

Lezione

TECNICA DELLE COSTRUZIONI

Prof. Pier Paolo Rossi

Università degli Studi di Catania

Calcestruzzo: prove in laboratorio e in situ

Comportamento del calcestruzzo

Caratteristiche meccaniche

Attraverso le prove in laboratorio o in situ vengono analizzate alcune caratteristiche meccaniche del calcestruzzo (o conglomerato cementizio).

Le prove di carico studiano il comportamento del calcestruzzo a livello macroscopico. Esso viene considerato, per semplicità, un materiale omogeneo, anche se le sue caratteristiche meccaniche variano in relazione alla quantità e qualità degli elementi costituenti.

Comportamento del calcestruzzo

Tipi di prove in laboratorio

Prove sui campioni prelevati dai getti

- **prova di compressione**
- **prova di trazione diretta**
- **prova di trazione indiretta (prova brasiliana)**
- **prova di flessione**
- **determinazione del modulo elastico a compressione**

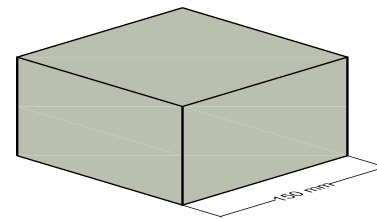
La prima di tali prove è la più comune, essendo di più facile esecuzione e più immediata interpretazione ed essendo prescritta dalla maggior parte delle normative; le altre prove vengono effettuate meno frequentemente, di solito per scopi di ricerca.

Comportamento del calcestruzzo

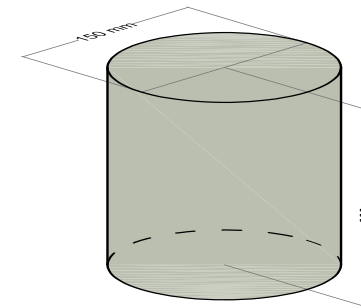
Prova a compressione

Prova di tipo distruttivo, attraverso la quale viene descritto il comportamento di un provino (di forma cubica o cilindrica) sottoposto ad una forza di compressione crescente. Questa prova consente di determinare il valore della resistenza a compressione del calcestruzzo.

- Per potere confrontare tra di loro le prove, si fa riferimento ad una stagionatura del calcestruzzo di 28 giorni.
- La resistenza cubica è indicata con il simbolo R_c , quella cilindrica con il simbolo f_c .



provino
cubico



provino
cilindrico

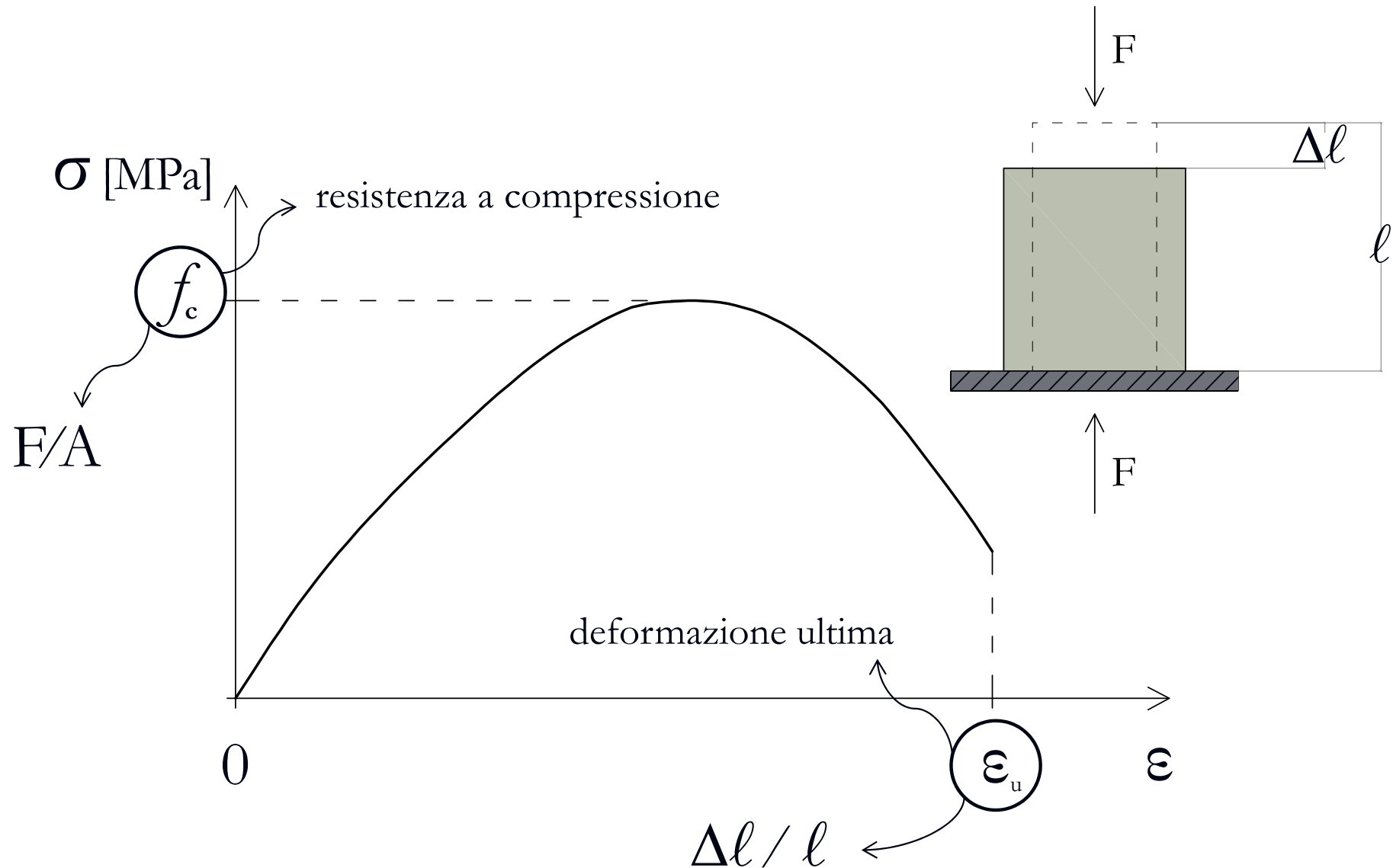
Comportamento del calcestruzzo

Prova a compressione



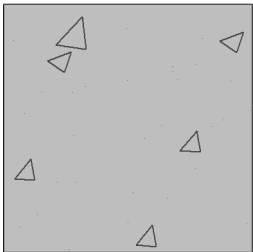
Comportamento del calcestruzzo

Prova a compressione: legame costitutivo σ - ϵ



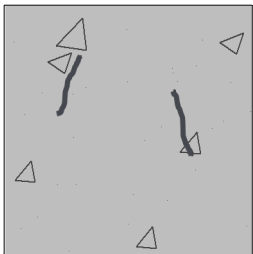
Comportamento del calcestruzzo

Prova a compressione: fasi principali



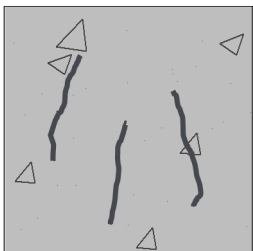
Carico compreso fra 0 e 40% f_c

Il comportamento macroscopico è prossimo a quello elastico-lineare. Dal punto di vista microscopico, l'incremento di carico non ha influenza sensibile sulle microfessure.



Carico compreso fra 40% e 85% f_c

Il comportamento macroscopico è sempre più marcatamente non lineare. Le microfessure si propagano al crescere del carico, ma la propagazione si arresta nel tempo, giungendo ad un assetto stabile.



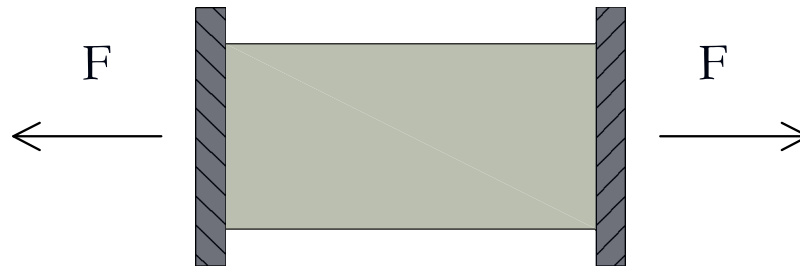
Carico compreso fra 85% f_c ed f_c

La propagazione delle microfessure diventa instabile ed esse diventano evidenti a livello macroscopico. Raggiunto il valore di carico massimo f_c si ha una rottura fragile del provino.

Comportamento del calcestruzzo

Prova a trazione centrata

E' una **prova di tipo distruttivo** che si effettua in laboratorio. Essa consente di determinare la resistenza a trazione del calcestruzzo in maniera diretta, applicando una forza crescente, fino alla rottura, a provini cilindrici o prismatici.



- La resistenza a trazione ($f_{ct,ax}$) si ottiene come rapporto tra la forza che porta a rottura il provino F e l'area della sua sezione trasversale A .

Comportamento del calcestruzzo

Prova a trazione indiretta (splitting test o prova brasiliana)

Consiste in una prova a compressione effettuata su due generatrici opposte di un provino di forma cilindrica. L'applicazione della forza di compressione genera uno stato tensionale di trazione su gran parte del piano diametrale contenente il carico.



- La resistenza a trazione si calcola con la seguente relazione:

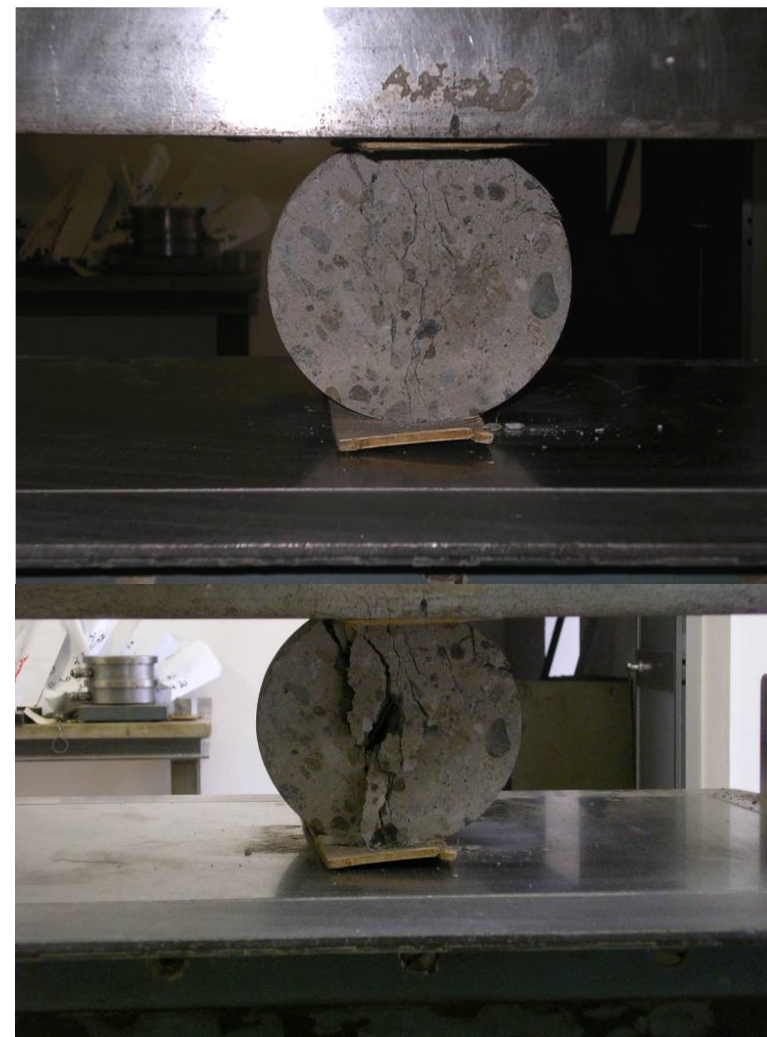
$$f_{ct,sp} = F / \pi r \ell$$

- L'Eurocodice 2 (3.1.2.) suggerisce cautelativamente di valutare la resistenza a trazione come:

$$f_{ct,ax} = 0.9 f_{ct,sp}$$

Comportamento del calcestruzzo

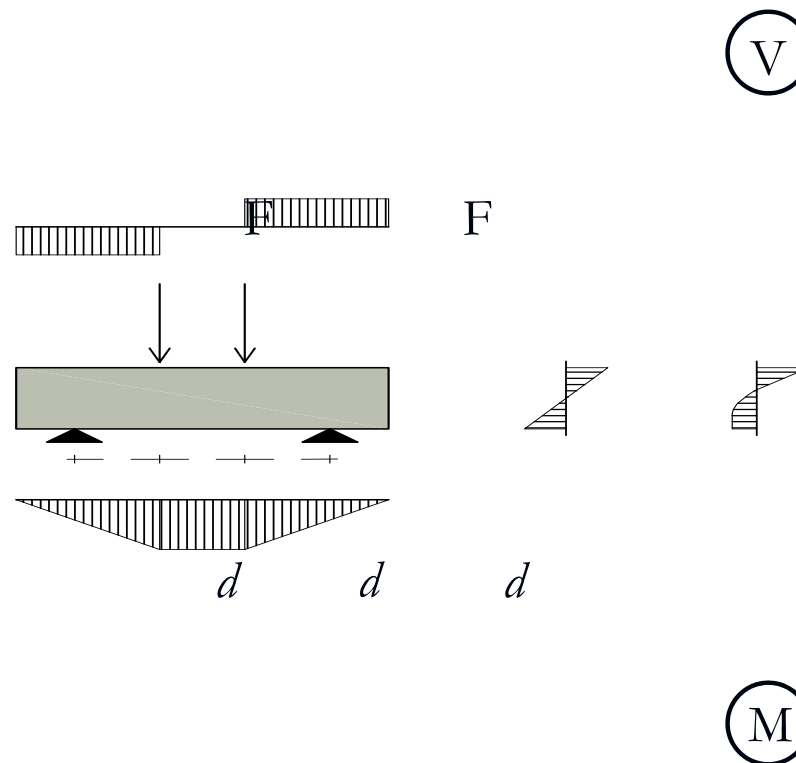
Prova a trazione indiretta



Comportamento del calcestruzzo

Prova di flessione

Consiste nell'applicare ad un provino prismatico semplicemente appoggiato, due forze generanti una sollecitazione di flessione.



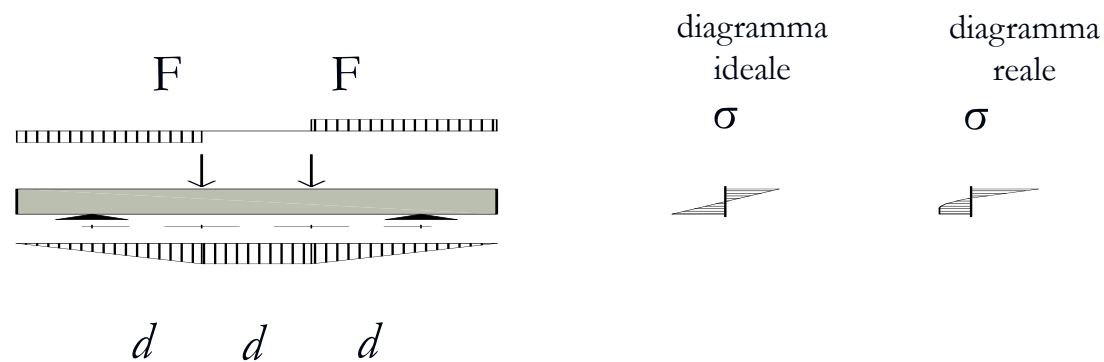
Comportamento del calcestruzzo

Prova di flessione

Ipotizzando un comportamento elastico lineare*,
la resistenza a trazione si può determinare come:

$$f_{ct,fl} = 6M/bb^2$$

dove $M (Fd)$ è il momento provocato dalla forza che porta a rottura il provino.



* Il comportamento del materiale a trazione in realtà è di tipo **non lineare**.

Comportamento del calcestruzzo

Tipi di prove in opera

PROVE DIRETTE

di resistenza su campioni
prelevati dagli elementi strutturali



Prove distruttive

PROVE INDIRETTE

di resistenza in cui si misurano certe
caratteristiche fisiche o chimiche da
cui si ricava una stima della resistenza
attraverso correlazioni usualmente di
tipo empirico



**Prove moderatamente o
affatto distruttive**

Comportamento del calcestruzzo

Tipi di prove in opera

Prove dirette (distruttive)

- carotaggi
- microcarotaggi

Prove indirette

(non distruttive)

- sclerometro
- velocità di propagazione degli ultrasuoni
- metodi combinati

(moderatamente distruttive)

- prove di estrazione (pullout)
- prova di penetrazione Windsor Probe Test
- pull-off
- break-off

Comportamento del calcestruzzo

Carotaggio

prelievo di campioni (carote) dalle strutture finite,
per mezzo di apposite attrezzature dotate di mole a corona diamantata



Comportamento del calcestruzzo

Carotaggio

Sulle carote si possono effettuare

- prove di compressione
- prove di trazione indiretta
- prove per la determinazione del modulo elastico e di Poisson
- prove chimiche



Comportamento del calcestruzzo

Carotaggio

La resistenza misurata sulle carote è influenzata, oltre che dai fattori che modificano la resistenza in situ rispetto a quella dei campioni standard, da altri fattori connessi col metodo di prova:

- operazioni di perforazione (decremento di resistenza maggiore si ha per carote prelevate in direzione normale a quella di getto, in genere in direzione orizzontale)
- porzione della superficie del getto (presenza di uno strato più debole)
- diametro della carota in rapporto alla dimensione massima dell'inerte: per rapporti piccoli si ha un sensibile aumento del coefficiente di variazione (la normativa impone rapporto minimo pari a 3)
- presenza di spezzoni di armatura

Comportamento del calcestruzzo

Indebolimento delle strutture in conseguenza del carotaggio

Le zone in cui effettuare i carotaggi devono essere scelte in modo da non alterare la capacità portante dell'elemento strutturale.

Pertanto:

- nei pilastri,
occorre evitare di effettuare fori in posizione eccentrica
- nelle travi,
sono preferibili le zone ai quarti della luce e all'altezza dell'asse neutro
- particolare attenzione va posta in prossimità dei nodi strutturali

Nota ! Non ci si deve comunque attendere che la riduzione di capacità portante delle strutture soggette a compressione possa essere completamente compensata dal riempimento del foro mediante malte additivate.

Comportamento del calcestruzzo

Microcarotaggio

Se il diametro delle carote è inferiore a 3 volte il diametro massimo dell'inerte, allora le carote sono dette “microcarote”.

I risultati di resistenza che si ottengono dalla prova a compressione su microcarote sono molto dispersi; questo fatto dipende dalla distribuzione casuale degli inerti: carote di piccolo diametro prelevate dallo stesso getto possono differire l'una dall'altra per le dimensioni massime degli inerti contenuti in ciascuna; inoltre, alcuni inerti piccoli o frantumi di inerti possono distaccarsi dalla superficie laterale indebolendo la sezione, in misura maggiore quanto più questa è piccola.

Per ottenere risultati affidabili,
occorre effettuare le prove su un numero maggiore di campioni

E' possibile comunque estrarre un numero ridotto di microcarote sufficientemente lunghe, da poter ricavare, da ciascuna di queste, più campioni.

Comportamento del calcestruzzo

Prova sclerometrica

Lo sclerometro serve a misurare la durezza del materiale e si basa sul principio che il rimbalzo della massa metallica che percuote la superficie è funzione della durezza della superficie stessa.

Asta di percussione

Scala dell'indice di rimbalzo



Correlazione tra indice di rimbalzo
e resistenza del calcestruzzo

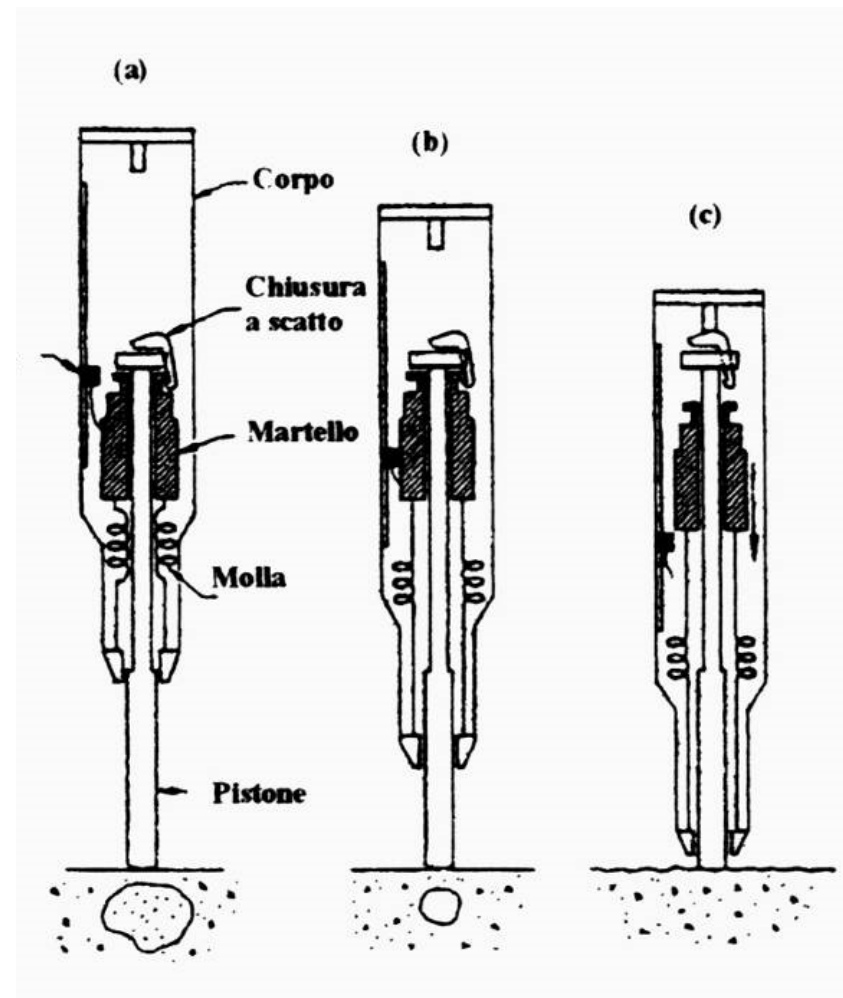
Comportamento del calcestruzzo

Prova sclerometrica

Per usare lo strumento si deve premere l'asta di percussione sulla superficie da provare fino al suo arresto (Fig. a-b) .

In questo modo la massa contenuta nell'apparecchio viene caricata per mezzo della molla di una quantità fissa di energia.

La massa si libera e urta contro il percussore ancora in contatto con la superficie (Fig. c).



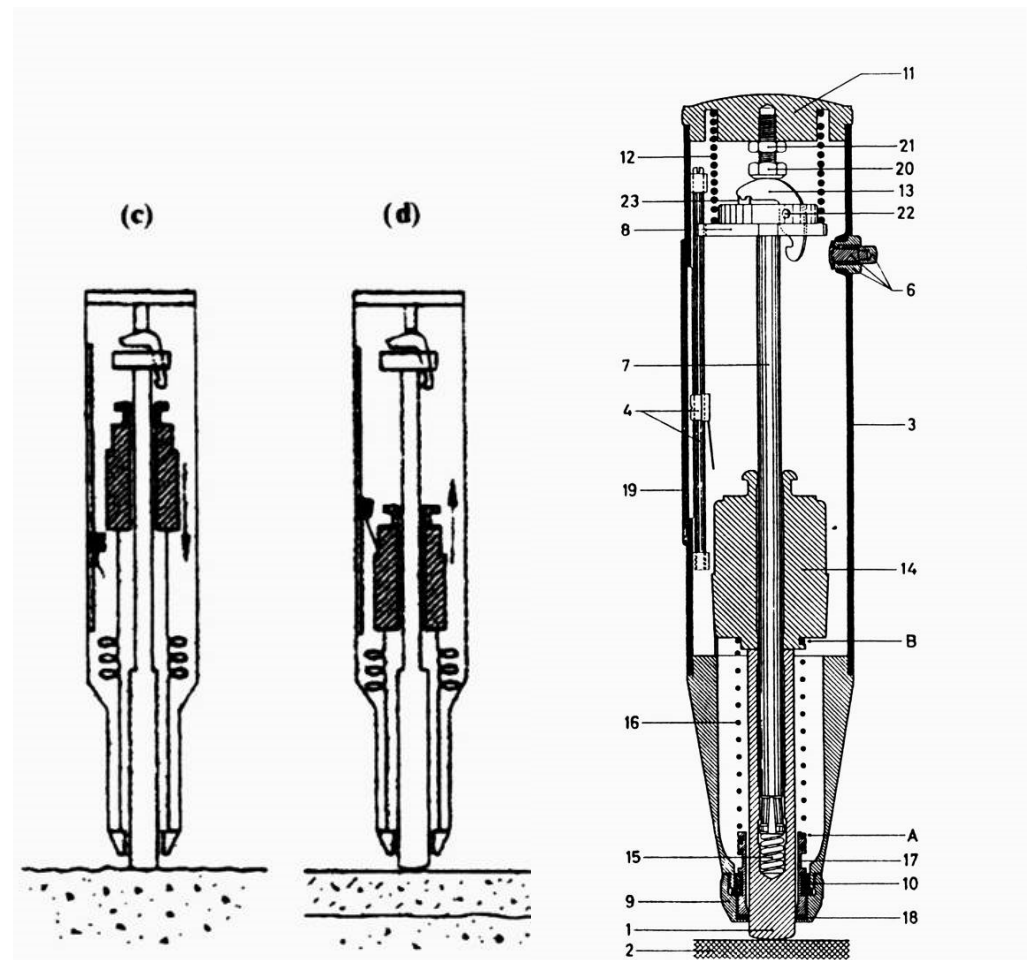
Comportamento del calcestruzzo

Prova sclerometrica

L'energia di impatto viene in parte assorbita dal calcestruzzo sotto forma di deformazioni anelastiche permanenti ed in parte restituita alla massa mobile che rimbalza (Fig. d).

Quanto maggiore è la resistenza del materiale, tanto minori sono le deformazioni permanenti e quindi maggiore risulta l'altezza di rimbalzo.

L'entità del rimbalzo è misurata da un indice che scorre lungo una scala graduata. Il valore della resistenza del calcestruzzo è ottenuto in funzione del valore dell'indice di rimbalzo.



Comportamento del calcestruzzo

Prova sclerometrica

Le misure devono essere effettuate:

- su una superficie di circa 20x20 cm
- priva di difetti superficiali
- lontana dalle barre di armatura
- adeguatamente preparata e pulita per eliminare le asperità superficiali

Per la prova si effettuano 12 battute; scartati il valore più alto e quello più basso, si ricava la resistenza nel punto in esame come media dei valori corrispondenti alle 10 battute rimaste.

Nota !

E' opportuno valutare anche la deviazione standard: se i valori sono troppo dispersi, la prova è poco affidabile.

Comportamento del calcestruzzo

Limiti della prova sclerometrica

La valutazione è basata sulla resistenza di uno strato di piccolo spessore (da 1 a 3 cm circa) della superficie dell'elemento strutturale, strato che peraltro risulta poco rappresentativo a causa delle alterazioni che subisce per fattori ambientali.

Comportamento del calcestruzzo

Precauzioni d'impiego dello sclerometro

E' opportuno evitare :

- che le prove siano effettuate sulla superficie libera di un getto (non a contatto con casseri)

Questa zona è in genere ricca di parti più fini, è caratterizzata da elevati rapporti acqua/cemento e ha subito una maggiore evaporazione.

- che le prove siano effettuate in prossimità agli spigoli:
è sufficiente porsi a distanze dell'ordine di 10 cm
- che i punti dove si effettuano le battute siano sufficientemente vicini fra loro per evitare una influenza reciproca (almeno 2-3 cm)
- che il colpo interessi inerti di grandi dimensioni.

Comportamento del calcestruzzo

Precauzioni d'impiego dello sclerometro

E' sconsigliabile l'uso di uno sclerometro quando:

- si hanno zone con difetti locali nel getto
- i calcestruzzi sono realizzati con inerti di elevate dimensioni (>40 mm)
- i calcestruzzi hanno una resistenza ridotta (<15 MPa) (si rischia di fare misure solo sull'inerte)
- i calcestruzzi sono molto vecchi o molto giovani (< 3 gg.)
- si è in prossimità di cavi di precompressione (comportamento fortemente influenzato dallo stato tensionale);
- si hanno elementi molto sottili in direzione ortogonale alla prova (< 100 mm);
- i calcestruzzi non hanno una qualità uniforme allontanandosi dalla superficie (calcestruzzi soggetti a gelo, aggressioni chimiche, ...)

Comportamento del calcestruzzo

Prova ultrasonica

Prova in situ di tipo non distruttivo, che si basa sullo studio della propagazione di onde ultrasoniche lungo traiettorie all'interno della struttura da analizzare.

- La velocità di propagazione dipende dalle caratteristiche del materiale.
- Questo tipo di prova consente di valutare sia il modulo elastico (e quindi indirettamente la resistenza), sia la presenza di eventuali imperfezioni esecutive.



Comportamento del calcestruzzo

Prova di pull out

Prova in situ di tipo semidistruttivo, consistente nell'effettuare con il trapano un foro nel calcestruzzo da esaminare, inserire nel foro un tassello standardizzato, ed infine estrarlo, insieme ad un cono di calcestruzzo, per mezzo di un estrattore.



- La forza di estrazione dei tasselli è messa in relazione con la resistenza a compressione del calcestruzzo.

Calcestruzzi di normativa

Classi del calcestruzzo

Il calcestruzzo 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.

Nota: Per le classi di resistenza normalizzate per calcestruzzo normale si può fare utile riferimento a quanto indicato nelle norme UNI EN 206-1:2006 e nella UNI 11104:2004.

strutture precomprese
strutture semplicemente armate
strutture non armate o a bassa percentuale di armatura

Classe di resistenza			
C8/10	↓		
C12/15			
C16/20		↓	
C20/25			
C25/30			
C28/35			
C32/40			↓
C35/45			
C40/50			
C45/55			
C50/60			
C55/67			
C60/75			
C70/85			
C80/95			
C90/105			

Costruzioni di calcestruzzo

- **Per le classi di resistenza superiori a 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.

Controlli di qualità del calcestruzzo

Controlli di qualità del calcestruzzo

Valutazione preliminare della resistenza

Serve a determinare, prima dell'inizio della costruzione delle opere , la miscela per produrre il calcestruzzo con la resistenza caratteristica di progetto

Controllo della produzione

Riguarda il controllo da eseguire sul calcestruzzo durante la produzione del calcestruzzo stesso.

Controllo di accettazione

Riguarda il controllo da eseguire sul calcestruzzo prodotto durante l'esecuzione dell'opera, con prelievo effettuato contestualmente al getto dei relativi elementi strutturali.

Prove complementari

Sono prove che vengono eseguite, ove necessario, a complemento delle prove di accettazione.

Controllo di accettazione

Il Direttore dei Lavori ha l'obbligo di eseguire controlli sistematici in corso d'opera per verificare la conformità delle caratteristiche del calcestruzzo messo in opera rispetto a quello stabilito dal progetto e sperimentalmente verificato in sede di valutazione preliminare. Il controllo di accettazione va eseguito su miscele omogenee e si configura, in funzione del quantitativo di calcestruzzo in accettazione, nel:

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

Prelievo

Entrambi i controlli sono eseguiti sulle Resistenze di Prelievi.

Un prelievo consiste nel prelevare dagli impasti, al momento della posa in opera ed alla presenza del Direttore dei Lavori o di persona di sua fiducia, il calcestruzzo necessario per la confezione di un gruppo di due provini.

La media delle resistenze a compressione dei due provini di un prelievo rappresenta la “Resistenza di prelievo” che costituisce il valore mediante il quale vengono eseguiti i controlli del calcestruzzo.

È obbligo del Direttore dei Lavori prescrivere ulteriori prelievi rispetto al numero minimo, di cui ai successivi paragrafi, tutte le volte che variazioni di qualità e/o provenienza dei costituenti dell'impasto possano far presumere una variazione di qualità del calcestruzzo stesso, tale da non poter più essere considerato omogeneo.

Prelievo

Riempimento delle casseforme e compattazione del calcestruzzo

Il calcestruzzo deve essere versato in casseforme a tenuta stagna e non assorbenti. I provini devono essere compattati in almeno due strati, di spessore non superiore a 100 mm. Il calcestruzzo deve essere compattato in modo da produrre una completa compattazione del calcestruzzo senza una eccessiva segregazione o comparsa di acqua superficiale.

Ciascuno strato può essere compattato con vibrazione meccanica o manuale.

Prelievo

Compattazione con vibrazione meccanica

Usando la vibrazione meccanica una completa compattazione è ottenuta quando non si osserva più la comparsa di grosse bolle d'aria sulla superficie del calcestruzzo e la superficie diventa relativamente piana con aspetto vetroso, senza eccessiva segregazione.

Compattazione con vibrazione manuale

Compattazione con il pestello o la barra per compattazione. Distribuire i colpi del pestello o della barra per compattazione in modo uniforme su tutta la superficie della cassaforma.

Assicurarsi che il pestello o la barra per compattazione non colpiscano il fondo della cassaforma mentre si compatta il primo strato e che non penetrino significativamente negli strati precedenti. Sottoporre il calcestruzzo ad almeno 25 colpi per strato. Al fine di rimuovere sacche d'aria aggiunta ma non l'aria introdotta, dopo la compattazione di ogni strato dare qualche colpo di mazzuola sulle pareti della cassaforma fino a che non si osserva più la comparsa di grandi bolle d'aria e scompaiono le impronte lasciate del pestello o dalla barra di compattazione.

Prelievo

Marcatura

I provini devono essere contrassegnati in modo chiaro ed indelebile senza danneggiarli. Devono essere conservate le registrazioni che assicurano la rintracciabilità del campione dal campionamento fino alla prova.

Conservazione dei provini

Lasciare i provini nella cassaforma per almeno 16 h, ma non oltre 3 giorni, proteggendoli da urti, vibrazioni e disidratazione, alla temperatura di $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ [oppure $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$ nei climi caldi].

Una volta rimossi dalla cassaforma conservare i provini fino al momento della prova in acqua alla temperatura di $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, oppure in ambiente a $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ed umidità relativa $\geq 95\%$.

Verbale di prelievo

VERBALE DI PRELIEVO DI CAMPIONI DI CALCESTRUZZO

Verbale n°

Lavori di:	
Cantiere di:	
Impresa esecutrice:	
Direttore dei Lavori:	
Responsabile di cantiere:	

Oggi alle ore in località
alla presenza di:

Per la Direzione dei Lavori:	
Per il Committente:	
Per l'Impresa esecutrice:	

Si procede ad eseguire n° prelievi per un totale di (un prelievo = 2 cubetti) n° cubetti
delle dimensioni di: 15*15*15 n°

prelevati:	all'impianto di betonaggio	n°	cubetti
	all'autobetoniera con D.D.T. n°	n°	cubetti
	al momento del getto	n°	cubetti

	Rck	Tipo cemento	Dosaggio	A/C	Slump
Il calcestruzzo previsto è:					

	Struttura (Fond., Solaio, ecc.)	Zona / Piano	n° prelievo / contrassegno provini
Il calcestruzzo prelevato viene utilizzato per la costruzione di:			

Il prelievo viene eseguito secondo quanto previsto dal D.M.14/01/2008 in base alle norme UNI EN 12390:2002

La stagionatura sarà curata dall'Impresa appaltatrice.

Letto firmato e sottoscritto

Per il Committente:	
Per l'Impresa:	

Il presente verbale viene redatto in triplice copia.

Per la Direzione dei Lavori:	
------------------------------	--

Controllo di tipo A

Il controllo di tipo A è riferito ad un quantitativo di miscela omogenea non maggiore di 300 m³. Ogni controllo di accettazione di tipo A è rappresentato da almeno tre prelievi, ciascuno dei quali eseguito su un massimo di 100 m³ di getto di miscela omogenea. Per ogni giorno di getto va comunque effettuato almeno un prelievo.

Nelle costruzioni con meno di 100 m³ di getto di miscela omogenea, fermo restando l'obbligo di almeno 3 prelievi e del rispetto delle limitazioni di cui sopra, è consentito derogare dall'obbligo di prelievo giornaliero.

Controllo di tipo B

Nella realizzazione di opere strutturali che richiedano l'impiego di più di 1500 m³ di miscela omogenea è obbligatorio il controllo di accettazione di tipo statistico (tipo B). Il controllo è riferito ad una definita miscela omogenea e va eseguito con frequenza non minore di un controllo ogni 1500 m³ di calcestruzzo. Per ogni giorno di getto di miscela omogenea va effettuato almeno un prelievo, e complessivamente almeno 15 prelievi sui 1500 m³. Se si eseguono controlli statistici accurati, l'interpretazione dei risultati sperimentali può essere svolta con i metodi completi dell'analisi statistica assumendo anche distribuzioni diverse dalla normale. Si deve individuare la legge di distribuzione più corretta e il valor medio unitamente al coefficiente di variazione (rapporto tra deviazione standard e valore medio). In questo caso la resistenza minima di prelievo R_1 dovrà essere maggiore del valore corrispondente al frattile inferiore 1%.

Per calcestruzzi con coefficiente di variazione (s / R_m) superiore a 0,15 occorrono controlli più accurati. Non sono accettabili calcestruzzi con coefficiente di variazione superiore a 0,3.

Controllo di accettazione

Il controllo di accettazione è positivo ed il quantitativo di calcestruzzo accettato se risultano verificate le disuguaglianze di cui alla tabella seguente:

Controllo di tipo A	Controllo di tipo B
$R_l \geq R_{ck} - 3.5$	
$R_m \geq R_{ck} + 3.5$ (N° prelievi ≥ 3)	$R_m \geq R_{ck} + 1.48 s$ (N° prelievi ≥ 15)

Controllo della resistenza del calcestruzzo in opera

Nel caso in cui le resistenze a compressione dei provini prelevati durante il getto non soddisfino i criteri di accettazione della classe di resistenza caratteristica prevista nel progetto, oppure sorgano dubbi sulla qualità e rispondenza del calcestruzzo ai valori di resistenza determinati nel corso della qualificazione della miscela, oppure si renda necessario valutare a posteriori le proprietà di un calcestruzzo precedentemente messo in opera, si può procedere ad una valutazione delle caratteristiche di resistenza attraverso una serie di prove sia distruttive che non distruttive. Tali prove non devono, in ogni caso, intendersi sostitutive dei controlli di accettazione. Il valor medio della resistenza del calcestruzzo in opera (definita come resistenza strutturale) è in genere inferiore al valor medio della resistenza dei prelievi in fase di getto maturati in condizioni di laboratorio (definita come resistenza potenziale).

È accettabile un valore medio della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive e non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto.

Resistenze del calcestruzzo secondo normativa

Caratteristiche del calcestruzzo

Normativa: resistenza a compressione

In sede di progetto si farà riferimento alla resistenza caratteristica a compressione su cubi R_{ck} . Dalla resistenza cubica si passerà a quella cilindrica da utilizzare nelle verifiche mediante l'espressione:

$$f_{ck} \geq 0.83 R_{ck}$$

Sempre in sede di previsioni progettuali, è possibile passare dal valore caratteristico al valor medio della resistenza cilindrica mediante l'espressione

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 8 \quad [\text{MPa}]$$

Caratteristiche del calcestruzzo

Normativa: resistenza a trazione

- In sede di progettazione si può assumere come resistenza media a trazione semplice (assiale) del calcestruzzo il valore (in N/mm²):

$$f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3} \quad \text{per classi} \leq \text{C50/60}$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln[1 + f_{cm} / 10] \quad \text{per classi} > \text{C50/60}$$

I valori caratteristici corrispondenti ai frattili 5% e 95% sono assunti, rispettivamente, pari a $0,7 f_{ctm}$ ed $1,3 f_{ctm}$.

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

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

*Tale resistenza, fittiziamente maggiorata, compensa l'approssimazione consistente nell'utilizzo di un modello di comportamento lineare.

Caratteristiche del calcestruzzo

Modulo elastico e coeff. di Poisson

Per modulo elastico istantaneo del calcestruzzo va assunto quello secante tra la tensione nulla e $0,40 f_{cm}$, determinato sulla base di apposite prove.

In sede di progettazione si può assumere il valore:

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

Tale formula non è applicabile ai calcestruzzi maturati a vapore. Essa non è da considerarsi vincolante nell'interpretazione dei controlli sperimentali delle strutture.

Per il coefficiente di *Poisson* può adottarsi, a seconda dello stato di sollecitazione, un valore compreso tra 0 (calcestruzzo fessurato) e 0,2 (calcestruzzo non fessurato).

Caratteristiche del calcestruzzo

Coeff. di dilatazione termica

Il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo può essere determinato a mezzo di apposite prove.

In sede di progettazione, o in mancanza di una determinazione sperimentale diretta, per il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo può assumersi un valor medio pari a $10 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, fermo restando che tale quantità dipende significativamente dal tipo di calcestruzzo considerato (rapporto inerti/legante, tipi di inerti, ecc.) e può assumere valori anche sensibilmente diversi da quello indicato.

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro

La deformazione assiale per ritiro del calcestruzzo può essere determinata a mezzo di apposite prove. In sede di progettazione, e quando non si ricorra ad additivi speciali, il ritiro del calcestruzzo può essere valutato sulla base delle indicazioni di seguito fornite. La deformazione totale da ritiro si può esprimere come:

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

dove:

ϵ_{cs} è la deformazione totale per ritiro

ϵ_{cd} è la deformazione per ritiro da essiccamento

ϵ_{ca} è la deformazione per ritiro autogeno.

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro da essiccamento

Lo sviluppo nel tempo della deformazione ε_{cd} può essere valutato come:

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

dove la funzione di sviluppo temporale assume la forma

$$\beta_{ds}(t - t_s) = (t - t_s) / \left[(t - t_s) + 0.04 h_0^{3/2} \right]$$

in cui:

- t è l'età del calcestruzzo nel momento considerato (in giorni)
- t_s è l'età del calcestruzzo a partire dalla quale si considera l'effetto del ritiro da essiccamento (normalmente il termine della maturazione, espresso in giorni).
- h_0 è la dimensione fittizia (in mm) pari al rapporto $2A_c / u$ essendo
- A_c è l'area della sezione in calcestruzzo
- u è il perimetro della sezione in calcestruzzo esposto all'aria

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro da essiccamento

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

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

può essere valutato mediante i valori di tabelle in funzione della resistenza caratteristica a compressione, dell'umidità relativa e del parametro h_0 :

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

h_0 (mm)	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥500	0.70

Caratteristiche del calcestruzzo

Ritiro autogeno

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro autogeno $\epsilon_{ca,\infty}$ può essere valutato mediante l'espressione:

$$\epsilon_{ca,\infty} = -2.5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad \text{con } f_{ck} \text{ in MPa}$$

Caratteristiche del calcestruzzo

Viscosita'

In sede di progettazione, se lo stato tensionale del calcestruzzo, al tempo $t_0 = j$ di messa in carico, non è superiore a $0,45 \times f_{ckj}$, il coefficiente di viscosità $f(\infty, t_0)$, a tempo infinito, a meno di valutazioni più precise, può essere dedotto dalle seguenti tabelle dove h_0 è la dimensione fittizia:

**Umidità-
relativa 75%**

t_0	$h_0 \leq 75 \text{ mm}$	$h_0 = 150 \text{ mm}$	$h_0 = 300 \text{ mm}$	$H_0 = 600 \text{ mm}$
3 giorni	3.5	3.2	3.0	2.8
≥ 60 giorni	2.0	1.8	1.7	1.6

**Umidità-
relativa 55%**

t_0	$h_0 \leq 75 \text{ mm}$	$h_0 = 150 \text{ mm}$	$h_0 = 300 \text{ mm}$	$H_0 = 600 \text{ mm}$
3 giorni	4.5	4.0	3.6	3.3
≥ 60 giorni	2.5	2.3	2.1	1.9

Nel caso in cui sia richiesta una valutazione in tempi diversi da $t = \infty$ del coefficiente di viscosità questo potrà essere valutato secondo modelli tratti da documenti di comprovata validità.

Resistenze di progetto

Verifiche agli stati limite

Resistenza di calcolo dei materiali

La resistenza di calcolo f_d indica la resistenza del materiale (in questo caso il calcestruzzo), ottenuta mediante l'espressione:

$$f_d = f_k / \gamma_M$$

dove:

f_k è la resistenza caratteristica del materiale;

γ_M sono i coefficienti parziali per le resistenze, comprensivi delle incertezze del modello e della geometria, che possono variare in funzione del materiale, della situazione di progetto e della particolare verifica in esame.

Verifiche agli stati limite

Resistenza di calcolo a compressione del cls

Per il calcestruzzo la resistenza di calcolo a compressione, f_{cd} , é:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$$

dove:

α_{cc} è il coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata;

γ_C è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo;

f_{ck} è la resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo a 28 giorni.

Il coefficiente γ_C vale 1.5

Il coefficiente α_{cc} vale 0.85

Verifiche agli stati limite

Resistenza di calcolo a compressione del cls

Per il calcestruzzo la resistenza di calcolo a compressione, f_{cd} , é:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$$

Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori minori di 50 mm, la resistenza di calcolo a compressione va ridotta a $0,80f_{cd}$.

Il coefficiente γ_C può essere ridotto da 1,5 a 1,4 per produzioni continuative di elementi o strutture, soggette a controllo continuativo del calcestruzzo dal quale risulti un coefficiente di variazione (rapporto tra scarto quadratico medio e valor medio) della resistenza non superiore al 10%.

Le suddette produzioni devono essere inserite in un sistema di qualità.

Verifiche agli stati limite

Resistenza di calcolo a trazione del calcestruzzo

La resistenza di calcolo a trazione, f_{ctd} , vale:

$$f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_C$$

dove:

γ_C è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo;

f_{ctk} è la resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo.

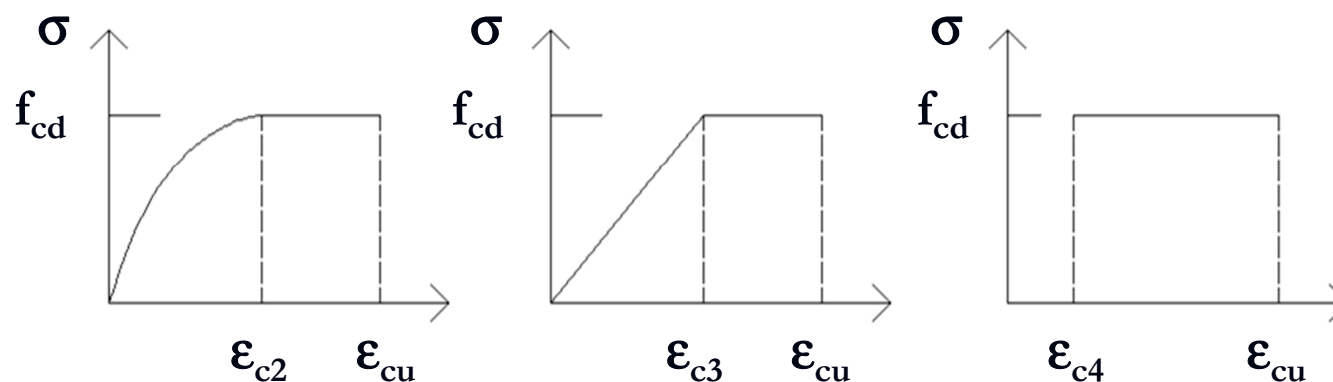
Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori minori di 50 mm, la resistenza di calcolo a trazione va ridotta a $0,80f_{ctd}$.

Il coefficiente γ_C può essere ridotto, da 1,5 a 1,4 nei casi specificati precedentemente.

Modelli di progetto del comportamento del calcestruzzo

Verifiche agli stati limite

Diagrammi di calcolo tensione-deformazione del cls



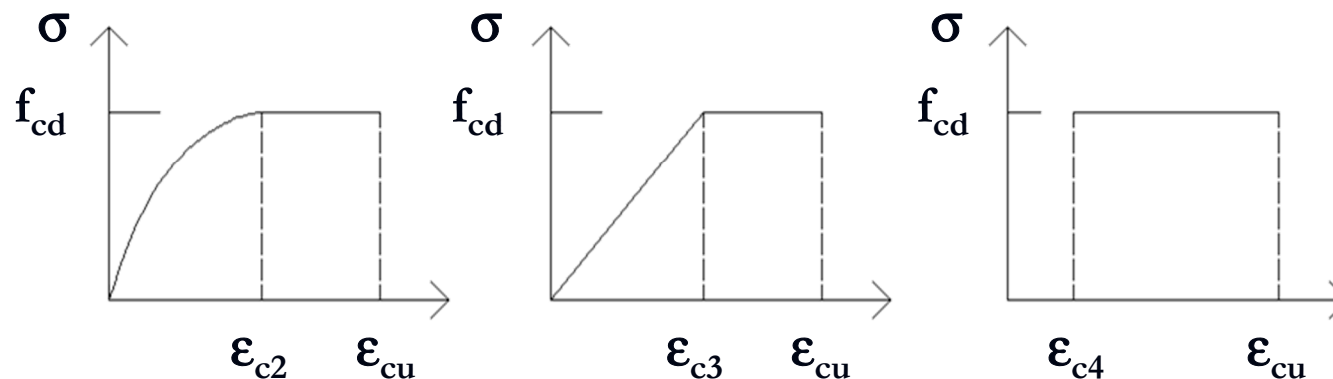
Per le classi di resistenza pari o inferiore a C50/60 si può porre:

$$\epsilon_{c2} = 0,200\% \quad \epsilon_{cu} = 0,35\%$$

$$\epsilon_{c3} = 0,175\% \quad \epsilon_{c4} = 0,07\%$$

Verifiche agli stati limite

Diagrammi di calcolo tensione-deformazione del cls



Per le classi di resistenza superiore a C50/60 si può porre:

$$\epsilon_{c2} = 0,20\% + 0,0085\%(f_{ck} - 50) \qquad \epsilon_{cu} = 0,26\% + 3,5\% (90 - f_{ck})/100$$

$$\epsilon_{c3} = 0,175\% + 0,055\% (f_{ck} - 50)/40 \qquad \epsilon_{c4} = 0,2 \epsilon_{cu}$$

purché si adottino opportune limitazioni quando si usa il modello a blocco.

Attenzione: Indipendentemente dalla resistenza,
per sezioni o parti di sezioni soggette a distribuzioni di tensione di compressione
approssimativamente uniformi, si assume per la deformazione a rottura il valore ϵ_{c2} anziché ϵ_{cu} .

FINE