

Lezione

COMPLEMENTI DI TECNICA DELLE COSTRUZIONI

Prof. Pier Paolo Rossi

Università degli Studi di Catania

I MATERIALI

I materiali

Importanza della caratterizzazione

Al fine di verificare il soddisfacimento degli obiettivi di progetto previsti dalla normativa è necessario ...

sapere come variano le principali caratteristiche meccaniche dei materiali (calcestruzzo, acciaio da c.a. e acciaio da precompresso) in funzione del tempo, delle condizioni ambientali (temperatura e umidità) e dei carichi imposti.

Il calcestruzzo

Classi di resistenza del calcestruzzo

Valori minimi secondo NTC

C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------

strutture non armate
o a bassa percentuale di armatura

X	X	strutture semplicemente armate (minimo C16/20)												
X	X	X	X	X	Strutture precomprese (minimo C28/35)									

Nota: oltre alle classi di resistenza riportate in Tabella si possono prendere in considerazione le classi di resistenza già in uso C28/35 e C32/40.

La classe minima di resistenza del cls di strutture precomprese è la
C28/35

Classi di resistenza del calcestruzzo

Controlli particolari secondo NTC

Per le classi di resistenza superiori alla C45/55,

la resistenza caratteristica e tutte le grandezze meccaniche e fisiche che hanno influenza sulla resistenza e durabilità del conglomerato devono essere accertate prima dell'inizio dei lavori tramite un'apposita sperimentazione preventiva e la produzione deve seguire specifiche procedure per il controllo di qualità.

Per le classi di resistenza superiori alla C70/85,

deve essere richiesta l'autorizzazione ministeriale mediante le procedure già stabilite per altri materiali "innovativi".

Classi di resistenza del calcestruzzo

Strutture precomprese

Il calcestruzzo utilizzato per strutture precomprese è di qualità migliore e di resistenza superiore a quella del calcestruzzo adoperato per strutture in conglomerato cementizio ordinario (f_{ck} per c.ap. normalmente oscilla tra 40 e 65 MPa).

L'utilizzo del calcestruzzo di elevata resistenza consente di :

- limitare le dimensioni delle sezioni trasversali richieste dalla presenza dei carichi trasversali
- incrementare la resistenza delle zone di ancoraggio in strutture post-tese fortemente sollecitate dagli sforzi trasmessi dalle piastre di ancoraggi dei cavi
- incrementare la resistenza allo scorrimento dei cavi pretesi
- incrementare la resistenza alla fessurazione
- incrementare il modulo elastico
e quindi diminuire le deformazioni elastiche da carichi e precompressione
- ridurre gli effetti viscosi

Calcestruzzo

La variazione della resistenza nel tempo

Se la stagionatura è in accordo con quanto riportato nella EN 12390:2 e la temperatura è uguale a 20°, la resistenza media a compressione del cls può essere calcolata mediante la relazione :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$$

con

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right]}$$

dove :

f_{cm}	valore medio della resistenza cilindrica a compressione a 28 giorni	
s	=0.20 per cementi alta resistenza	(CEM 42.5R CEM 52.5N CEM 52.5R)
	=0.25 per cementi normali	(CEM 32.5R CEM 42.5N)
	=0.38 a lento indurimento	(CEM 32.5N)

Calcestruzzo

La variazione della resistenza nel tempo

Il valore caratteristico della resistenza a compressione può essere calcolato mediante la relazione :

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} \quad \text{per } 3 < t < 28$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad \text{per } t \geq 28$$

Calcestruzzo

Resistenza a trazione

La resistenza media a trazione semplice del calcestruzzo (N/mm^2) vale :

$$f_{\text{ctm}} = 0.30 f_{\text{ck}}^{2/3} \quad \text{per } f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{ctm}} = 2.12 \ln[1 + f_{\text{ck}} / 10] \quad \text{per } f_{\text{ck}} > 50 \text{ MPa}$$

Il valore della resistenza media a trazione semplice del calcestruzzo nel tempo può essere calcolato mediante la relazione :

$$f_{\text{ctm}}(t) = [\beta_{\text{cc}}(t)]^{\alpha} f_{\text{ctm}}$$

dove :

$$\alpha = 1.00 \quad \text{per } t < 28 \text{ giorni}$$

$$= 0.667 \quad \text{per } t \geq 28 \text{ giorni}$$

Calcestruzzo

Resistenza a trazione

I valori corrispondenti ai frattili del 5% e 95% della resistenza a trazione semplice sono assunti pari a :

$$f_{ct,5\%} = 0.7 f_{ctm}$$

$$f_{ct,95\%} = 1.3 f_{ctm}$$

Il valore medio della resistenza a trazione per flessione è assunto, in mancanza di sperimentazione diretta, pari a :

$$f_{cfm} = 1.2 f_{ctm}$$

Calcestruzzo

Modulo elastico

Il modulo elastico secante di provini di calcestruzzo stagionati per 28 giorni e sollecitati da una tensione pari a $0.40 f_c$ può essere valutato mediante la relazione :

$$E_{cm} = 22000 [f_{cm} / 10]^{0.3} \quad [\text{MPa}]$$

Nota: tale formula non è applicabile ai calcestruzzi maturati a vapore.

Il valore del modulo elastico del calcestruzzo nel tempo può essere calcolato mediante la relazione :

$$E_{cm}(t) = [f_{cm}(t) / f_{cm}]^{0.3} E_{cm}$$

Caratteristiche di resistenza del cls

Valori secondo NTC

		8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
f_{ck}	MPa						30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
f_{cm}	MPa						38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm}	MPa						2.90	3.21	3.51	3.80	4.07	4.21	4.35	4.61	4.84	5.04
f_{ct005}	MPa						2.03	2.25	2.46	2.66	2.85	2.95	3.05	3.23	3.39	3.53
f_{ct095}	Mpa						3.77	4.17	4.56	4.93	5.29	5.48	5.66	5.99	6.29	6.56
f_{cfm}	Mpa						3.48	3.85	4.21	4.55	4.89	5.06	5.23	5.53	5.81	6.05
E_{cm}	MPa						32837	34077	35220	36283	37278	38214	39100	40743	42244	43631

Calcestruzzo

Cause ed evoluzione della deformazione

La deformazione del calcestruzzo
può essere distinta in :

- **ISTANTANEA** (carichi applicati)
- **DIFFERITA NEL TEMPO** (ritiro e viscosità del calcestruzzo)

Calcestruzzo

Cause ed evoluzione della deformazione

La deformazione del calcestruzzo
può essere calcolata come somma di diversi contributi :

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ce}(t) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t)$$

dove :

ε_{ce} deformazione istantanea

ε_{cc} deformazione viscosa

ε_{cs} deformazione da ritiro

Deformazione istantanea

Cause

La deformazione istantanea può essere valutata mediante la relazione :

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_c(t)}{E_{cm}}$$

e dipende da :

- intensità della forza e gradiente di applicazione della forza
- età del calcestruzzo al momento dell'applicazione della forza
- legame tensione deformazione del calcestruzzo

Deformazione istantanea

Coefficiente di Poisson

Per il coefficiente di *Poisson* può adottarsi, a seconda dello stato di sollecitazione, un valore compreso tra i seguenti limiti :

- 0 (calcestruzzo fessurato)
- 0.2 (calcestruzzo non fessurato)

Deformazione differita

Ritiro e viscosità

Ritiro e viscosità possono produrre :

- deformazioni assiali e rotazionali di elementi in c.a. e c.a.p.
- perdite di carico nei cavi da precompresso
- redistribuzione locale delle tensioni tra calcestruzzo e acciaio
- redistribuzione delle sollecitazioni in strutture iperstatiche
- fessurazione tale da compromettere durabilità e verifiche di esercizio

Deformazione differita

Ritiro

Il termine ritiro indica deformazione che si verifica nel tempo in un elemento di calcestruzzo non sollecitato, non vincolato e a temperatura costante.

Esso si può distinguere in:

- Ritiro plastico
- Ritiro da essiccamento
- Ritiro autogeno
- Ritiro termico

Deformazione differita

Ritiro plastico

Il termine ritiro plastico indica la contrazione che si verifica nel calcestruzzo a poche ore dal getto. Tale contrazione è dovuta all'evaporazione dell'acqua dalla superficie del getto verso un ambiente insaturo di vapore (U.R.<95%).

Il ritiro plastico :

- può indurre sollecitazioni di trazione che possono superare la modestissima resistenza a trazione del materiale giovane, provocando le tipiche cavillature superficiali.
- è accentuato in strutture con elevato rapporto tra superficie esposta all'aria e volume.

Per ridurre il ritiro plastico è opportuno garantire una idonea stagionatura protetta del calcestruzzo (ad esempio tramite membrane anti evaporazione o nebulizzazione di acqua).

Deformazione differita

Ritiro da essiccamento

Il termine ritiro igrometrico o da essiccamento indica la contrazione causata dall'evaporazione dell'acqua contenuta nel conglomerato verso l'ambiente esterno insaturo di vapore ($U.R. < 95\%$). Si manifesta durante tutta la vita utile del conglomerato, anche se la maggior parte si sviluppa nei primi mesi.

Il ritiro da essiccamento :

- dipende principalmente da fattori ambientali (temperatura esterna, umidità relativa e velocità dell'aria), dalla forma e grandezza dell'elemento, nonché dalla composizione del conglomerato (tipo e quantità di cemento, contenuto d'acqua, rapporto acqua/cemento, rapporto tra aggregato fine e grosso e tipo di aggregato).

Il ritiro da essiccamento può essere contrastato riducendo il rapporto acqua/cemento, aumentando il rapporto aggregato/cemento e, soprattutto, bagnando costantemente l'opera specialmente nei primi giorni di stagionatura.

Deformazione differita

Ritiro autogeno e termico

Il termine ritiro autogeno (o chimico) indica la contrazione dovuta all'idratazione del cemento in assenza di variazioni igrometriche e termiche.

Il ritiro autogeno :

- dipende principalmente dal tipo e quantitativo di cemento utilizzato per confezionare la miscela e si manifesta principalmente quando il calcestruzzo è plastico-deformabile, cioè nel periodo tra inizio e fine della presa.

Il termine ritiro termico indica la contrazione dovuta al calore sprigionato durante le reazioni di idratazione del cemento.

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro

La deformazione totale da ritiro si calcola mediante la relazione:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove :

ε_{cs} deformazione totale da ritiro

ε_{cd} deformazione da essiccamento

ε_{ca} deformazione da ritiro autogeno

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento

Il valore finale della deformazione da ritiro da essiccamento $\varepsilon_{cd,\infty}$ è calcolato mediante la relazione :

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{cd,0}$$

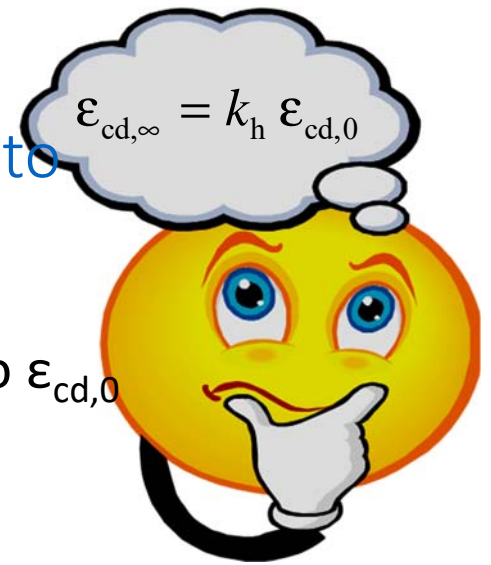
dove :

$\varepsilon_{cd,\infty}$ deformazione da essiccamento a tempo infinito

k_h coefficiente dipendente dal parametro di altezza fittizia h_0

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento



Il valore finale della deformazione da ritiro da essiccamento $\epsilon_{cd,0}$ è calcolato mediante la relazione :

$$\epsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \exp \left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \beta_{RH}$$

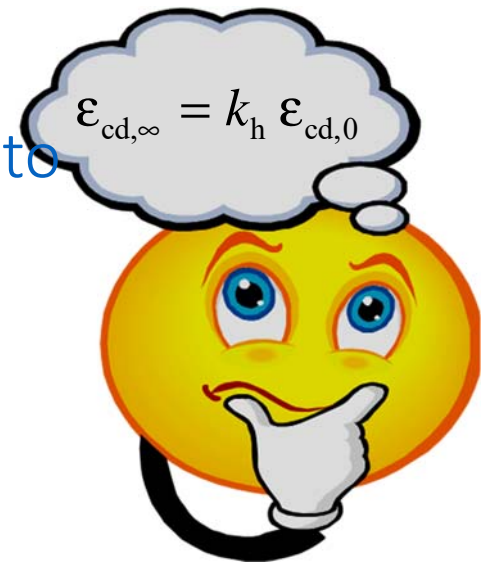
essendo :

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

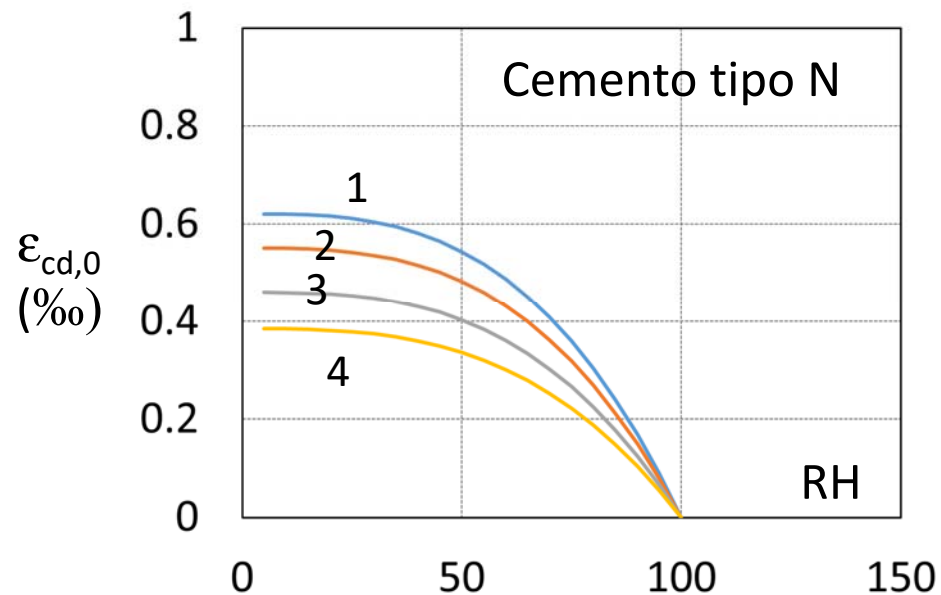
f_{cm}	resistenza media del calcestr. (MPa)	RH	umidità relativa (%)
f_{cm0}	10 MPa	RH_0	100%
α_{ds1}	=3 per cemento classe S =4 per cemento classe N =6 per cemento classe R	α_{ds2}	=0.13 per cemento classe S =0.12 per cemento classe N =0.11 per cemento classe R

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento

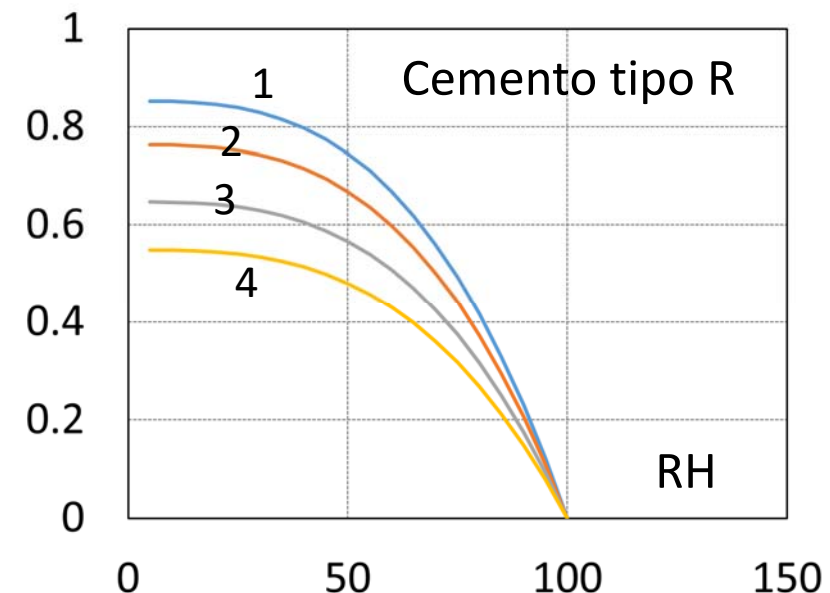


*Esempio:
variazione di $\varepsilon_{cd,0}$ con l'umidità relativa*



Caso1 (f_{cm} 28 MPa)

Caso3 (f_{cm} 53 MPa)

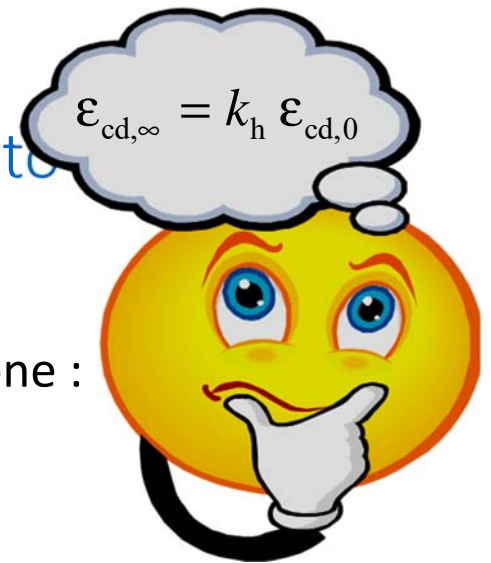


Caso2 (f_{cm} 38 MPa)

Caso4 (f_{cm} 68 MPa)

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento



Il parametro h_0 (altezza apparente) è calcolato mediante la relazione :

$$h_0 = 2A_c / u$$

dove :

A_c area della sezione trasversale del calcestruzzo

u perimetro della sezione trasversale del calcestruzzo esposta all'essiccamento

Il valore del parametro k_h si ricava dalla seguente tabella :

h_0 (mm)	100	200	300	≥ 500
k_h	1.00	0.85	0.75	0.70

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento

Lo sviluppo nel tempo della deformazione da ritiro da essiccamento $\varepsilon_{cd}(t)$ è regolato dalla relazione :

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) k_h \varepsilon_{cd,0}$$

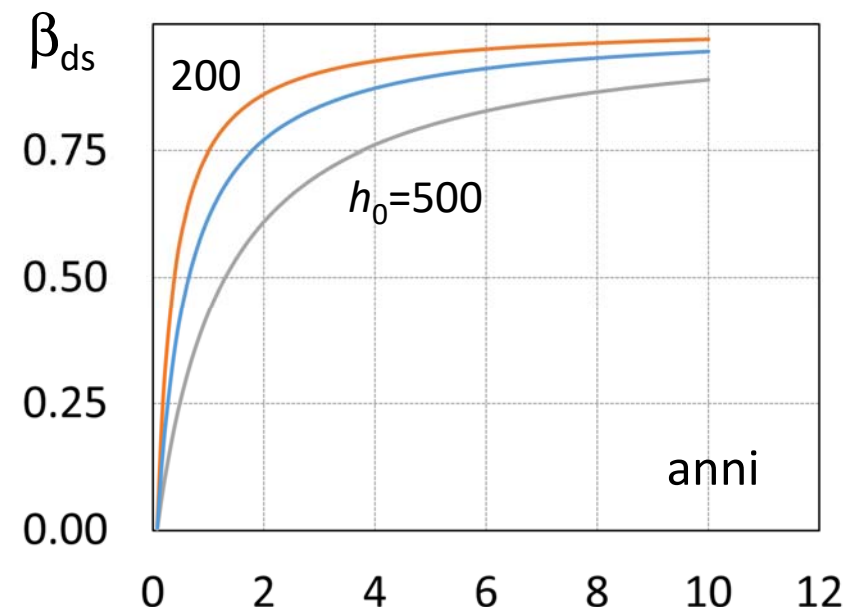
essendo :

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \sqrt{h_0^3}}$$

dove :

t tempo del calcestruzzo
al momento considerato (giorni)

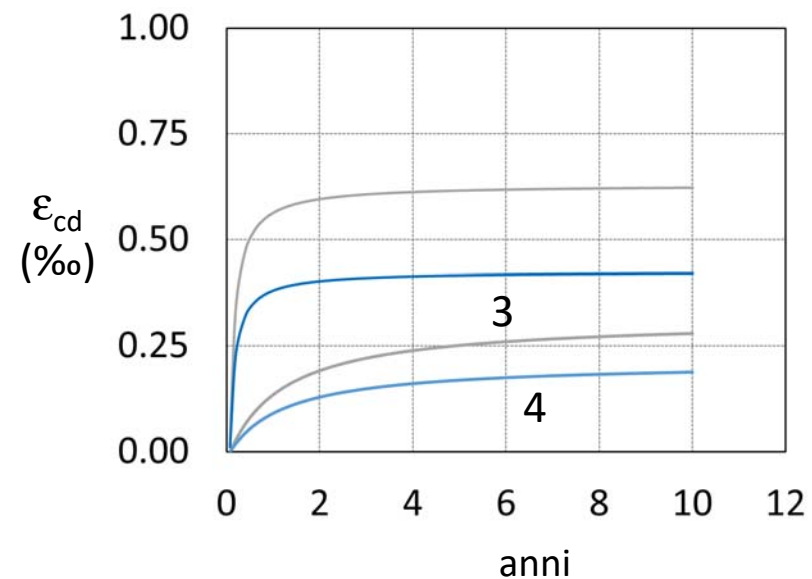
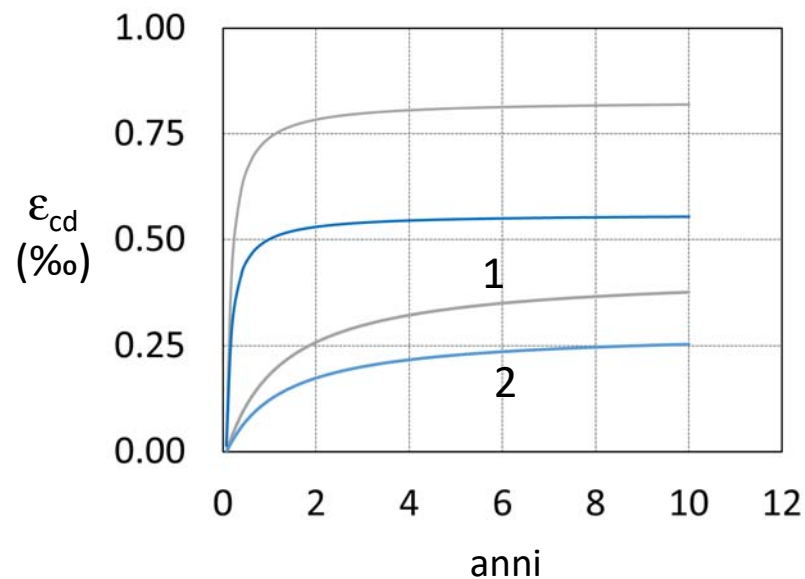
t_s tempo del calcestruzzo all'inizio
del ritiro da essiccamento (giorni)



Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento

*Esempio:
variazione di $\epsilon_{cd}(t)$ con il tempo*



Caso1 (RH=30%, $h_0=100/500$, f_{cm} 28 MPa - cemento N)

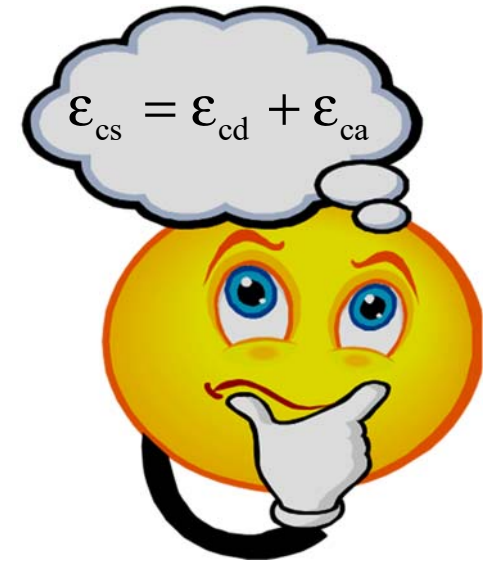
Caso2 (RH=70%, $h_0=100/500$, f_{cm} 28 MPa - cemento N)

Caso3 (RH=30%, $h_0=100/500$, f_{cm} 53 MPa - cemento N)

Caso4 (RH=70%, $h_0=100/500$, f_{cm} 53 MPa - cemento N)

Deformazione differita

Calcolo delle deformazioni da ritiro autogeno

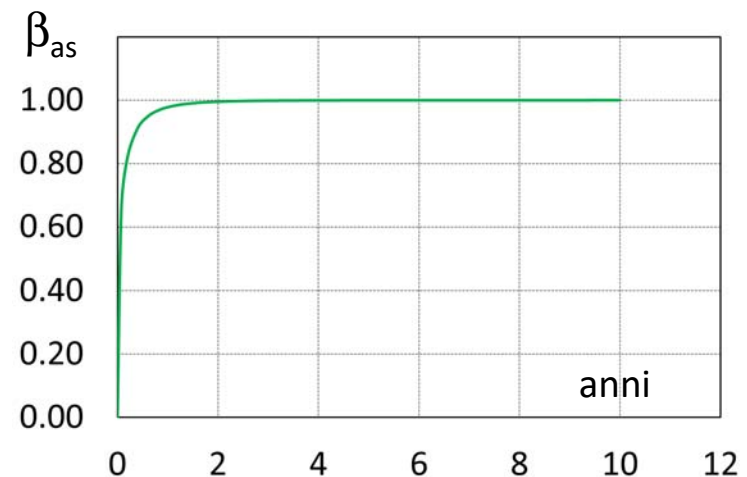
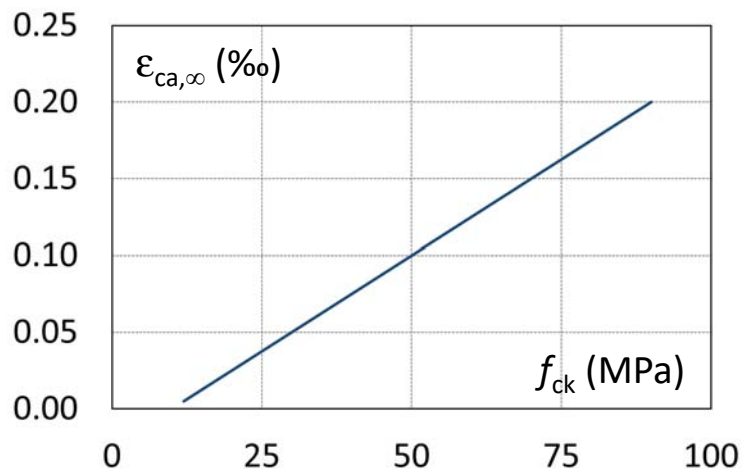


Lo sviluppo nel tempo della deformazione da ritiro autogeno $\epsilon_{ca}(t)$ è regolato dalla relazione :

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \epsilon_{ca,\infty}$$

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

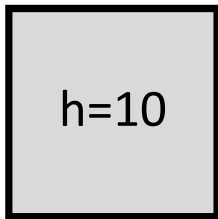
$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5})$$



Ritiro del calcestruzzo

Osservazioni sulla dimensione fittizia

$$b/h=1$$



SE ...

$$A=100 \text{ mm}^2$$

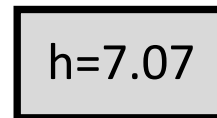
$$h_0=2 \times 100 / 40 = 5.00 \text{ mm}$$

SE ...

$$A=1 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$h_0=2 \times 100 / 40 = 500 \text{ mm}$$

$$b/h=2$$



SE ...

$$A=100 \text{ mm}^2$$

$$h_0=2 \times 100 / 42.4 = 4.71 \text{ mm}$$

SE ...

$$A=1 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$h_0=2 \times 100 / 42.4 = 471 \text{ mm}$$

$$b/h=10$$



$$h=3.16$$

SE ...

$$A=100 \text{ mm}^2$$

$$h_0=2 \times 100 / 69.6 = 2.87 \text{ mm}$$

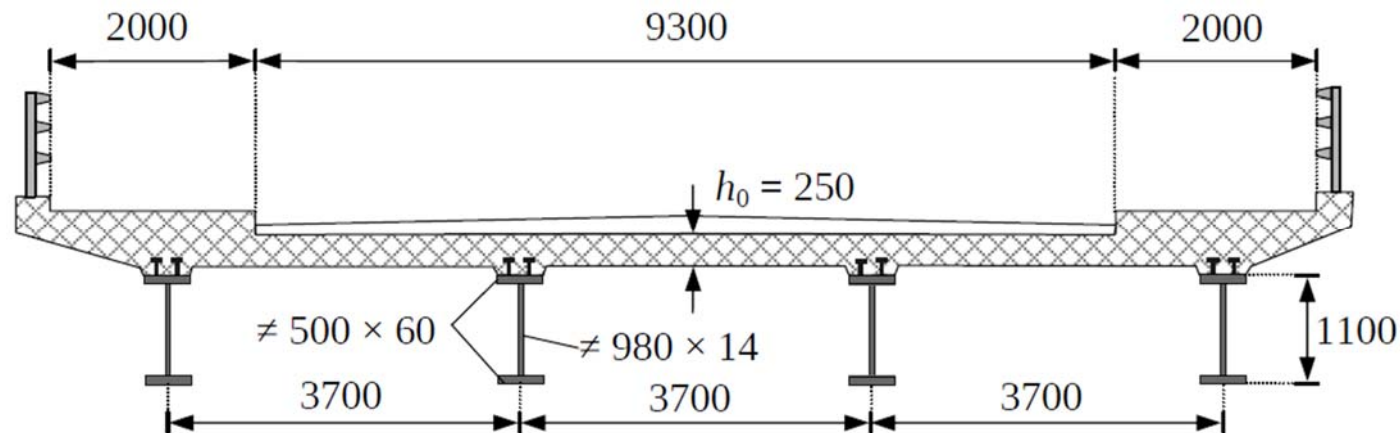
SE ...

$$A=1 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$h_0=2 \times 100 / 69.6 = 287 \text{ mm}$$

Ritiro del calcestruzzo

Esempio



Classe del calcestruzzo C40/50

$f_{ck} = 40$ MPa

$E_{cm} = 35000$ MPa

Tipo di cemento: N ($\alpha_{ds1} = 4$; $\alpha_{ds2} = 0.12$)

RH=70%

$t_s = 1$ giorno

Calcolare la deformazione totale
da ritiro a tempo infinito

Ritiro del calcestruzzo

Calcolo della deformazione da ritiro

La deformazione da ritiro autogeno $\epsilon_{ca,\infty}$ vale :

$$\epsilon_{ca,\infty} = 2.5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2.5(40 - 10) \cdot 10^{-6} = 7.5 \cdot 10^{-5}$$

Inoltre, per calcolare la deformazione da ritiro da essiccamento :

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - (RH/100)^3 \right] = 1.55 \left[1 - (70/100)^3 \right] = 1.018$$

$$\epsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \exp \left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \beta_{RH} =$$
$$0.85 \left[(220 + 110 \cdot 4) \exp \left(-0.12 \frac{40}{10} \right) \right] \cdot 10^{-6} 1.018 = 3.53 \cdot 10^{-4}$$

$$\epsilon_{cd,\infty} = 0.80 \cdot 3.53 \cdot 10^{-4} = 28.2 \cdot 10^{-5}$$

Dunque, la deformazione totale da ritiro a tempo infinito vale :

$$\epsilon_{cs} = 7.5 \cdot 10^{-5} + 28.2 \cdot 10^{-5} = 35.7 \cdot 10^{-5} = \mathbf{0.357 \times 10^{-3}}$$

Deformazione differita

Viscosità

La deformazione viscosa rappresenta la variazione unitaria di lunghezza allorché il calcestruzzo indurito è sottoposto all'azione di una sollecitazione di compressione o di trazione permanente per un determinato tempo t .

La deformazione viscosa dipende da:

- livello e durata di applicazione del carico
- età del calcestruzzo all'applicazione del carico
- mix design del calcestruzzo
(rapporto acqua/cemento, tipo e contenuto degli aggregati)
- variabili ambientali (umidità relativa, temperatura)
- forma e grandezza dell'elemento

Deformazione differita

Coefficiente di viscosità

La deformazione viscosa è calcolata attraverso il

coefficiente di viscosità $\varphi(t, t_0)$

In un campione di calcestruzzo soggetto ad una tensione di compressione applicata al tempo t_0 e mantenuta costante nel tempo, il coefficiente di viscosità al tempo t è calcolato come :

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\varepsilon_{ce}(t_0)}$$

dove :

- ε_{cc} deformazione viscosa al tempo t
per effetto di un carico mantenuto costante e applicato al tempo t_0
- ε_{ce} deformazione istantanea per effetto del carico applicato al tempo t_0

Deformazione differita

Coefficiente di viscosità

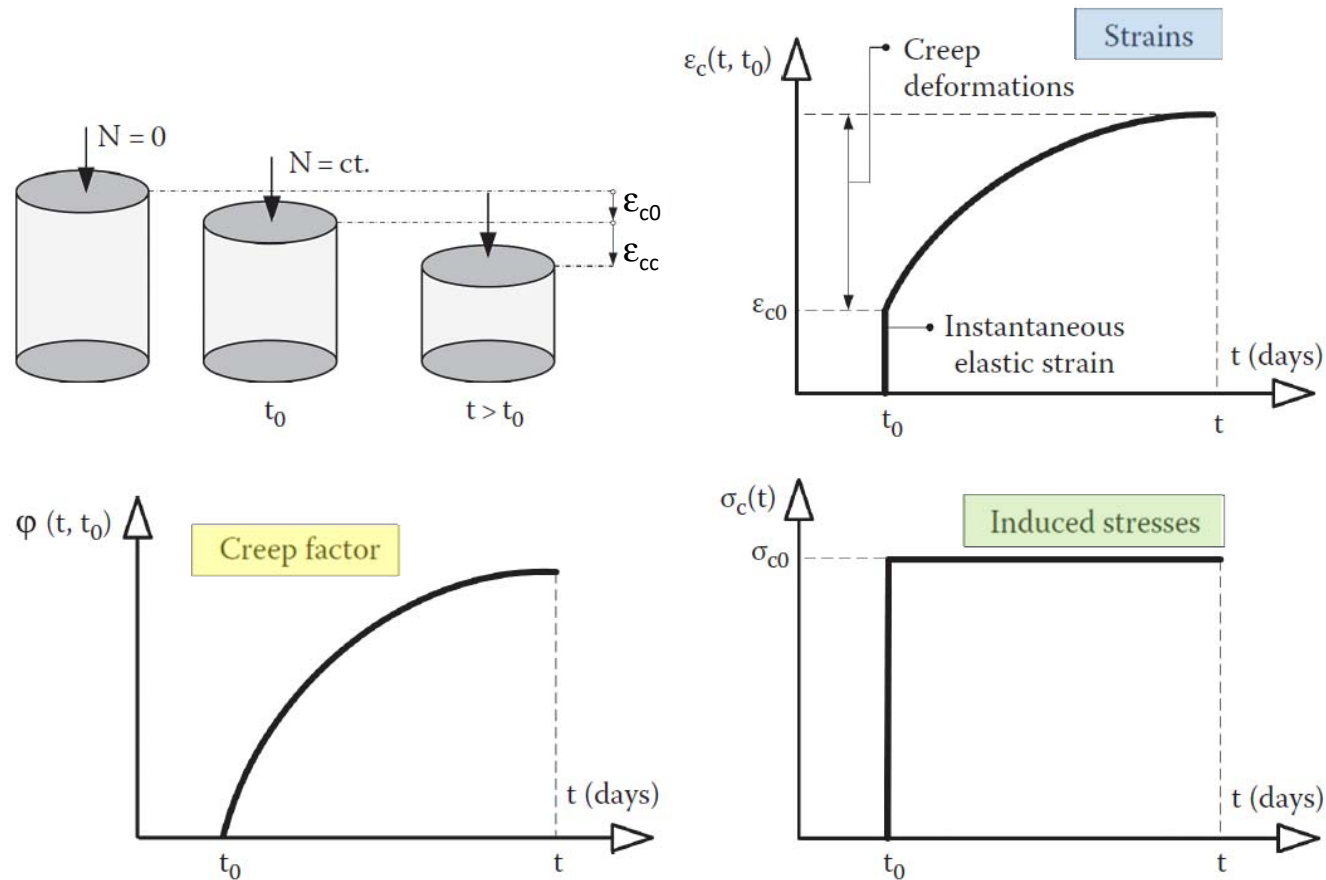
Il coefficiente di viscosità $\varphi(t, t_0)$:

- aumenta con il periodo di tempo $t - t_0$,
ma con gradiente decrescente con t .
- diminuisce all'aumentare del tempo t_0
- assume a tempo infinito (spesso considerato pari a 30 anni nella sperimentazione) un valore usualmente nel campo tra 1.5 e 4.0

Nota: per tensioni di compressione inferiori a $0.5 f_c$,
il coefficiente di viscosità $\varphi(t, t_0)$ è indipendente dal livello di tensioni.
In questo caso si parla di *viscosità lineare*.

Deformazione differita

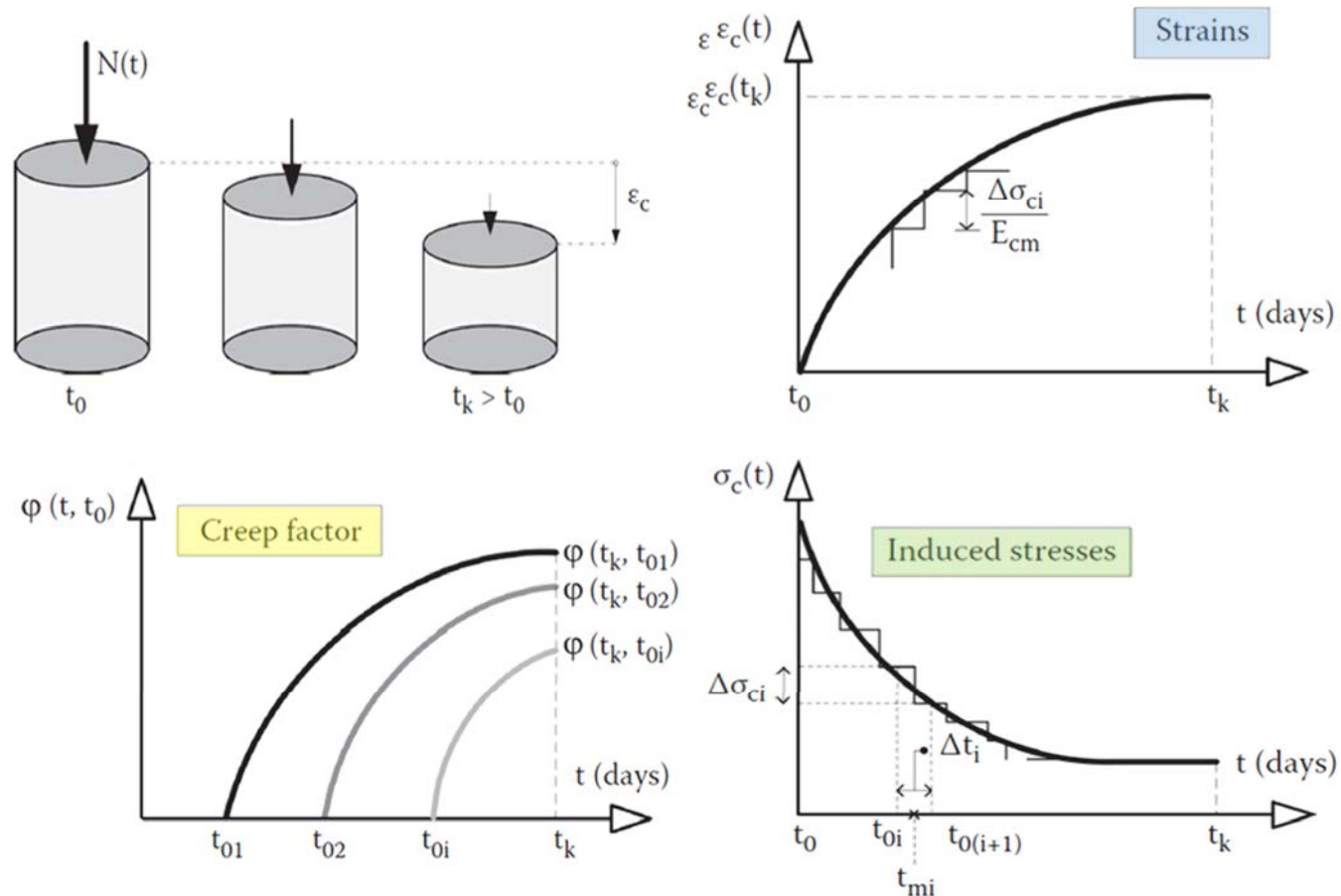
Effetto della viscosità – carico permanente



$$\epsilon_{ce} + \epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} [1 + \varphi_t(t, t_0)]$$

Deformazione differita

Effetto della viscosità – carico temporaneamente permanente



$$\epsilon_c(t_k) = \sum_{i=1}^k \Delta\sigma_{ci} \left[\frac{1}{E_{cm}} + \frac{\varphi(t_k, t_{mi})}{E_{cm}} \right]$$

Deformazione differita

Calcolo della deformazione viscosa

Se il livello di tensione è inferiore a $0.45 f_{ck}$,
il coefficiente di viscosità $\varphi(t, t_0)$ può essere calcolato come :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0)$$

dove :

φ_0 è il *coefficiente di viscosità apparente*
e può essere calcolato come :

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$$

Deformazione differita

Calcolo della deformazione viscosa

Il coefficiente φ_{RH} tiene conto dell'umidità relativa e può essere calcolato come :

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.10 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{se } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{RH} = 1 + \left[\frac{1 - RH/100}{0.10 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad \text{se } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

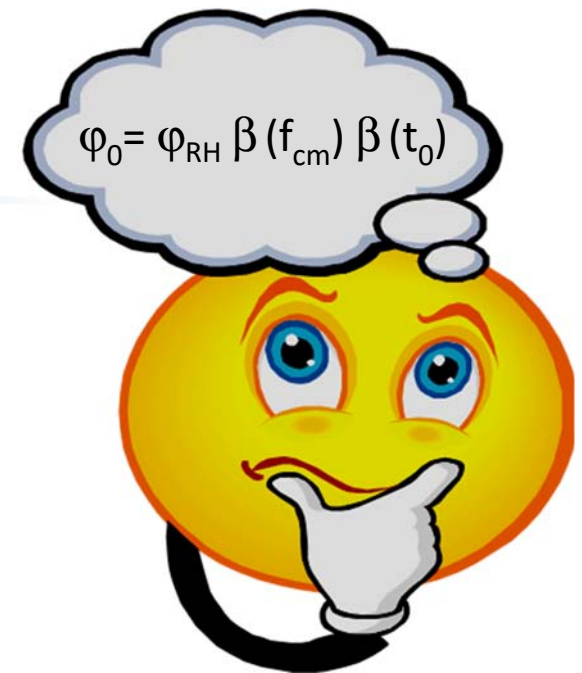
dove :

$h_0 = 2A_c/u$ dimensione fittizia della membratura in mm

RH umidità relativa (%)

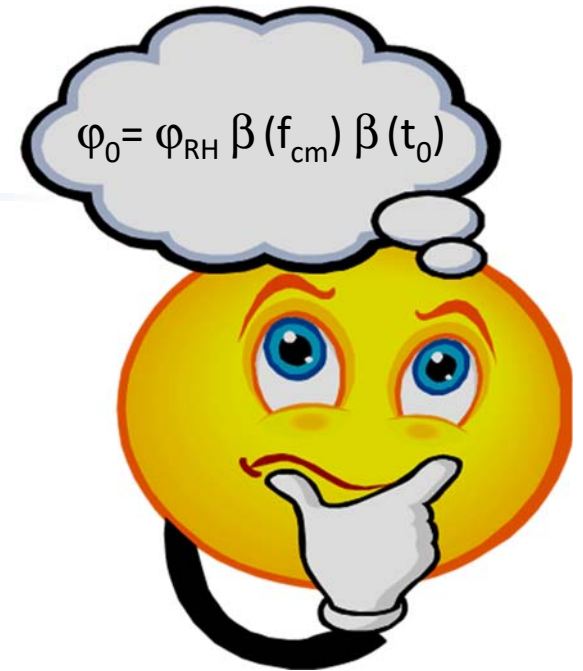
α_1 $(35/f_{cm})^{0.7}$

α_2 $(35/f_{cm})^{0.2}$



Deformazione differita

Calcolo della deformazione viscosa



Il coefficiente $\beta(f_{cm})$ può essere calcolato come :

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}}$$

dove f_{cm} è il valore medio della resistenza a compressione del calcestruzzo (MPa) a 28 giorni di stagionatura

Il coefficiente $\beta(t_0)$ può essere calcolato come :

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.20})} \quad \text{essendo :}$$

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0.5 \quad \text{dove}$$

$\alpha = -1$	per cemento tipo S
0	per cemento tipo N
$+1$	per cemento tipo R

Deformazione differita

Calcolo della deformazione viscosa

L'effetto delle temperature, nel campo 0-80°C, sulla maturazione del calcestruzzo può essere preso in conto modificando l'età del calcestruzzo secondo la seguente relazione:

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t e^{-\left\{ 4000 / [273 + T(\Delta t_i)] - 13.65 \right\}}$$

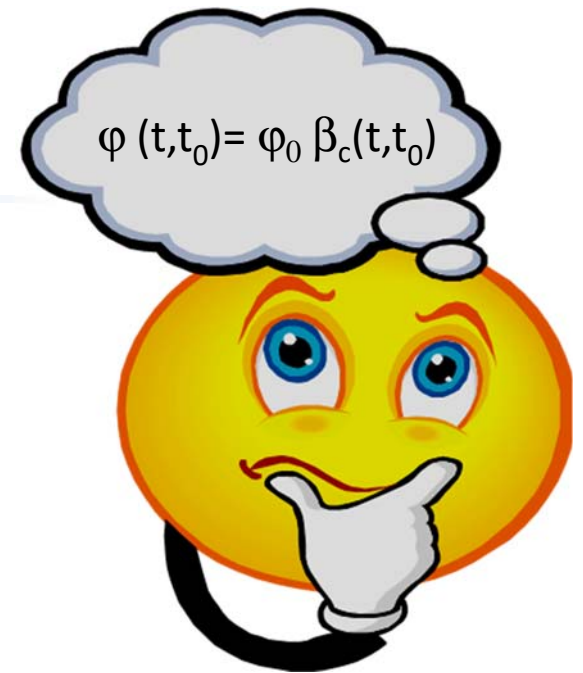
dove :

t_T età modificata del calcestruzzo in funzione della temperatura

$T(\Delta t_i)$ temperatura in °C nel periodo Δt_i

Deformazione differita

Calcolo della deformazione viscosa



Il coefficiente $\beta_c(t, t_0)$ può essere calcolato come :

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3}$$

dove :

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012 RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 \quad \text{se } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012 RH)^{18} \right] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad \text{se } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

essendo

$$\alpha_3 = (35/f_{cm})^{0.5}$$

L'acciaio

Acciaio non preteso

Vantaggi nell'utilizzo

L'acciaio tradizionale

è utilizzato nel conglomerato cementizio precompresso per :

- fornire un contributo alla resistenza a trazione e duttilità laddove le armature da precompressione non sono sufficienti a tale scopo
- controllare le fessure da flessione in condizioni di servizio laddove un qualche grado di fessurazione è atteso
- controllare le fessure indotte da impedimento al ritiro e da variazioni di temperatura laddove le armature da precompressione non siano sufficienti
- resistere alle azioni di compressione laddove il calcestruzzo non sia sufficiente
- fornire un vincolo alle barre in compressione e fornire confinamento
- ridurre le deformazioni differite nel tempo da viscosità e ritiro
- fornire resistenza alle forze da ancoraggio dei cavi post tesi
- fornire resistenza alle flange nelle direzioni longitudinali e trasversali

Acciaio per cemento armato

Tipi di prodotti

L'acciaio può essere lavorato per ottenere :

1.

barre



Acciaio per cemento armato

Tipi di prodotti



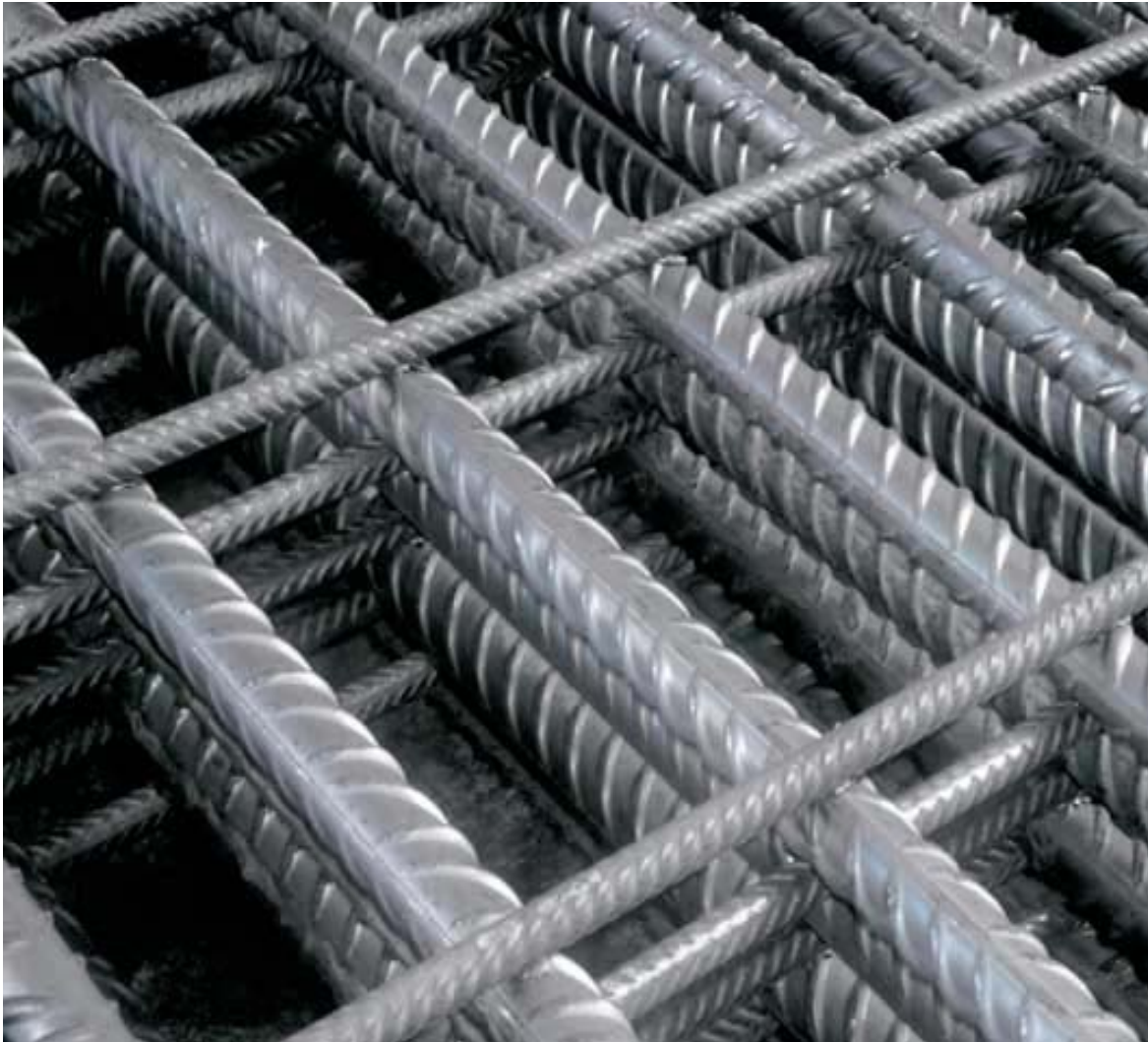
2.

rotoli

Tali elementi rientrano nella categoria degli acciai deformati a freddo in quanto impiegati previa raddrizzatura meccanica.

Acciaio per cemento armato

Tipi di prodotti



3.

reti e
tralicci

Gli acciai delle reti e dei tralicci devono essere saldabili.

I tralicci sono degli elementi reticolari composti con barre ed assemblati mediante saldature.

Acciaio per cemento armato

Aderenza e saldabilità

La normativa prevede due tipi di acciaio per cemento armato :

B450C

B450A

che devono essere

SALDABILI

E

AD ADERENZA MIGLIORATA

Acciaio per cemento armato

Acciaio B450

L'acciaio per cemento armato (B450A e B450C) è caratterizzato dai seguenti valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento e rottura da utilizzare nei calcoli:

$f_{y \text{ nom}}$	450 MPa
$f_{t \text{ nom}}$	540 MPa

Acciaio per cemento armato

Diametri utilizzabili

Le barre sono caratterizzate dal diametro ϕ della barra tonda liscia equipesante, calcolato nell'ipotesi che la densità dell'acciaio sia pari a 7.85 kg/dm³.

Diametri possibili	B450C	B450A
Acciaio in barre	$6 \leq \phi \leq 40 \text{ mm}$	$5 \leq \phi \leq 10 \text{ mm}$
Acciaio in rotoli	$\phi \leq 16 \text{ mm}$	$\phi \leq 10 \text{ mm}$

Acciaio per cemento armato

Acciaio B450A

Caratteristiche	Requisiti	Frattile (%)
Tensione caratteristica di snervamento f_{yk}	$\geq f_{y \text{ nom}}$	5.0
Tensione caratteristica di rottura f_{tk}	$\geq f_{t \text{ nom}}$	5.0
$(f_t/f_y)_k$	≥ 1.05	10.0
$(f_y/f_{y \text{ nom}})_k$	≤ 1.25	10.0
Allungamento $(A_{gt})_k$	$\geq 2.5 \%$	10.0
Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90° e successivo raddrizzamento senza cricche: $\phi < 10 \text{ mm}$	4ϕ	

Acciaio per cemento armato

Acciaio B450C

Caratteristiche	Requisiti	Frattile (%)
Tensione caratteristica di snervamento f_{yk}	$\geq f_{y \text{ nom}}$	5.0
Tensione caratteristica di rottura f_{tk}	$\geq f_{t \text{ nom}}$	5.0
$(f_t/f_y)_k$	$1.15 \leq (f_t/f_y)_k < 1.35$	10.0
$(f_y/f_{y \text{ nom}})_k$	≤ 1.25	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: $\phi < 12 \text{ mm}$ $12 \leq \phi \leq 16 \text{ mm}$ $16 < \phi \leq 25 \text{ mm}$ $25 < \phi \leq 40 \text{ mm}$	 4ϕ 5ϕ 8ϕ 10ϕ	

Acciaio per cemento armato

Controlli di accettazione in cantiere

I controlli di accettazione in cantiere sono obbligatori e devono essere effettuati, entro 30 giorni dalla data di consegna del materiale, a cura di un laboratorio ufficiale.

Essi devono essere eseguiti in ragione di 3 campioni ogni 30 t di acciaio impiegato della stessa classe proveniente dallo stesso stabilimento o Centro di trasformazione, anche se con forniture successive.

I valori di resistenza ed allungamento di ciascun campione, accertati comunque prima della messa in opera del prodotto, devono essere compresi fra i valori massimi e minimi riportati nella tabella seguente.

Acciaio per cemento armato

Controlli di accettazione in cantiere

Caratteristiche	Valore limite	Note
f_y minimo	425 N/mm ²	(450-25) N/mm ²
f_y massimo	572 N/mm ²	[450x(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	$1.13 \leq f_t/f_y \leq 1.47$	Per acciai B450C
Rottura/snervamento	$f_t/f_y \geq 1.03$	Per acciai B450A
Piegamento/raddrizzamento	Assenza di cricche	Per tutti

Acciaio per cemento armato

Controlli di accettazione in cantiere

- Qualora il risultato non sia conforme a quello dichiarato dal fabbricante, il direttore dei lavori dispone la ripetizione della prova su 6 ulteriori campioni dello stesso diametro.
- Ove anche da tale accertamento i limiti dichiarati non risultino rispettati, il controllo deve estendersi, a 25 campioni, applicando ai dati ottenuti la formula generale valida per controlli sistematici in stabilimento.
- L'ulteriore risultato negativo comporta l'inidoneità della partita e la trasmissione dei risultati al fabbricante. Inoltre, il direttore dei lavori deve comunicare il risultato anomalo al Servizio tecnico centrale.

Acciaio da c.a. precompresso

Prodotti

L'acciaio per armature da precompressione è prodotto in forma di :

- **Filo** : prodotto trafilato di sezione piena;
- **Treccia** : prodotti formati da 2 o 3 fili trafilati dello stesso diametro nominale avvolti ad elica intorno al loro comune asse longitudinale;
- **Trefolo** : prodotto formato da 6 o 18 fili trafilati avvolti ad elica intorno ad un filo trafilato rettilineo completamente ricoperto dai fili elicoidali.
- **Barra** : prodotto laminato di sezione piena in forma di elementi rettilinei;

Acciaio da c.a. precompresso

Generalità

Le armature da precompressione devono essere classificate secondo le seguenti proprietà:

- Resistenza
 - tensione allo 0.1% di deformazione residua ($f_{p0,1k}$)
 - rapporto tra resistenza e tensione allo 0.1% di deformazione residua ($f_{pk}/f_{p0,1k}$)
 - deformazione sotto carico massimo (ϵ_{uk})
- Classe (indicante il comportamento a rilassamento)
- Dimensione
- Caratteristiche superficiali

Acciaio da c.a. precompresso

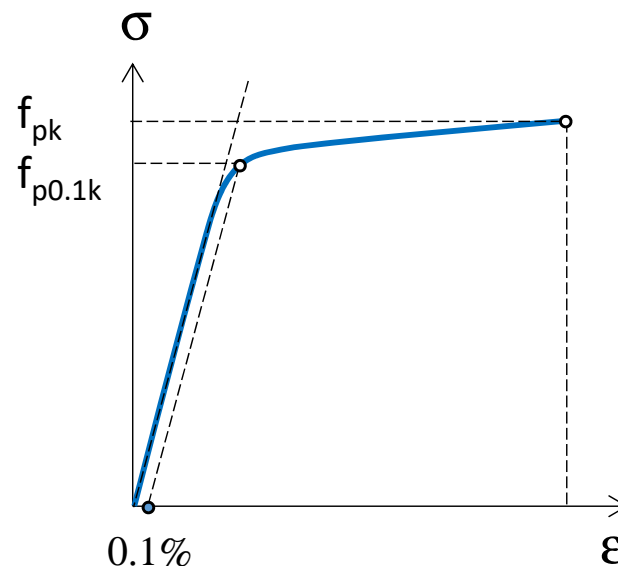
Resistenza

La tensione allo 0.1% di deformazione residua ($f_{p0.1k}$) e la resistenza a trazione (f_{pk})

sono definiti come i valori caratteristici

- del carico corrispondente allo 0.1% di deformazione residua e
- del massimo carico di trazione assiale,

divisi per l'area nominale della sezione trasversale



Acciaio da c.a. precompresso

Modulo elastico

Il valore di progetto del modulo di elasticità E_p può essere assunto uguale a

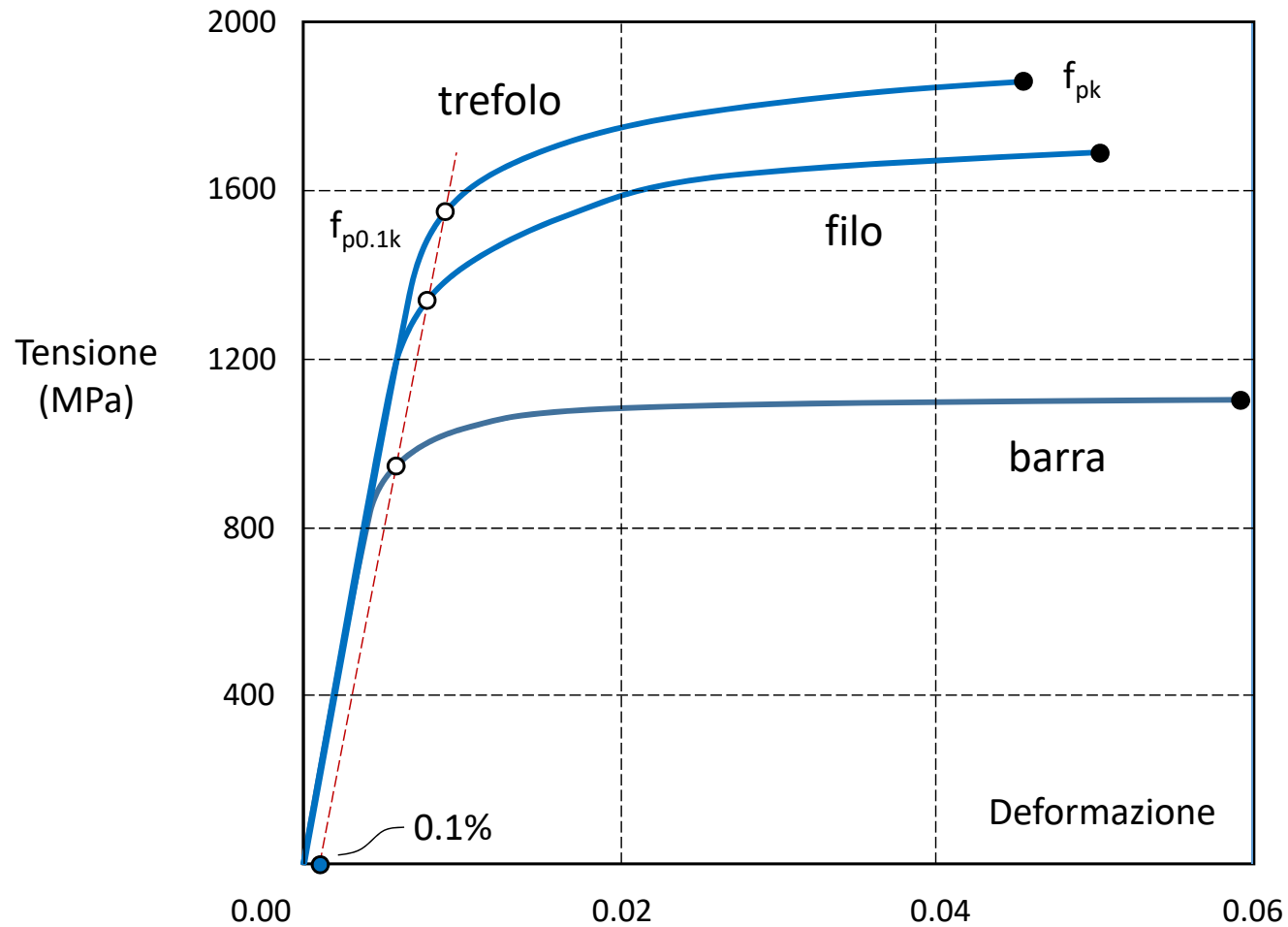
205 GPa	per fili e barre	(195 GPa e 210 GPa, a seconda del processo produttivo)
195 GPa	per trefoli	(185 GPa e 205 GPa , a seconda del processo produttivo).

Si raccomanda che i certificati
che accompagnano la partita riportino il valore pertinente.

Le proprietà meccaniche del trefolo sono lievemente diverse da quelle dei fili di cui è composto poiché i fili del trefolo tendono a rettilineizzarsi quando messi in trazione e dunque riducono il modulo elastico apparente del trefolo rispetto a quello dei semplici fili.

Acciaio da c.a. precompresso

Prova a trazione



Tratto da: R. I. Gilbert, N. C. Mickleborough, G. Ranzi. Design of prestressed concrete to Eurocodes. CRC Press, 2017

Acciaio da c.a. precompresso

Caratteristiche meccaniche tipo

Type	Steel name	f_{pk} (MPa)	$f_{p0.1k}$ (MPa)	$f_{pd} = f_{p0.1k}/\gamma_s$ (MPa)	E_p (GPa)	ε_{uk} (%)
Wires	Y1860C	1860	1600	1391	205	3.5
	Y1770C	1770	1520	1322	205	3.5
	Y1670C	1670	1440	1252	205	3.5
	Y1570C	1570	1300	1130	205	3.5
Strands	Y2060S	2060	1770	1540	195	3.5
	Y1960S	1960	1680	1461	195	3.5
	Y1860S	1860	1600	1391	195	3.5
	Y1760S	1760	1520	1322	195	3.5
Bars	Y1030	1030	830	722	205	4.0
	Y1100	1100	900	783	205	4.0
	Y1230	1230	1080	939	205	4.0

EN 10138-1. 2005. Prestressing steel. Part 1: General requirements 1, EN 10138-2: Prestressing steels – Wire, EN 10138-3: Strand, EN 10138-4: Bars. British Standards Institution, Londra, UK

Tratto da: R. I. Gilbert, N. C. Mickleborough, G. Ranzi. Design of prestressed concrete to Eurocodes. CRC Press, 2017

Acciaio da c.a. precompresso

Caratteristiche meccaniche

Tipo di acciaio	Barre	Fili	Trefoli e trecce	Trefoli compattati
Tensione caratteristica al carico massimo f_{ptk} (N/mm ²)	≥ 1000	≥ 1570	≥ 1860	≥ 1820
Tensione caratteristica allo 0.1 % di deformazione residua - scostamento dalla proporzionalità $f_{p(0,1)k}$ (N/mm ²)	na	≥1420	na	na
Tensione caratteristica all' 1 % di deformazione totale $f_{p(1)k}$ (N/mm ²)	na	na	≥ 1670	≥ 1620
Tensione caratteristiche di snervamento f_{pyk} (N/mm ²)	≥800	na	na	na
Allungamento totale percentuale a carico massimo A_{gt}	≥ 3.5%	≥ 3.5%	≥ 3.5%	≥ 3.5%

na = non applicabile

Nota: per il modulo di elasticità si farà riferimento al catalogo del fabbricante.

Tratto da : Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 – Tab. 11.3.VIII

Acciaio da c.a. precompresso

Fili, trecce, trefoli e barre

La marchiatura dei prodotti è generalmente costituita da sigillo o etichettatura sulle legature (§ 11.3.1.4). Le barre con risalti o nervature dovranno essere fornite con marchio apposto sulle singole barre.

Per la documentazione di accompagnamento delle forniture vale quanto indicato al § 11.3.1.5. Le forniture dovranno altresì essere accompagnate da un certificato di qualità e conformità (UNI EN 10204).

Acciaio da c.a. precompresso

Controlli in cantiere

Effettuato un prelievo di 3 saggi ogni 30 t della stessa categoria di acciaio proveniente dallo stesso stabilimento, anche se con forniture successive, si determinano, mediante prove eseguite presso un laboratorio ufficiale, i corrispondenti valori minimi di f_{pt} , f_{py} , $f_{p(1)}$, $f_{p(0,1)}$, A_{gt} e E_p .

I risultati delle prove sono considerati accettabili se:

- nessuno dei valori di tensione sopra indicati è inferiore al corrispondente valore caratteristico dichiarato dal fabbricante;
- tutti i valori di tensione al carico massimo non superano il valore caratteristico corrispondente, incrementato del 15%.
- tutti i valori dell'allungamento totale percentuale al carico massimo non sono inferiori al limite della Tab. 11.3.VIII;

Acciaio da c.a. precompresso

Controlli in cantiere

Nel caso che anche uno solo dei valori controllati non rispetti la corrispondente condizione, verranno eseguite prove supplementari su un campione costituito da almeno 10 saggi prelevati da altrettanti rotoli, bobine o fasci.

Se il numero dei rotoli, bobine o fasci è inferiore a 10, da alcuni fasci sono prelevati due saggi da due barre diverse, mentre da alcuni rotoli o bobine verranno prelevati due saggi, uno da ciascuna estremità.

La fornitura è considerata conforme se:

- la media dei risultati ottenuti per f_{pt} , f_{py} , $f_{p(0,1)}$, $f_{p(1)}$ sugli ulteriori saggi è almeno uguale al valore caratteristico garantito dal fabbricante e i singoli valori sono superiori al valore caratteristico garantito, diminuito del 1.5%.
- la media dei risultati ottenuti per f_{pt} sui 10 ulteriori saggi è al massimo uguale a 1.15 volte il valore caratteristico f_{ptk} garantito dal fabbricante e i singoli valori sono inferiori allo stesso limite, incrementato del 1.5%.
- la media dei risultati ottenuti per A_{gt} sui 10 ulteriori saggi è al minimo uguale al limite indicato nella Tab. 11.3.VIII e i singoli valori sono superiori allo stesso limite, diminuito del 5%.

Acciaio da c.a. precompresso

Controlli in cantiere

L'ulteriore risultato negativo comporta l'inidoneità della fornitura e la trasmissione dei risultati al fabbricante, che è tenuto a farli inserire tra i risultati dei controlli statistici della sua produzione. In tal caso, il Direttore tecnico deve comunicare il risultato anomalo sia al laboratorio incaricato del controllo che al Servizio Tecnico Centrale.

Acciaio da c.a. precompresso

Il rilassamento

Un fenomeno duale di quello della viscosità nel calcestruzzo è quello del rilassamento, che si manifesta nell'acciaio come diminuzione della tensione a deformazione costante. Questo fenomeno assume particolare rilevanza negli acciai da precompresso per i quali una diminuzione di tensione al loro interno produce una diminuzione del grado di precompressione nella struttura.

Acciaio da c.a. precompresso

Classi di rilassamento

Sono definite tre classi di rilassamento:

- **Classe 1** : fili o trefoli, rilassamento ordinario
(non è trattata nella EN 10138)
- **Classe 2** : fili o trefoli, basso rilassamento;
- **Classe 3** : barre laminate e lavorate a caldo.

Acciaio da c.a. precompresso

Classi di rilassamento

I calcoli di progetto per le perdite da rilassamento dell'acciaio da precompressione devono essere basati sul valore $\rho_{1\,000}$ (perdita per rilassamento ad un tempo di 1000 h dopo la messa in tensione a $0.7 f_{pd}$ ad una temperatura media di 20°).

Nota: Il valore di $\rho_{1\,000}$ è espresso come una percentuale della tensione iniziale ed è ottenuto per una tensione iniziale uguale a $0.7 f_p$, dove f_p è la resistenza a trazione reale dei campioni di acciaio da precompressione. Per i calcoli di progetto si utilizza la resistenza caratteristica a trazione (f_{pk}) e di questo si è tenuto conto nelle espressioni seguenti.

I valori di $\rho_{1\,000}$ possono essere assunti pari a :

- 8% (Classe 1)
- 2.5% (Classe 2)
- 4% (Classe 3)
- valori presi dal certificato.

Acciaio da c.a. precompresso

Classi di rilassamento

La perdita per rilassamento si può ottenere dai certificati di prova del produttore o può essere definita come il rapporto, in percentuale, della variazione della tensione di precompressione sulla tensione di precompressione iniziale.

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5.39 \rho_{1000} 6^{6.7\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5} \quad \text{Classe 1}$$

dove :

$\Delta\sigma_{pr}$ è il valore assoluto delle perdite per rilassamento;

σ_{pi} per le armature post-tese è il valore assoluto della tensione iniziale; per le armature pre-tese è la massima tensione di trazione applicata al cavo meno le perdite immediate che si verificano durante il procedimento di messa in tensione;

t è il tempo dopo la messa in tensione (in ore);

$\mu = \sigma_{pi}/f_{pk}$, dove f_{pk} è il valore caratteristico della resistenza a trazione dell'acciaio;

Acciaio da c.a. precompresso

Classi di rilassamento

La perdita per rilassamento si può ottenere dai certificati di prova del produttore o può essere definita come il rapporto, in percentuale, della variazione della tensione di precompressione sulla tensione di precompressione iniziale.

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5.39 \rho_{1000} e^{6.7\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5} \quad \text{Classe 1}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0.66 \rho_{1000} e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5} \quad \text{Classe 2}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1.98 \rho_{1000} e^{8.0\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} 10^{-5} \quad \text{Classe 3}$$

Acciaio da c.a. precompresso

Classi di rilassamento

Se la maturazione del calcestruzzo ha luogo a temperature molto elevate (maturazione a vapore) il rilassamento dell'acciaio è più veloce .

In questo caso, al normale tempo t al quale si vuole misurare il rilassamento occorre aggiungere il seguente tempo equivalente :

$$t_{eq} = \frac{1.14^{(T_{max} - 20)}}{T_{max} - 20} \sum_{t_i=1}^n (T_{\Delta t_i} - 20) \Delta t_i$$

dove :

$T_{\Delta t_i}$ è la temperatura in °C durante il periodo di tempo ΔT_i

T_{max} è la temperatura massima in °C durante la maturazione a vapore

Acciaio da c.a. precompresso

Effetto del rilassamento

In una membratura in c.a.p. la tensione nel cavo si riduce gradualmente nel tempo per effetto della viscosità e del ritiro del calcestruzzo. Questa graduale riduzione dà luogo ad una graduale riduzione dell'effetto di rilassamento. Per determinare le perdite nella struttura in conglomerato, le perdite finali da rilassamento dovrebbero essere moltiplicate per un coefficiente riduttivo λ_r che tenga conto dell'accorciamento del calcestruzzo in virtù della viscosità e del ritiro. Il fattore λ_r dipende dalla viscosità e dal ritiro, dall'iniziale tensione di pretensione.

Un coefficiente λ_r pari a 0.8 dovrebbe essere sufficiente a considerare la mutua interazione tra rilassamento e viscosità e ritiro.

Acciaio da c.a. precompresso

Fili, trecce, trefoli e barre

- I fili sono individuati mediante :

- il diametro nominale

- il diametro nominale equivalente riferito alla sezione circolare equipesante.

La superficie dei fili può essere liscia o improntata.

Nota: non è consentito l'impiego di fili lisci in strutture precomprese ad armature pre-tese

- I fili delle trecce e quelli dello strato esterno dei trefoli possono essere lisci o improntati.

- Le barre sono individuate mediante :

- il diametro nominale nel caso di barre lisce

- il diametro nominale equivalente nel caso di barre non lisce.

e possono essere :

- lisce , a filettatura continua o parziale, con risalti o nervature.

Acciaio da c.a. precompresso

Fili, trecce, trefoli e barre

I trefoli e le trecce possono essere prodotti e forniti protetti con :

- guaina
- cera, oltre alla guaina
- grasso, oltre alla guaina

Le caratteristiche della guaina, della cera e del grasso sono specificate nella norma UNI 7676:2009.

Tutti i prodotti possono essere forniti con protezione superficiale costituita da uno strato di zinco



Acciaio da c.a. precompresso

Fili, trecce, trefoli e barre

I fili devono essere esenti da saldature.

Sono ammesse le saldature di fili destinati alla produzione di trecce e di trefoli se effettuate prima della trafilatura.

All'atto della posa in opera gli acciai devono presentarsi privi di ossidazione, corrosione, difetti superficiali visibili, pieghe. È tollerata un'ossidazione che scompaia totalmente mediante sfregamento con un panno asciutto.

FINE