

Lezione

PONTI E GRANDI STRUTTURE

Prof. Pier Paolo Rossi

Università degli Studi di Catania

RITIRO DEL CALCESTRUZZO

Ritiro del calcestruzzo

Generalità

Il termine ritiro indica la contrazione che si verifica nel calcestruzzo per effetto della migrazione o evaporazione dell'acqua.

Esso si può distinguere in:

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

Ritiro del calcestruzzo

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 tale ritiro bisogna garantire una idonea stagionatura protetta del calcestruzzo (ad esempio tramite membrane antievaporazione o nebulizzazione di acqua).

Ritiro del calcestruzzo

Ritiro da essiccamento

Il termine ritiro igrometrico o da essiccamento indica la contrazione causata dall'evaporazione dell'acqua contenuta dal 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, quali la temperatura esterna, l'umidità relativa (UR < 95%) e dal rapporto e velocità dell'aria, nonché dal rapporto acqua/cemento.
- può essere contrastato riducendo il rapporto acqua/cemento, aumentare il rapporto aggregato/cemento e, soprattutto, bagnare costantemente l'opera specialmente nei primi giorni di stagionatura.

Ritiro del calcestruzzo

Ritiro autogeno

Il termine ritiro autogeno indica la contrazione del calcestruzzo in assenza di variazioni igrometriche e termiche ed è causato dall'idratazione del cemento.

Il ritiro autogeno :

- dipende principalmente dal tenore 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.

Ritiro del calcestruzzo

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

Ritiro del calcestruzzo

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 h_0

Il parametro h_0 è, invece, calcolato mediante la relazione :

$$h_0 = 2A_c / u$$

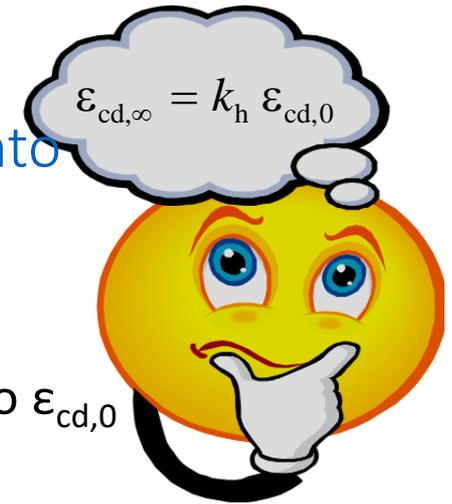
dove :

A_c area della sezione trasversale del calcestruzzo

u perimetro della sezione trasversale del calcestruzzo esposta all'essiccamento

Ritiro del calcestruzzo

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento



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

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

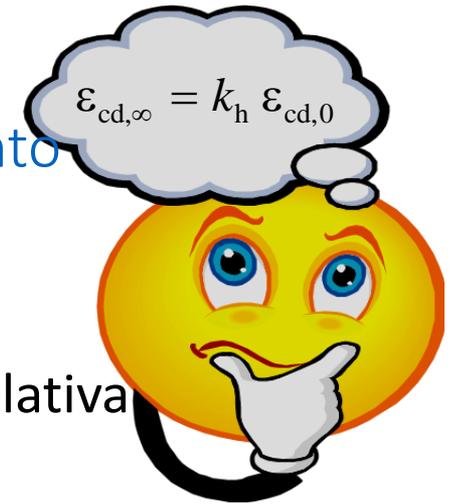
essendo :

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

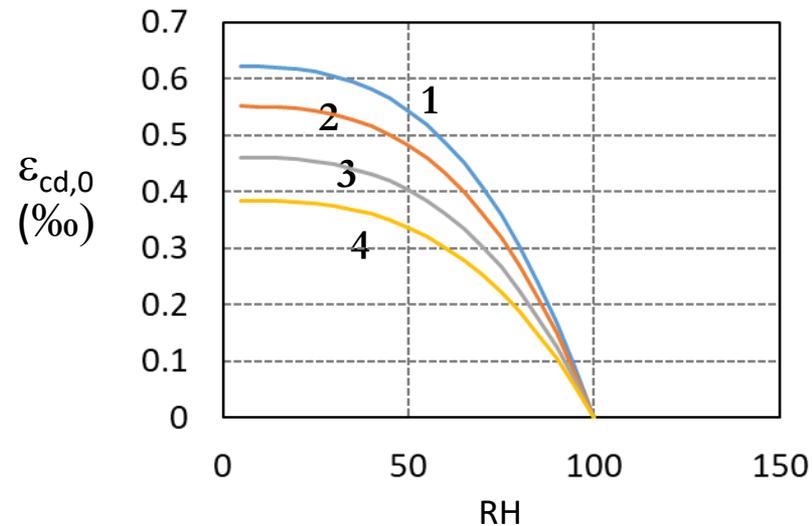
f_{cm}	resistenza media del calcestr. (MPa)	RH	umidità relative (%)
f_{cm0}	10 MPa	RH_0	100%
α_{ds1}	=3 per cemento classe S =4 per cemento classe N =6 per cemento classe R	α_{ds2}	=0.13 per cemento classe S =0.12 per cemento classe N =0.11 per cemento classe R

Ritiro del calcestruzzo

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento



Esempi di variazione di $\epsilon_{cd,0}$ con l'umidità relativa



Caso1 (f_{cm} 28 MPa - cemento classe N)

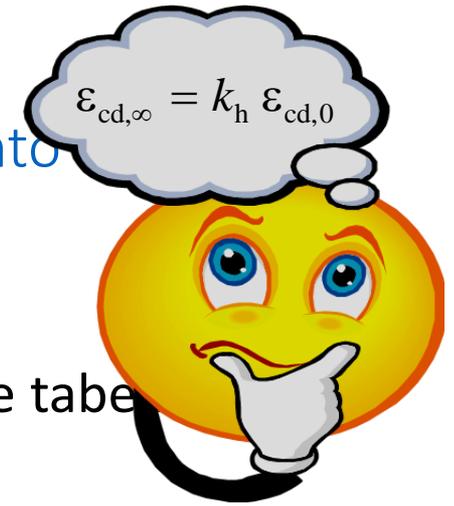
Caso2 (f_{cm} 38 MPa - cemento classe N)

Caso3 (f_{cm} 53 MPa - cemento classe N)

Caso4 (f_{cm} 68 MPa - cemento classe N)

Ritiro del calcestruzzo

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento



Il valore del parametro k_h si ricava dalla seguente tabella

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

Ritiro del calcestruzzo

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento

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

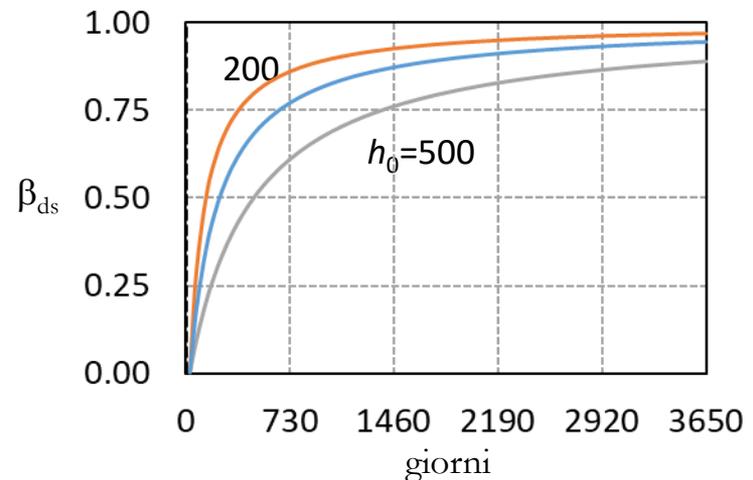
$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) k_h \varepsilon_{cd,0}$$

essendo :

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

dove :

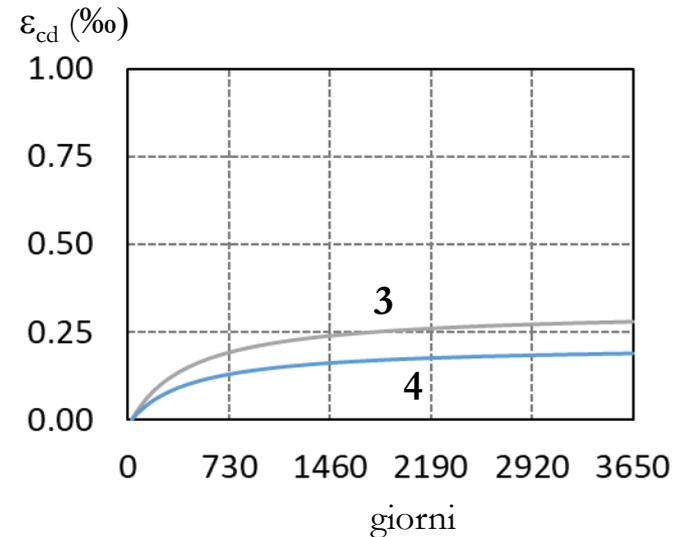
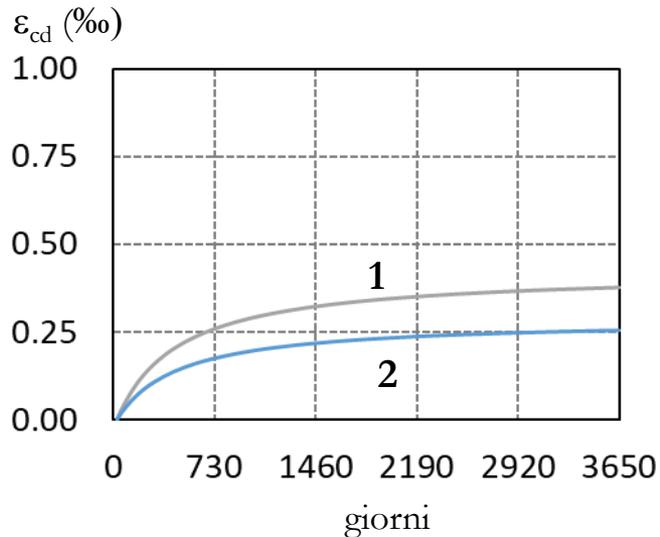
- t tempo del calcestruzzo al momento considerato (giorni)
- t_s tempo del calcestruzzo all'inizio del ritiro da essiccamento (giorni)



Ritiro del calcestruzzo

Calcolo delle deformazioni da ritiro da essiccamento

Esempi di variazione di $\varepsilon_{cd}(t)$ con il tempo



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

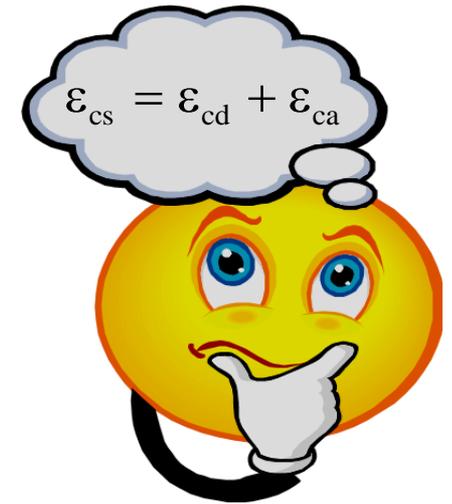
Caso2 (RH=70%, $h_0=500$, f_{cm} 28 MPa - cemento N)

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

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

Ritiro del calcestruzzo

Calcolo delle deformazioni da ritiro autogeno



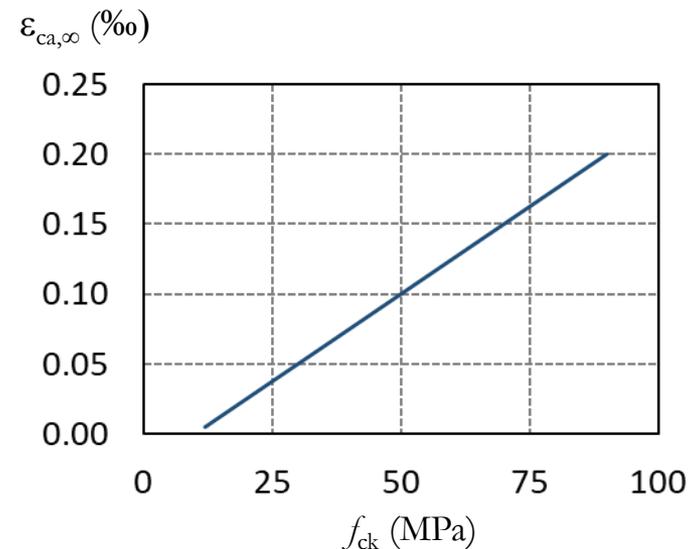
Lo sviluppo nel tempo della deformazione da ritiro autogeno $\epsilon_{ca}(t)$ è regolato dalla relazione :

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

dove :

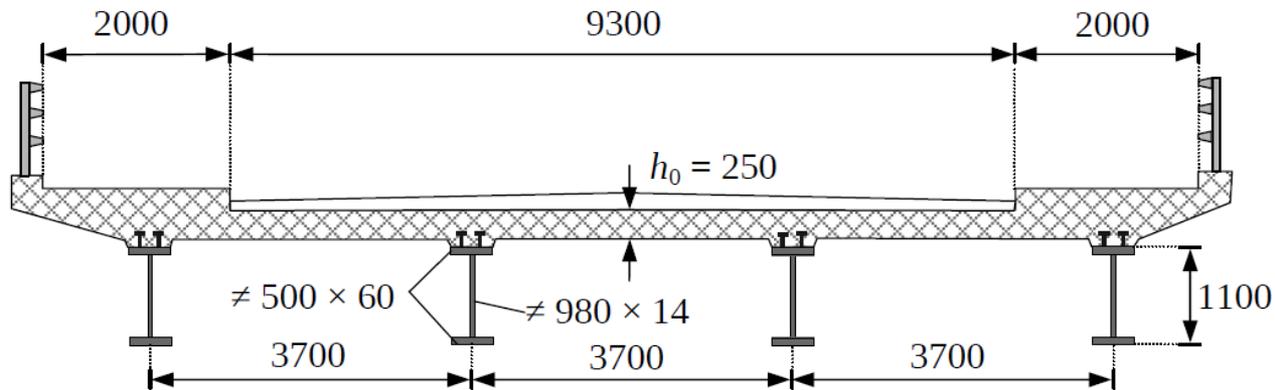
$$\epsilon_{ca,\infty} = 2.5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

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



Ritiro del calcestruzzo

Esempio



Classe del calcestruzzo C40/50

$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ $E_{cm} = 35000 \text{ MPa}$

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 $\varepsilon_{ca,\infty}$ vale :

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

Inoltre, per calcolare la deformazione da ritiro da essiccamento :

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

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

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

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

$$\varepsilon_{cs} = 7.5 \cdot 10^{-5} + 28.2 \cdot 10^{-5} = 35.7 \cdot 10^{-5}$$

VISCOSITA' DEL CALCESTRUZZO

Viscosità del calcestruzzo

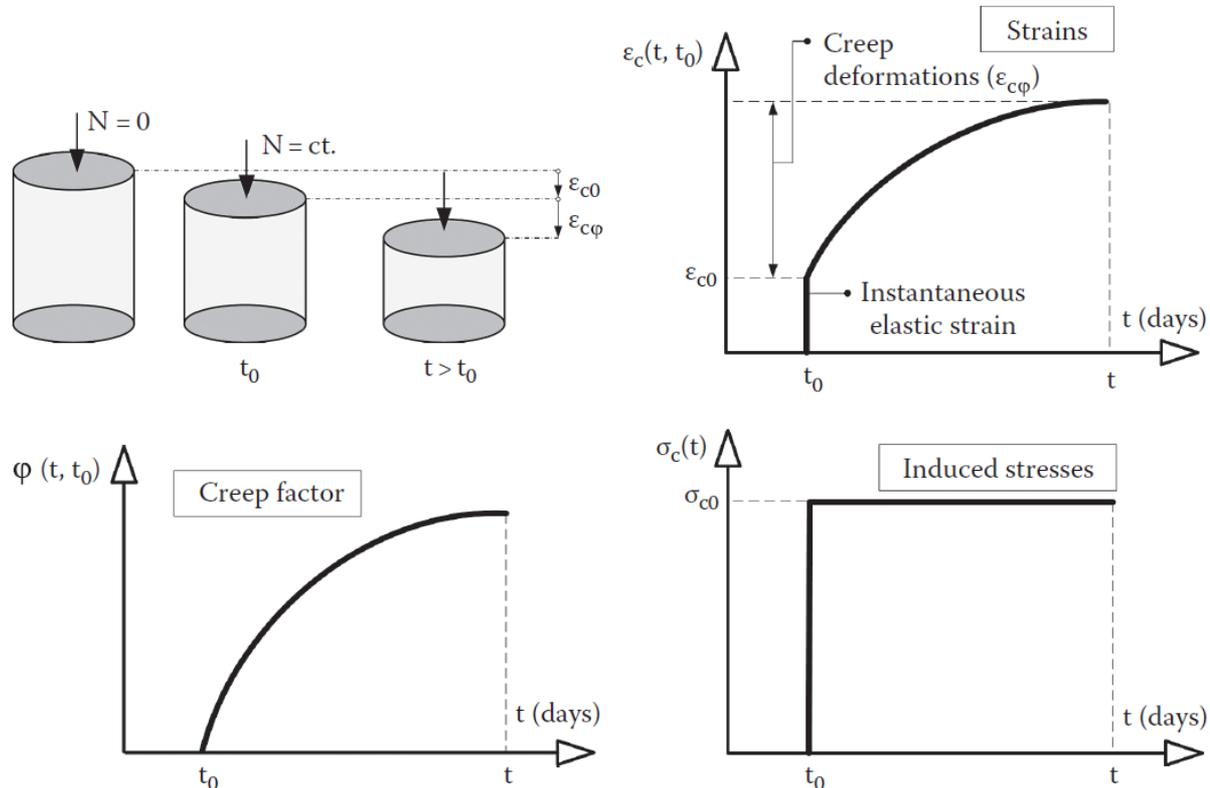
Generalità

La viscosità (o la deformazione viscosa o anche creep in inglese) 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 .

Subito dopo l'applicazione di una generica sollecitazione s al tempo t_0 , il materiale si deforma immediatamente, e se la deformazione non è molto grande, essa si trova in campo elastico. Se la sollecitazione s viene conservata per un tempo t sufficientemente lungo, oltre alla deformazione elastica immediata, il materiale subisce un'ulteriore deformazione che aumenta con il tempo tendendo ad un valore limite asintotico. Tale ultimo contributo alla deformazione prende il nome di deformazione viscosa.

Viscosità del calcestruzzo

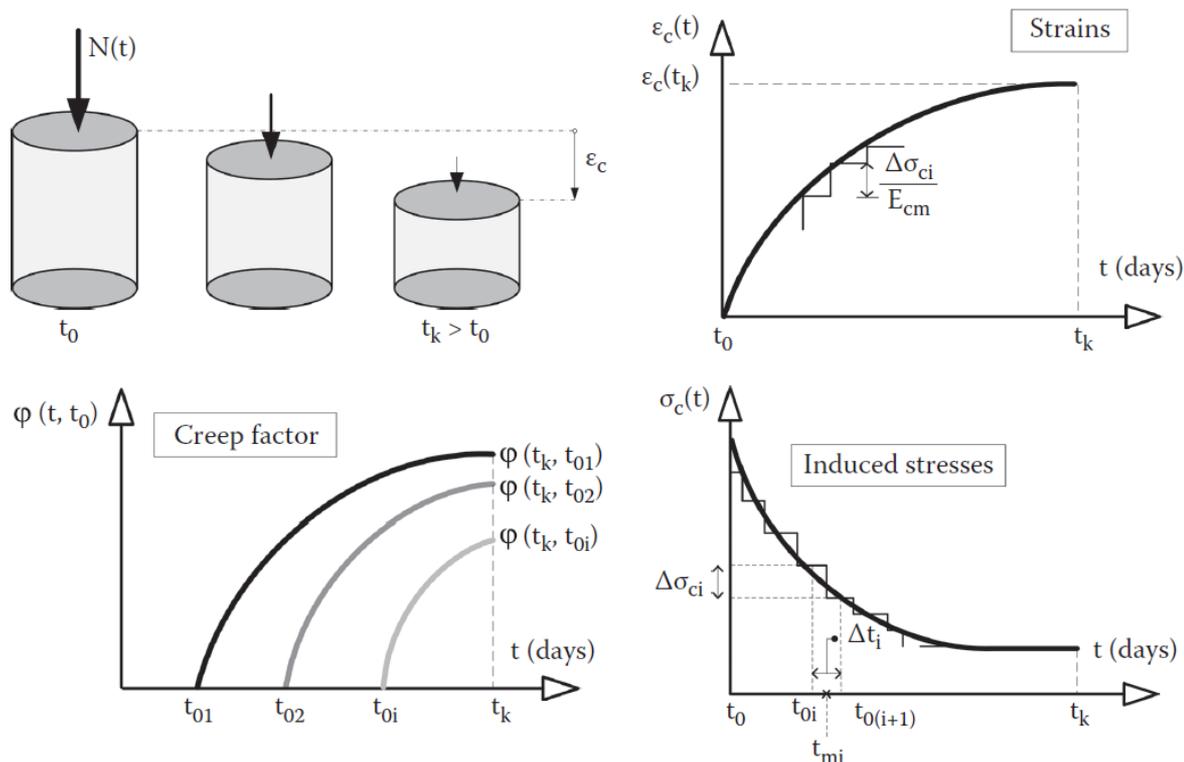
Effetto della viscosità – carico permanente



$$\epsilon_{c0} + \epsilon_{c\phi} = \epsilon_{c0} \left[1 + \phi_t(t, t_0) \right]$$

Viscosità del calcestruzzo

Effetto della viscosità – carico temporaneamente permanente



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

Viscosità del calcestruzzo

Effetto della viscosità

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

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

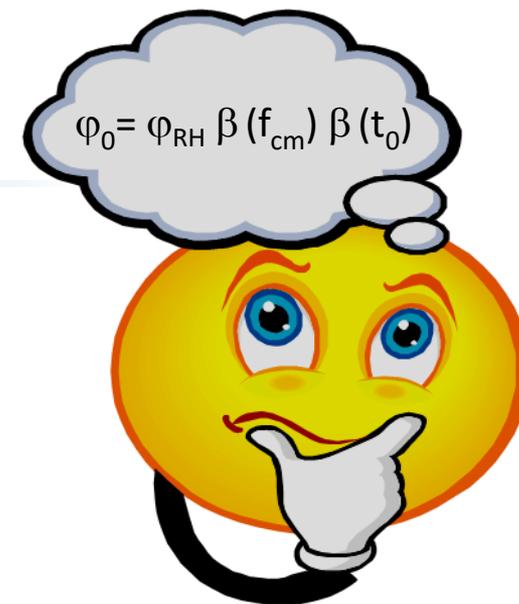
dove :

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

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

Viscosità del calcestruzzo

Effetto della viscosità



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

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

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

dove:

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

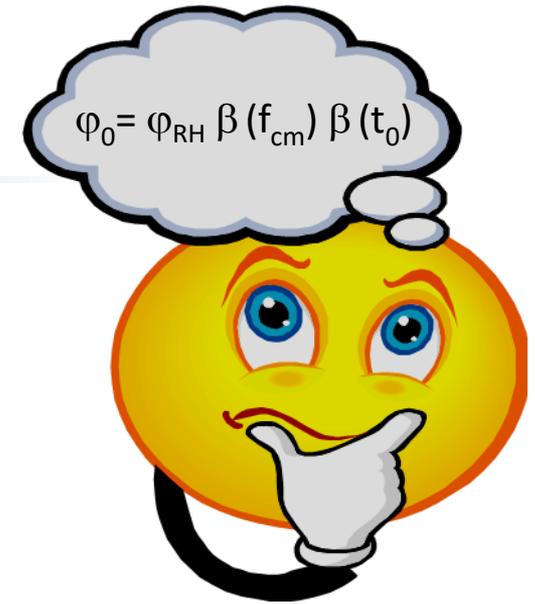
RH umidità relativa (%)

α_1 $(35/f_{cm})^{0.7}$

α_2 $(35/f_{cm})^{0.2}$

Viscosità del calcestruzzo

Effetto della viscosità



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 :

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

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0.5 \quad \text{dove} \quad \alpha = \begin{array}{ll} -1 & \text{per cemento tipo S} \\ 0 & \text{per cemento tipo N} \\ +1 & \text{per cemento tipo R} \end{array}$$

Viscosità del calcestruzzo

Effetto della viscosità

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

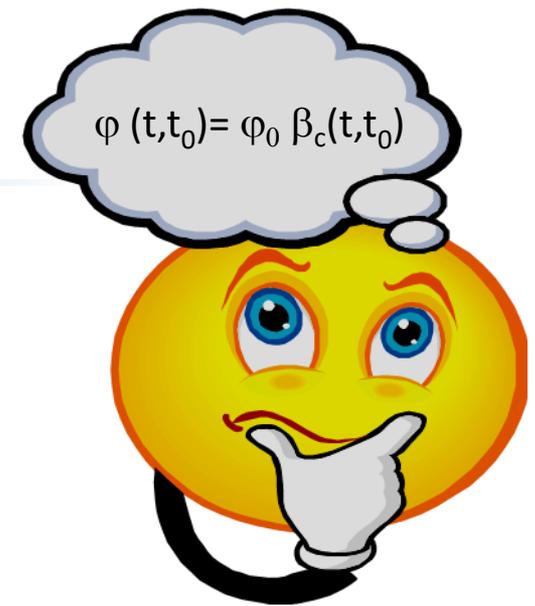
t_T età modificata del calcestruzzo in funzione della temperatura

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

Δt_i numero di giorni in cui prevale la temperatura T

Viscosità del calcestruzzo

Effetto della viscosità



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 :

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

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

essendo

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.5}$$

ACCIAIO

Sezioni composte acciaio-calcestruzzo

Resistenze acciaio in funzione dello spessore

EN 10025

Steel grade	Yield strength f_y in MPa					Tensile strength f_u in MPa	
	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 150$	$3 \leq t \leq 100$	$100 < t \leq 150$
S235JR, J0, J2	225	215	215	215	195	360–510	350–500
S275JR, J0, J2	265	255	245	235	225	410–560	400–540
S355JR, J0, J2, K2	345	335	325	315	295	470–630	450–600
	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 150$	$t \leq 100$	$100 < t \leq 200$
S275N, NL	265	255	245	235	225	370–510	350–480
S355N, NL	345	335	325	315	295	470–630	450–600
S420N, NL	400	390	370	360	340	520–680	500–650
S460N, NL	440	430	410	400	380	550–720	530–700
	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$63 < t \leq 80$	$80 < t \leq 100$	$100 < t \leq 120$	$63 < t \leq 80$	$t \leq 120$
S275M, ML	265	255	245	245	240	350–510	350–510
S355M, ML	345	335	325	325	320	440–600	430–590
S420M, ML	400	390	380	370	365	470–640	460–630
S460M, ML	440	430	400	390	385	500–670	490–660

Source: EN 10025, Hot rolled products of structural steels, 2004.

Attenzione:

nell'Eurocodice 3 (Tab. 3.1) e nelle NTC è prevista una semplificazione della tabella di cui sopra

Principali riferimenti

- ❑ Norme Tecniche per le Costruzioni. D.M. 14 gennaio 2008 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30
- ❑ Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni. Circolare 2 febbraio 2009 pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009 - Suppl. Ordinario n. 27
- ❑ R.P. Johnson. Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns, and frames for buildings. Blackwell Publishing, 2004 (third edition). ISBN 1-4051-0035-4
- ❑ I. Vayas, A. Iliopoulos. Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes. CRC Press, 2013. ISBN 9781466557444

FINE