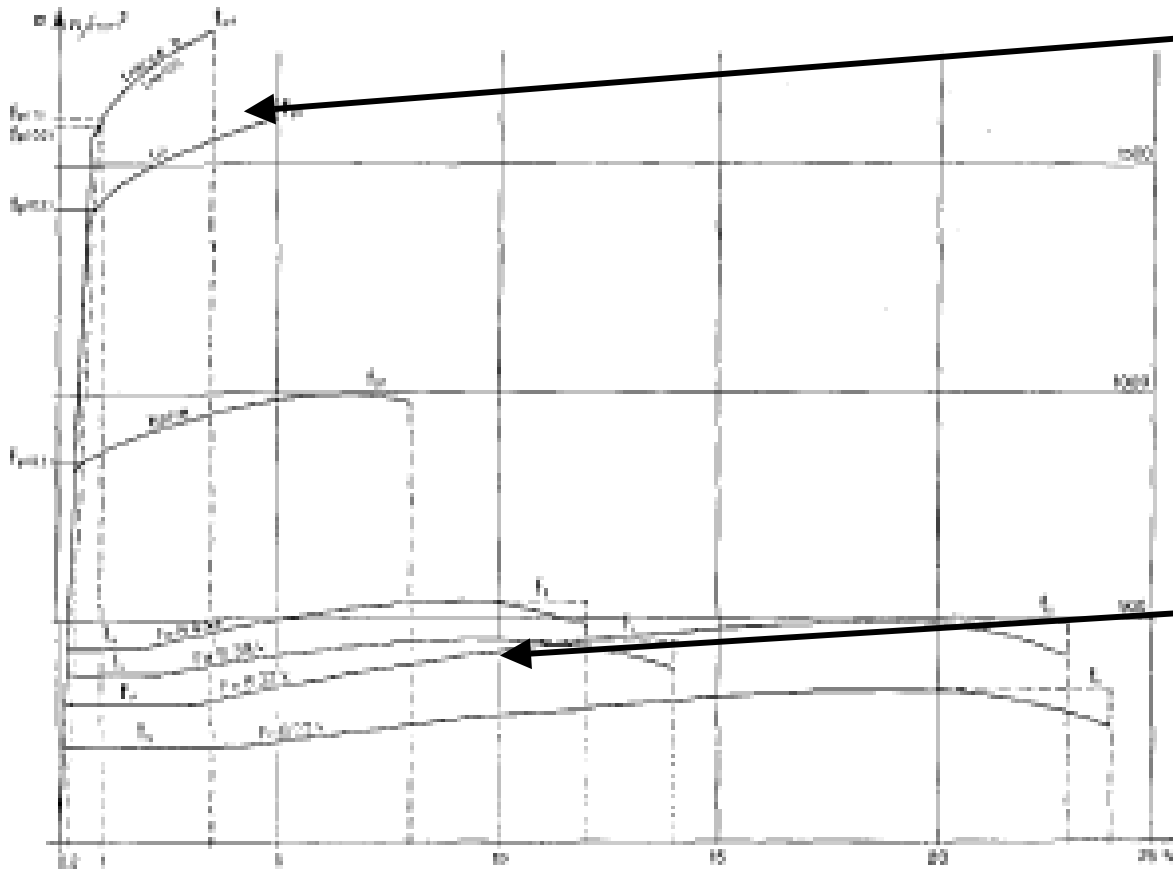


Fig. 12.2 Esempi di barre d'acciaio sagomate (foto A. Herzog).

Leggi costitutive



Acciai ad alta resistenza (cap)

Acciai da Cemento Armato



Aderenza acciaio-calcestruzzo

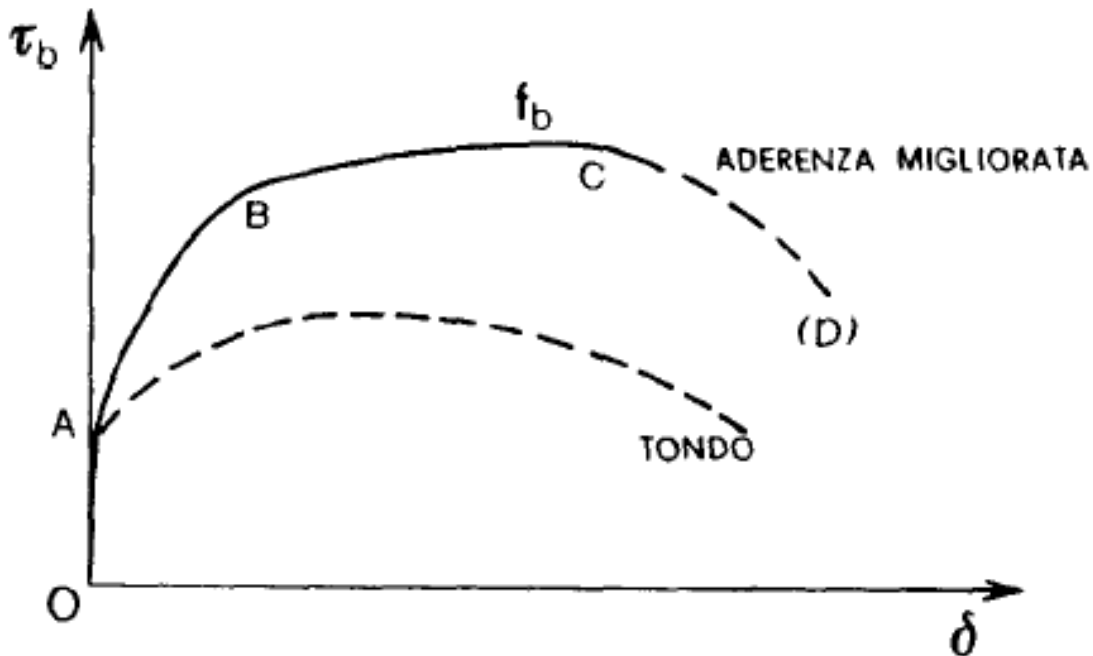


Figura 2.13: Curve forza–spostamento di prove di sfilamento.