

Tab. 1 - modulo elastico e resistenza a trazione del calcestruzzo

classe	C20/25	C25/30	C28/35	C32/40
f_{ck}	20 MPa	25 MPa	28 MPa	32 MPa
E_{cm}	30000 MPa	31500 MPa	32300 MPa	33300 MPa
f_{ctm}	2.21 MPa	2.57 MPa	2.77 MPa	3.02 MPa
f_{ctk}	1.55 MPa	1.80 MPa	1.94 MPa	2.12 MPa
f_{efk}	1.86 MPa	2.16 MPa	2.32 MPa	2.54 MPa

Esempio 2. Determinare i valori ammissibili delle tensioni normali e tangenziali per calcestruzzi di classe C20/25, C25/30, C28/35, C32/40.

Per un calcestruzzo di classe C25/30, con $R_{ck} = 30$ MPa si ha

$$\bar{\sigma}_c = 6 + \frac{30 - 15}{4} = 9.75 \text{ MPa}$$

$$\bar{\tau}_{c0} = 0.4 + \frac{30 - 15}{75} = 0.60 \text{ MPa} \quad \bar{\tau}_{c1} = 1.4 + \frac{30 - 15}{35} = 1.83 \text{ MPa}$$

$$1.1 \bar{\tau}_{c1} = 1.1 \times 1.83 = 2.01 \text{ MPa}$$

In maniera analoga si procede per le altre classi di calcestruzzo. I valori ottenuti sono riepilogati nella tabella 2.

Tab. 2 - tensioni ammissibili per il calcestruzzo

classe	C20/25	C25/30	C28/35	C32/40
R_{ck}	25 MPa	30 MPa	35 MPa	40 MPa
$\bar{\sigma}_c$	8.50 MPa	9.75 MPa	11.00 MPa	12.25 MPa
$\bar{\tau}_{c0}$	0.53 MPa	0.60 MPa	0.67 MPa	0.73 MPa
$\bar{\tau}_{c1}$	1.69 MPa	1.83 MPa	1.97 MPa	2.11 MPa
$1.1 \bar{\tau}_{c1}$	1.85 MPa	2.01 MPa	2.17 MPa	2.33 MPa

Esempio 3. Determinare i valori di calcolo della resistenza a trazione e a compressione per opere in cemento armato ordinario con calcestruzzi di classe C20/25, C25/30, C28/35, C32/40.

Per un calcestruzzo di classe C25/30, con $f_{ck} = 25$ MPa si ha

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0.85 \frac{25}{1.5} = 14.17 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} = \frac{1.80}{1.5} = 1.20 \text{ MPa}$$

$$f_{cfd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{2.16}{1.5} = 1.44 \text{ MPa}$$

In maniera analoga si procede per le altre classi di calcestruzzo. I valori ottenuti sono riepilogati nella tabella 3.

Tab. 3 - valori di calcolo delle tensioni per cemento armato ordinario

classe	C20/25	C25/30	C28/35	C32/40
f_{ck}	20 MPa	25 MPa	28 MPa	32 MPa
f_{cd}	11.33 MPa	14.17 MPa	15.87 MPa	18.13 MPa
f_{ctd}	1.03 MPa	1.20 MPa	1.29 MPa	1.41 MPa
f_{cfd}	1.24 MPa	1.44 MPa	1.55 MPa	1.69 MPa

Esempio 4. Determinare i valori di calcolo della resistenza a trazione e a compressione per opere in cemento armato precompresso, soggetto a controllo continuativo del calcestruzzo, con calcestruzzi di classe C28/35, C32/40, C35/45, C40/50.

Si opera come nell'esempio precedente, ma utilizzando il valore $\gamma_c = 1.4$. I valori ottenuti sono riepilogati nella tabella 4.

Tab. 4 - valori di calcolo delle tensioni per cemento armato precompresso

classe	C28/35	C32/40	C35/45	C40/50
f_{ck}	28 MPa	32 MPa	35 MPa	40 MPa
f_{cd}	17.00 MPa	19.43 MPa	21.25 MPa	24.29 MPa
f_{ctd}	1.38 MPa	1.51 MPa	1.61 MPa	1.75 MPa
f_{cfd}	1.66 MPa	1.81 MPa	1.93 MPa	2.11 MPa

4. Comportamento del calcestruzzo nel tempo

4.1. Stagionatura e resistenza

La resistenza varia con la stagionatura del calcestruzzo. In genere si fa riferimento ai valori f_{cm} e f_{ck} misurati dopo 28 giorni dal getto. Secondo le indicazioni dell'Eurocodice 2 (punto 3.1.2) il valore $f_{cm,t}$ a un generico tempo t (in giorni) può essere espresso da

$$f_{cm,t} = e^{s(1-\sqrt{28/t})} f_{cm}$$

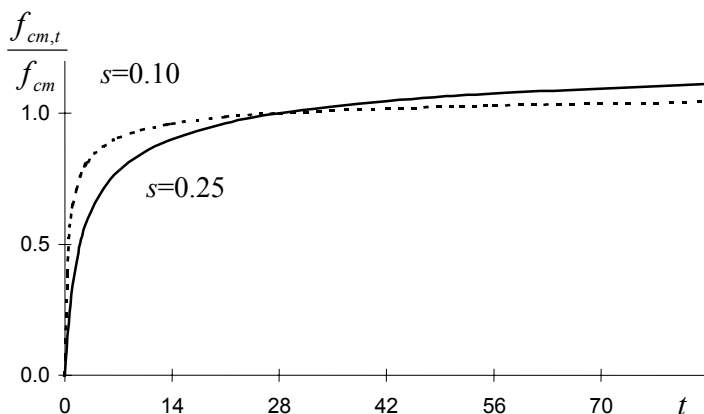


Fig. 7 - andamento della resistenza a compressione nel tempo

Il valore di s dipende dal tipo di cemento e da come avviene la maturazione; per cementi normali (classe N) e a presa rapida (classe R) si può assumere rispettivamente $s=0.25$ e $s=0.20$; in caso di maturazione forzata (spesso usata per elementi prefabbricati) viene consigliato il valore $s=0.10$. Il conseguente andamento della resistenza nel tempo è mostrato nella figura 7. La resistenza finale (a tempo infinito) vale nei due casi rispettivamente $1.28 f_{cm}$ e $1.11 f_{cm}$. Il valore caratteristico viene ottenuto sottraendo 8.0 MPa al valore medio, qualunque sia t .

4.2. Ritiro

Per essere lavorabile, il calcestruzzo deve contenere una quantità d'acqua maggiore di quella strettamente necessaria per l'idratazione del cemento. Quando il calcestruzzo, durante la stagionatura, è esposto all'aria una buona parte di quest'acqua evapora e ciò comporta una riduzione del suo volume. Questo fenomeno è detto *ritiro* (in inglese *shrinkage*). Se invece il calcestruzzo è immerso in acqua esso assorbe ulteriore acqua ed aumenta di volume.

Il fenomeno del ritiro è particolarmente rilevante nelle prime settimane di stagionatura, ma continua in misura via via minore per parecchi mesi. Esso è sicuramente dannoso per le strutture, in quanto può provocare uno stato tensionale di trazione anche elevato, perché l'accorciamento è in genere impedito dall'iperstaticità dello schema. Piccole lesioni da ritiro sono inevitabili, ma talvolta le dimensioni delle fessure

possono essere rilevanti e indurre un prematuro degrado delle strutture. È quindi indispensabile, più ancora che tenerne conto effettuando specifici calcoli, cercare di limitarne gli effetti negativi con opportuni provvedimenti:

- evitando un eccessivo contenuto di acqua nell'impasto;
- evitando getti di estensione molto elevata, e quindi dividendo le strutture che hanno una estensione planimetrica superiore ai 30-40 metri in blocchi indipendenti, mediante i cosiddetti “giunti termici”;
- disponendo - fuori calcolo - in tutti gli elementi armature idonee ad assorbire le caratteristiche di sollecitazione provocate dal ritiro (principalmente trazione in travi e solai, flessione nei pilastri).

Con tali accorgimenti una specifica valutazione delle deformazioni da ritiro diventa non essenziale per le strutture in cemento armato ordinario, mentre deve sempre essere effettuata nel caso di elementi in cemento armato precompresso.

L'accorciamento unitario dovuto al ritiro può andare da 0.20×10^{-3} a 0.40×10^{-3} , ed anche oltre. Poiché il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo è circa 1×10^{-5} , il ritiro equivale quindi ad una variazione termica negativa di 20-40°C.

Oltre che dalla quantità d'acqua presente nell'impasto, l'entità del ritiro dipende dall'umidità dell'ambiente in cui avviene la stagionatura e dall'estensione della superficie esposta all'aria. Indicazioni quantitative sono fornite dal punto 11.2.10.6 delle NTC 08; indicazioni perfettamente coerenti ma più dettagliate possono essere trovate nel punto 3.1.4 e nell'appendice B dell'Eurocodice 2.

Secondo tali indicazioni, l'accorciamento finale ε_{cs} è somma di un'aliquota ε_{ca} , detta di ritiro autogeno, che si sviluppa durante l'indurimento del calcestruzzo, ed un'aliquota ε_{cd} dovuta all'essiccamento, che si sviluppa molto lentamente nel tempo. La prima, meno rilevante, è data da

$$\varepsilon_{ca} = 2.5 (f_{ck} - 10) 10^{-6}$$

mentre la seconda vale

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

con k_h funzione del parametro h_0 , dimensione convenzionale (in mm) che tiene conto del rapporto tra area A_c di calcestruzzo e perimetro u della superficie di calcestruzzo esposta all'aria

$$h_0 = \frac{2 A_c}{u}$$

mentre ε_{c0} è funzione della resistenza del calcestruzzo e dell'umidità relativa dell'ambiente. Le NTC 08 forniscono i valori riportati nelle tabelle 5 e 6. Per valori non compresi tra quelli indicati si deve effettuare una interpolazione. Si tenga presente che in zone temperate si può assumere, orientativamente, una umidità relativa dell'80% per ambienti esterni e del 50% in ambienti interni.

Tab. 5 - valori di ε_{c0} (da moltiplicare per 10^{-3})

f_{ck}	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. 6 - valori di k_h

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

L'entità dell'aliquota dovuta all'essiccamento ad un tempo t , in giorni, è espressa da

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

con

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

essendo t_s l'età del calcestruzzo, in giorni, a partire dalla quale si considera l'effetto del ritiro da essiccamento (normalmente il termine della maturazione).

Indicazioni più dettagliate sono contenute nell'appendice B dell'Eurocodice 2. Il valore di base dell'accorciamento finale per ritiro da essiccamento può essere ottenuto con l'espressione

$$\varepsilon_{c0} = 0.85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{10}} \right] 10^{-6} \beta_{RH}$$

nella quale

α_{ds1} e α_{ds2} dipendono dal tipo di cemento ($\alpha_{ds1} = 4$ e $\alpha_{ds2} = 0.12$ per cemento di classe N)

β_{RH} tiene conto dell'umidità relativa ambientale RH (in %) e vale

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

Esempio 5. Per una trave di sezione 30×60 , emergente da un solaio di spessore 24 cm, realizzata in calcestruzzo di classe C25/30 e stagionata in ambiente con umidità relativa 60%, si valuti l'accorciamento unitario da ritiro da 28 giorni a tempo infinito, secondo le indicazioni delle NTC 08.

L'area della sezione della trave è

$$A_c = 30 \times 60 = 1800 \text{ cm}^2$$

Il perimetro esposto all'aria deve essere valutato escludendo il tratto di trave a contatto col solaio

$$u = (60 - 24) \times 2 + 30 \times 2 = 132 \text{ cm}$$

Il parametro h_0 vale quindi

$$h_0 = \frac{2 \times 1800}{132} \times 10 = 272.7 \text{ mm}$$

L'accorciamento da ritiro autogeno vale

$$\varepsilon_{ca} = 2.5 \times (25 - 10) \times 10^{-6} = 3.75 \times 10^{-5}$$

Il coefficiente ε_{c0} , interpolando i valori di tab. 5, vale 0.46×10^{-3} . Se si fosse utilizzata l'espressione fornita nell'appendice B dell'Eurocodice 2 si sarebbe trovato in sostanza lo stesso valore (più precisamente, 0.4588×10^{-3}). Il coefficiente k_h , interpolando i valori di tab. 6, vale 0.777. L'accorciamento da ritiro per essiccamento vale quindi

$$\varepsilon_{cd} = 0.777 \times 0.46 \times 10^{-3} = 35.74 \times 10^{-5}$$

In totale, quindi, l'accorciamento da ritiro vale

$$\varepsilon_{cs} = (3.75 + 35.74) \times 10^{-5} = 39.5 \times 10^{-5}$$

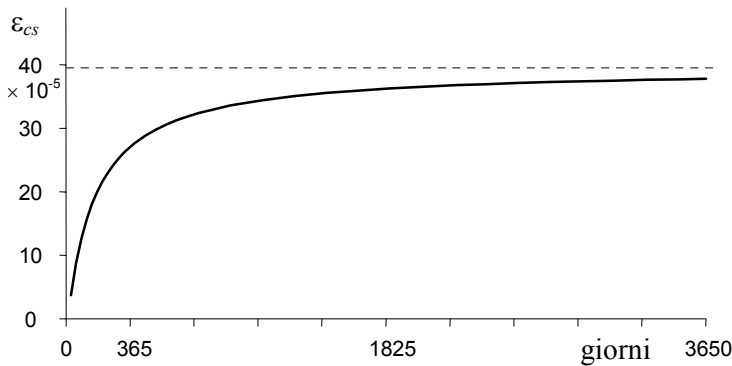


Fig. 8 - andamento nel tempo dell'accorciamento unitario da ritiro secondo l'appendice 1 dell'Eurocodice 2

Ovviamente, se la trave è libera di deformarsi si ha proprio questo accorciamento, senza che nascano tensioni. In strutture iperstatiche l'accorciamento è limitato dagli altri elementi strutturali ed insorgerà quindi uno stato tensionale più o meno rilevante.

Esempio 6. Per la stessa trave dell'esempio precedente, si valuti l'andamento dell'accorciamento unitario da ritiro nel tempo, assumendo $t_s = 28$ giorni.

Il termine che compare al denominatore dell'espressione di β_{ds} in funzione di h_0 vale

$$0.04 \sqrt{h_0^3} = 0.04 \times \sqrt{272.7^3} = 180 \text{ giorni}$$

L'andamento dell'accorciamento da ritiro nel tempo ε_{cs} , ottenuto moltiplicando il coefficiente ε_{cd} per il fattore $\beta_{ds}(t-t_s)$ ed aggiungendogli il valore costante di ε_{ca} , è mostrato nella figura 8.

4.3. Scorrimento viscoso

Quando si applicano carichi ad una struttura in cemento armato, si verificano istantaneamente deformazioni elastiche che rispettano il legame σ - ε descritto nel paragrafo 3.5. Sotto carichi di lunga durata avviene però nel tempo un rilevante incremento di deformazioni. Questo fenomeno, causato principalmente dalla migrazione ed evaporazione dell'acqua presente nei pori del calcestruzzo, è indicato col termine *viscosità* (in francese *fluage*, in inglese *creep*). L'entità delle deformazioni viscosi dipende dalla composizione del calcestruzzo, dalle dimensioni dell'elemento e dall'umidità relativa dell'ambiente ma anche dall'entità dei ca-