

Gettata con climi freddi o gelo

La temperatura ambiente influisce notevolmente sullo sviluppo della resistenza del calcestruzzo. Alle basse temperature il calcestruzzo si indurisce molto più lentamente. Pertanto, un calcestruzzo stagionato a 5 °C raggiungerà la stessa solidità di un calcestruzzo stagionato a 20 °C nel doppio del tempo.

In presenza di temperature inferiori al punto di congelamento, può accadere che il processo di idratazione si arresti. Inoltre, dopo più passaggi dal gelo al disgelo, l'acqua non legata presente nel calcestruzzo fresco si espande, provocando un indebolimento della struttura, perdite di resistenza e spaccature. Se il calcestruzzo è già sufficientemente indurito, al punto da aver raggiunto una resistenza alla compressione superiore a 5 N/mm², saprà resistere a un eventuale congelamento. Tuttavia, occorrerà prolungare il disarmo del tempo in cui la temperatura del calcestruzzo era scesa sotto lo 0 °C e quindi provvedere affinché, soprattutto alle basse temperature, il calcestruzzo si indurisca rapidamente e l'eventuale congelamento intervenga solo quando esso ha raggiunto la necessaria solidità. Il calcestruzzo deve essere protetto da neve e pioggia per un mese e, durante il primo inverno, non deve venire a contatto con il sale antigelo.

In base alla normativa, la temperatura del calcestruzzo fresco non deve scendere al di sotto di determinati valori, in funzione della temperatura dell'aria e della quantità o del tipo di cemento (**tab. 1**).

Ove si adottino misure di riscaldamento del calcestruzzo fresco, fatta eccezione per l'uso del vapore, la temperatura del calcestruzzo fresco non deve superare i +30 °C. La temperatura del calcestruzzo fresco deve essere quindi pari ad almeno +5 °C e non superiore a +30 °C. Temperature oltre +30 °C inducono infatti una solidificazione e un indurimento troppo rapidi, provocano difficoltà di lavorazione, un ritiro eccessivo, una resistenza precoce alta e una resistenza finale bassa.

Per proteggere il calcestruzzo fresco, occorre quindi adottare i seguenti provvedimenti:

Tabella 1: temperature occorrenti per il calcestruzzo fresco

Contenuto/tipo di cemento	Temperatura dell'aria	Temperatura del calcestruzzo fresco
> 240 kg/m ³	Da +5 °C a -3 °C	Da > +5 °C a ≤ +30 °C
< 240 kg/m ³ o cementi NW	Da +5 °C a -3 °C	Da > = +10 °C a ≤ +30 °C
In generale	< -3 °C	Da +10 °C a ≤ +30 °C

Inoltre: il calcestruzzo fresco può congelarsi solo se prima la sua temperatura non è stata inferiore a +10 °C per 3 giorni o la resistenza alla compressione è pari a ≥ 5 N/mm².

Provvedimenti da adottare durante la produzione

- Riscaldare l'acqua o l'aggregato e non utilizzare mai aggregati gelati!
- Utilizzare cementi di classi di resistenza elevate che induriscono più rapidamente e sviluppano più calore dei cementi di classi di resistenza basse.
- Aumentare il contenuto di cemento per accelerare lo sviluppo della resistenza.
- Ridurre il rapporto acqua-cemento. Ciò provoca un indurimento e una presa più rapidi e un maggiore sviluppo di calore.
- In casi particolari, aggiungere degli acceleranti di presa di cui si sia precedentemente verificata l'idoneità. Per il cemento armato precompresso sono però vietati gli acceleranti di presa contenenti cloro.

Provvedimenti da adottare nel trasporto e nella gettata

- Le attrezzature per il trasporto devono essere isolate per evitare la sottrazione di calore e non vanno utilizzati nastri trasportatori o scivoli aperti.
- Il calcestruzzo preriscaldato deve essere possibilmente inserito in una cassaforma riscaldata e costipato immediatamente.
- Le casseforme devono essere tenute libere da neve e ghiaccio, per esempio, con aria calda o fiamme, mai con getti d'acqua.
- Non effettuare mai la gettata su strutture o fondi gelati.
- Nei primi 3 giorni mantenere la temperatura del calcestruzzo a circa + 10 °C e riscaldare gli spazi adiacenti.

9.2.6.7 Speciali tecniche di gettata

Si definiscono tecniche speciali di gettata quei procedimenti con una o più fasi di lavoro che differiscono dalla tradizionale preparazione e lavorazione del calcestruzzo.

Calcestruzzo sotto vuoto

Per calcestruzzo sotto vuoto si intende un procedimento, nel quale, all'interno del calcestruzzo, si crea una depressione mentre contemporaneamente la pressione atmosferica agisce sulla superficie. In tal modo al calcestruzzo fresco viene sottratta una parte dell'acqua non occorrente per l'idratazione (**fig. 1**).

Effettuando questo speciale trattamento sul calcestruzzo fresco si riduce, per esempio, la formazione di fessurazioni da ritiro e si ottengono superfici compatte e a prova di usura, oltre a raggiungere molto presto solidità elevate che consentono di ridurre i tempi di disarmo, di utilizzare presto la superficie e garantire al calcestruzzo una notevole resistenza al gelo.

Il calcestruzzo fresco viene innanzitutto posto in opera, costipato e pareggiato, quindi sulla superficie vengono posti dei tappeti filtranti di materiale sintetico provvisti di bolle d'aria sul lato a contatto con il calcestruzzo. I minuscoli fori dei tappeti filtranti assorbono l'acqua in eccesso. Sui tappeti filtranti vengono posti dei "tappeti sotto vuoto", cioè degli speciali tessuti sintetici impermeabili all'acqua e all'aria, che con un flessibile vengono collegati a un apparecchio per vuoto (pompa per vuoto) che crea una depressione tra la struttura di calcestruzzo e il tappeto sotto vuoto. La differenza tra la depressione e la normale pressione forma una pressione di circa $0,09 \text{ N/mm}^2$ che comprime il calcestruzzo.

L'acqua eccedente viene premeva attraverso i fori dei canali di drenaggio che si formano tra il tappeto sotto vuoto e il tappeto filtrante, quindi viene convogliata alla pompa per vuoto attraverso il flessibile e infine raccolta in un contenitore. Al termine viene rimosso l'impianto sotto vuoto e si procede al pareggio della superficie di calcestruzzo e alla stagionatura (**fig. 2**).

Questo procedimento viene adottato, per esempio, nella produzione di lastre stradali, di ponti nonché di pavimenti resistenti all'usura per costruzioni industriali e parcheggi e, data l'elevata qualità, rende superfluo l'inserimento di un masetto. Grazie alla scarsa profondità di penetrazione dell'acqua, questo procedimento è adatto anche alla costruzione di impianti di depurazione e bacini di raccolta d'acqua.

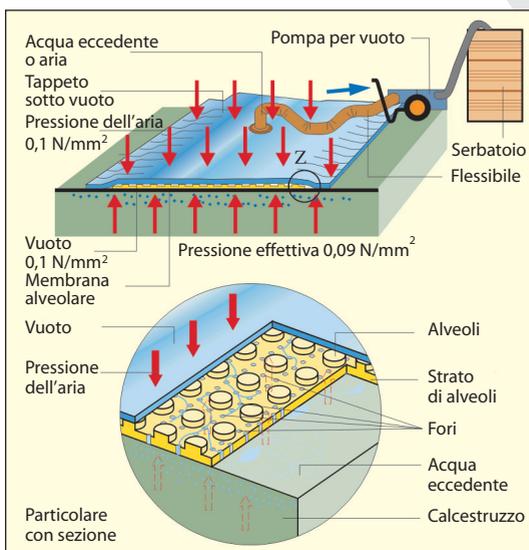


Figura 1: principio del procedimento sotto vuoto.



Posa in opera e pareggio del calcestruzzo



Posa del tappeto filtrante e del tappeto sotto vuoto



Lisciatura della superficie trattata

Figura 2: fasi di lavoro del procedimento sotto vuoto.



Figura 1: posa di calcestruzzo subacqueo.

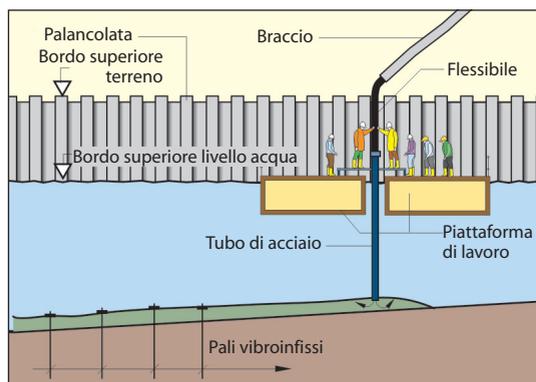


Figura 2: posa di calcestruzzo subacqueo (schema).



Figura 3: calcestruzzo spruzzato a umido nella costruzione di gallerie.

Calcestruzzo subacqueo

Il calcestruzzo subacqueo viene utilizzato per le opere posate in acqua. Il calcestruzzo fresco viene posto in opera sott'acqua in maniera che, prima che inizi l'indurimento, non si verifichi il dilavamento della pasta di cemento o delle particelle più sottili.

Occorre quindi un calcestruzzo con una buona presa, un contenuto minimo di cemento di 350 kg/m^3 , un rapporto acqua-cemento $\leq 0,60$ e una consistenza da tenera a fluida consistenza. In generale, per questo calcestruzzo, vengono impiegati cementi della classe di resistenza $\geq 42,5 \text{ R}$. In presenza di un aggregato con una composizione adeguata, questo tipo di calcestruzzo è impermeabile. Dato il rischio di un elevato accumulo d'acqua nella zona del calcestruzzo fresco vicina alla superficie, non lo si deve costipare.

La messa in opera deve essere rapida e con un flusso costante. Il calcestruzzo subacqueo si può gettare, per esempio, con un sistema di pompaggio (fig. 1), mediante il quale il calcestruzzo fresco viene spinto nella cassaforma per mezzo della pressione di una pompa. A tale scopo, vengono utilizzate potenti pompe per calcestruzzo dotate di braccio. Per consentire lo scarico sul fondo dello scavo, all'estremità del flessibile viene fissato un tubo di acciaio di lunghezza superiore alla profondità dell'acqua, grazie al quale si impedisce che la pressione della pompa sollevi il tubo di mandata dalla massa del calcestruzzo (fig. 2).

L'avanzamento delle gettate viene sorvegliato per mezzo di un dispositivo di rilevamento, per esempio, con laser.

Il calcestruzzo subacqueo viene impiegato per opere e parti di strutture, nelle quali non è opportuno un prosciugamento dell'acqua, per esempio, per la costruzione di solette di gallerie e nelle opere portuali, per inserire pali sott'acqua, per il consolidamento di banchine e per gli impianti di depurazione.

Calcestruzzo spruzzato

Il calcestruzzo spruzzato viene posto in opera con il metodo a secco (spruzzatura) o a umido. Per il **calcestruzzo spruzzato a secco**, una miscela a secco composta da additivo e cemento viene sparata con aria compressa attraverso tubi flessibili e prima di uscire dal tubo, viene addizionata con acqua, quindi viene spruzzata sulla superficie sfruttando la forza centrifuga prodotta dal sistema di spruzzatura.

Per il **calcestruzzo spruzzato a umido**, anziché una miscela a secco, viene utilizzato calcestruzzo pronto. Il calcestruzzo spruzzato è adatto per la posa di strati sottili su superfici con qualsiasi inclinazione, per esempio, nei lavori di risanamento, per la protezione di scarpate e nella costruzione di gallerie (fig. 3).

9.3 Calcestruzzo indurito

Per calcestruzzo indurito si intende il calcestruzzo sottoposto a indurimento. Esso deve soddisfare i requisiti precedentemente stabiliti per l'elemento da costruirsi (fig. 1).

9.3.1 Proprietà

Poiché il calcestruzzo ha il compito di trasmettere i carichi, lo stesso deve presentare una resistenza alla compressione adeguata alla sollecitazione. Se sottoposto a trazione mediante flessione, il calcestruzzo accusa delle fessurazioni o si rompe. Le deformazioni dovute alle sollecitazioni provocano il cosiddetto **spostamento** mentre le deformazioni dovute a riduzione del volume del calcestruzzo durante il procedimento di idratazione sono denominate **ritiro**.

Per migliorare la resistenza alla formazione di fessurazioni dovute a deformazioni, si può impiegare il **calcestruzzo fibroso**. Si tratta di un calcestruzzo nel quale all'aggregato vengono aggiunte fibre di acciaio, di vetro, di materie plastiche o di carbonio.

Le fibre non possono sostituire l'armatura, ma riducono le fessurazioni e aumentano la resistenza alla trazione del calcestruzzo o dell'aggregato. Il prodotto è ideale per molte applicazioni particolari, fra l'altro, per realizzare i giunti delle pavimentazioni esterne esposte alle intemperie. Infatti, la struttura del calcestruzzo deve essere compatta, in misura tale da garantire la protezione contro la corrosione. Quando è utilizzato per elementi esterni, è richiesta anche la **resistenza al gelo**. Il calcestruzzo ben costipato presenta una scarsa porosità, ma per ottenere una sufficiente **impermeabilità all'acqua**, occorre l'aggiunta di additivi e la scelta di un aggregato con proprietà granulometriche adeguate.

A causa del peso specifico elevato, il calcestruzzo gode di una scarsa capacità di isolamento termico, ma vanta una buona attenuazione di suoni e rumori. La rigidità della sua struttura comporta un insufficiente isolamento dalle vibrazioni meccaniche e dal rumore da calpestio, per esempio, nei solai tra un piano e l'altro degli edifici.

La **resistenza alla compressione** è la principale caratteristica del calcestruzzo ed è indipendente dalla classe di resistenza del cemento, dal rapporto acqua-cemento e dalla composizione dell'aggregato.

Il calcestruzzo con aggregati a grana grossa presenta meno punti di contatto delle particelle e quindi, rispetto agli aggregati a grana mista, si formano più cavità (alveoli) che occorre riempire con pasta di cemento. È dunque opportuno scegliere un aggregato che rientri nella curva granulometrica 3, poiché, grazie ai molti punti di contatto delle particelle, risulta poco poroso.



Il calcestruzzo nell'edilizia residenziale

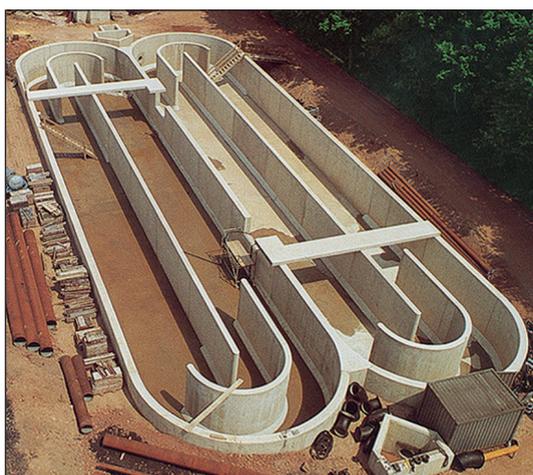


Il calcestruzzo nelle opere civili



Il calcestruzzo nelle infrastrutture

Figura 1: esempi di impiego del calcestruzzo.



Bacino di depurazione in cls impermeabile



Carreggiata in cls resistente a gelo e sale



Fossa biologica per fanghi di sedimentazione in cls con elevata resistenza agli agenti chimici

Figura 1: impiego di calcestruzzo con particolari caratteristiche.

L'indurimento inizia 12 ore dopo la miscela del calcestruzzo. Utilizzando un cemento CEM 32,5 R e a una temperatura esterna di +20 °C, dopo 3 giorni, raggiunge una resistenza tra il 50 e il 60%; dopo 7 giorni, la resistenza va dal 65 all'85% e, dopo 28 giorni, il calcestruzzo deve aver raggiunto il **livello minimo di resistenza alla compressione**. Un ulteriore indurimento è possibile, ma, alla luce delle sollecitazioni ammesse per il calcestruzzo, non viene più preso in considerazione.

Calcestruzzi con particolari caratteristiche

Se le strutture presentano particolari requisiti, quali, per esempio, l'impermeabilità all'acqua oppure la resistenza alle sostanze chimiche o a forti sollecitazioni meccaniche, si utilizza un calcestruzzo delle classi di esposizione XD, XF, XA o XM (**fig. 1**).

Il **calcestruzzo impermeabile** (calcestruzzo WU) per elementi di spessore compreso tra i 10 e i 40 cm circa deve presentare una compattezza tale da garantire che l'acqua non penetri oltre i 50 mm. Per ottenere ciò, il rapporto acqua-cemento non deve essere superiore a 0,60 e, per elementi di maggior spessore, a 0,70.

Il **calcestruzzo con elevata resistenza al gelo** si utilizza laddove, in condizioni di umidità, è sottoposto a repentini passaggi dal gelo al disgelo. Se gli elementi subiscono inoltre l'azione del sale antigelo, si impiegherà un **calcestruzzo con elevata resistenza al gelo e al sale antighiaccio**. In entrambi i casi, occorre il calcestruzzo impermeabile. L'aggregato deve presentare un'elevata resistenza al gelo e il rapporto acqua-cemento non deve superare i valori limite previsti dalla norma. Eventualmente, occorrerà aggiungere una limitata quantità di additivi aeranti. Per il calcestruzzo fortemente soggetto all'azione del gelo e del sale, come, per esempio, nelle carreggiate stradali e nei parcheggi, si utilizzano cementi CEM I, CEM II di classe 32,5 N o CEM III di classe 42,5 N.

Il **calcestruzzo con elevata resistenza agli agenti chimici** è determinato dalla compattezza e dal rapporto acqua-cemento. Nel caso in cui gli elementi costruttivi siano sottoposti a forti sollecitazioni da SO_4 , per esempio, a causa di gas di combustione, terreni contaminati e scarichi industriali, è richiesto un cemento con elevata resistenza ai solfati.

Il **calcestruzzo per temperature d'impiego elevate sino a 250 °C** deve essere prodotto con aggregati, caratterizzati da scarsa dilatazione termica, come la pietra calcarea, per esempio. In tal caso, la lavorazione del calcestruzzo deve avere una durata doppia, come si richiede nelle condizioni più sfavorevoli, e, prima del primo riscaldamento, deve essere completamente essiccato.

Al fine di evitare la formazione di fessurazioni, il primo riscaldamento deve essere lento.

Il **calcestruzzo con elevata resistenza all'usura** deve sopportare sollecitazioni meccaniche particolarmente intense, generate, per esempio, da un forte traffico, dalla caduta di materiali, da forti correnti d'acqua contenente materiali solidi e da urti frequenti dovuti alla movimentazione di oggetti pesanti (**fig. 1**).

Gli aggregati di diametro massimo di 4 mm devono essere prevalentemente di quarzo o di materiali di durezza almeno equivalente. Per gli inerti più grossi, occorre usare pietrisco o aggregati prodotti artificialmente, dotati di un'elevata resistenza all'usura. In presenza di sollecitazioni particolarmente elevate, sono adatti aggregati duri, quali scorie o trucioli di metallo. Per tutti i tipi di aggregati, occorre che le particelle abbiano una superficie moderatamente ruvida e una forma schiacciata. L'aggregato deve essere possibilmente di grana grossa e prossima alla curva granulometrica A o, in caso di conglomerati a granulometria discontinua, deve collocarsi tra le curve B e U. Dopo la posa in opera, il calcestruzzo deve essere trattato per un tempo almeno doppio rispetto a quanto generalmente richiesto.



Figura 1: pavimento di magazzino in calcestruzzo resistente all'usura.

9.3.2 Classificazione del calcestruzzo indurito

Oltre al peso specifico e alla consistenza, il calcestruzzo è classificato anche in base alla resistenza alla compressione (classi di resistenza alla compressione) e alle condizioni ambientali (classi di esposizione).

9.3.2.1 Classi di resistenza alla compressione

La resistenza minima alla compressione richiesta si orienta in funzione dei requisiti che il calcestruzzo deve soddisfare nell'elemento costruttivo. Nella norma EN 206, il calcestruzzo è definito con l'abbreviazione C (concrete) e i vari tipi sono suddivisi in **classi di resistenza (tab. 1)**. L'assegnazione del calcestruzzo alla relativa classe si effettua mediante **prove di resistenza** su provini induriti con un processo di maturazione della durata di 28 giorni. In base alle norme UNI, salvo altrimenti stabilito, la resistenza alla compressione si accerta su provini cubici di 150 mm di lato mentre sono ammessi anche provini cilindrici di diametro di 150 mm e altezza di 300 mm. La rispettiva resistenza viene indicata come resistenza caratteristica, nei provini cilindrici, con $f_{ck, cyl}$ e, nei provini cubici, con $f_{ck, cube}$. Si tratta della resistenza che, secondo quanto previsto, sarà superata per difetto solo dal 5% di tutti i possibili valori di misura.

Tabella 1: classi di resistenza alla compressione del calcestruzzo ordinario e pesante

Classe di resistenza alla compressione	Minima resistenza caratteristica alla compressione di provini cilindrici $f_{ck, cyl}$ N/mm ²	Minima resistenza caratteristica alla compressione di provini cubici $f_{ck, cube}$ N/mm ²	Classe di resistenza alla compressione	Minima resistenza caratteristica alla compressione di provini cilindrici $f_{ck, cyl}$ N/mm ²	Minima resistenza caratteristica alla compressione di provini cubici $f_{ck, cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10	C45/55	45	55
C12/15	12	15	C50/60	50	60
C16/20	16	20	C55/67	55	67
C20/25	20	25	C60/75	60	75
C25/30	25	30	C70/85	70	85
CX30/37	30	37	C80/95	80	95
C35/45	35	45	C90/105	90	105
C40/50	40	50	C11/115	100	115

9.3.2.2 Classi di esposizione

Gli elementi in calcestruzzo sono esposti agli agenti esterni che possono provocare danni, per esempio, se un elemento in calcestruzzo è costantemente sottoposto a umidità e gelo, la struttura compatta del calcestruzzo si distrugge e l'armatura non è più protetta contro la corrosione. Anche gli agenti chimici, quali il sale antighiaccio o l'acqua di mare, possono comportare danni agli elementi costruttivi.

Nella composizione del calcestruzzo, occorre quindi tenere conto degli influssi cui l'elemento sarà successivamente sottoposto. Le varie condizioni ambientali si suddividono in sette classi, in funzione del tipo di effetto danneggiante, denominate **classi di esposizione**, abbreviate X (**tab. 1**).

1 Assenza di rischio di corrosione o aggressione (XO = no aggressione)	5 Attacco da gelo con o senza agenti disgelanti (XF = Freezing)
2 Corrosione dei ferri per carbonatazione (XC = Carbonation)	6 Corrosione del calcestruzzo da aggressione chimica (XA = Chemical Acid)
3 Corrosione dei ferri indotta dai cloruri, esclusa l'acqua di mare (XD = Deicing Salt)	7 Corrosione del calcestruzzo per sollecitazioni da usura (XM = Mechanical Abrasion)
4 Corrosione dei ferri indotta dai cloruri dell'ambiente marino (XS = Seawater)	

Tuttavia, poiché una struttura in calcestruzzo può anche essere esposta a diversi influssi, ciò si esprime con la combinazione di più classi di esposizione.

La norma stabilisce i limiti per quanto riguarda il contenuto minimo di cemento e il massimo rapporto acqua-cemento consentito per le classi di resistenza alla compressione da adottarsi affinché il calcestruzzo presenti le caratteristiche desiderate per un certo elemento (**tab. 1**).

Tabella 1: classi di esposizione e valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

Classe di esposizione	Descrizione dell'ambiente	Classe di resistenza alla compressione	Contenuto minimo di cemento in kg/m ³	Massimo rapporto acqua-cemento consentito	Elementi (esempi)
1 Assenza di rischio di corrosione o aggressione					
XO	Per calcestruzzo senza armatura	C8/10	—	—	Fondazioni (non esposte al gelo), elementi interni, senza armatura
2 Corrosione dei ferri per carbonatazione					
XC1	Secco/costante umido	C16/20	240	0,75	Elementi interni soggetti a umidità normale, inclusi cucine e bagni, con armatura
XC2	Umido, raramente secco	C16/20	240	0,75	Fondazioni, pareti di cantine sotto il piano terra, armate, platee di fondazione (senza gelo)
XC3	Umidità moderata	C20/25	260	0,65	Elementi esposti all'aria esterna, armati
XC4	Variabile secco e umido	C20/25	280	0,60	Elementi all'aperto, armati, con elevata resistenza alla penetrazione dell'acqua, pareti di cantina sopra il piano terra
3 Corrosione dei ferri indotta dai cloruri, esclusa l'acqua di mare					
XD1	Umidità moderata	C30/37	300	0,55	Elementi all'aperto, esposti al gelo (orizzontale) e alle nebbie di sali disgelanti
XD2	Umido, raramente secco	C35/45	320	0,50	
XD3	Variabile secco e umido	C35/45	320	0,45	Elementi all'aperto, esposti al gelo (verticale) e alle nebbie di sali disgelanti

Tabella 1 – Classi di esposizione e valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo					
Classe di esposizione	Descrizione dell'ambiente	Classe di resistenza alla compressione	Contenuto minimo di cemento in kg/m ³	Massimo rapporto acqua-cemento consentito	Elementi (esempi)
4 Corrosione dei ferri indotta dai cloruri dell'ambiente marino					
XS1	Ambiente costiero ma non a diretto contatto con l'acqua di mare	C30/37	300	0,55	Elementi esterni in prossimità della costa, per esempio piloni di dighe o sbarramenti
XS2	Sott'acqua	C35/45	320	0,50	Elementi in zone portuali, posti sempre sott'acqua, per esempio piani di fondazione di opere di sbarramento
XS3	Zone soggette a maree	C35/45	320	0,45	Muri di banchina in aree portuali, pareti di chiuse
5 Attacco da gelo con o senza agenti disgelanti					
XF1	Moderata saturazione d'acqua, senza agenti disgelanti	C25/30	280	0,60	Elementi esterni
XF2	Moderata saturazione d'acqua, con agenti disgelanti	C25/30	300	0,55	Elementi posti in ambienti esposti a nebbie o spruzzi di agenti disgelanti; se non XF4, elementi esposti a nebbie di acqua marina
		C35/45	320	0,50	
XF3	Elevata saturazione d'acqua, senza agenti disgelanti	C25/30	300	0,55	Contenitori d'acqua aperti, elementi posti nella zona di interazione dell'acqua dolce
		C35/45	320	0,50	
XF4	Elevata saturazione d'acqua, con agenti disgelanti	C30/37	320	0,50	Aree di circolazione trattate con agenti disgelanti, prevalentemente strutture orizzontali poste nella zona di spruzzo di aree di circolazione trattate con agenti disgelanti
6 Corrosione del calcestruzzo da aggressione chimica					
XA1	Debole aggressività chimica	C25/30	280	0,60	Pareti di cantine a piano terra e corpi impermeabili soggetti a debole aggressività chimica, contenitori di impianti di depurazione, serbatoi di liquami
XA2	Moderata aggressività chimica	C35/45	320	0,50	Pareti di cantine a piano terra e corpi impermeabili soggetti a moderata aggressività chimica, strutture in calcestruzzo a contatto con l'acqua di mare
XA3	Forte aggressività chimica	C35/45	320	0,45	Impianti di scarico industriale con acque reflue chimicamente aggressive, silos di fermentazione, torri di raffreddamento con deviazione dei fumi
7 Corrosione del calcestruzzo per sollecitazioni da usura					
XM1	Moderata sollecitazione da usura	C30/37	300	0,55	Pavimenti industriali portanti o di irrigidimento con sollecitazioni dovute a veicoli con pneumatici
XM2	Forte sollecitazione da usura	C30/37	300	0,55	Pavimenti industriali portanti o di irrigidimento con sollecitazioni dovute a carrelli elevatori con pneumatici ad aria o in gomma
		C35/45	320	0,45	
XM3	Fortissima sollecitazione da usura	C35/45	320	0,45	Superfici frequentemente attraversate da veicoli cingolati

9.4 Garanzia di qualità

Il calcestruzzo è sottoposto a costanti controlli, volti a garantirne la qualità, i quali sono effettuati sia dallo stabilimento di produzione del calcestruzzo preconfezionato sia dall'impresa edile. A tale scopo, è possibile installare propri laboratori di prova (controllo interno) (fig. 1) e anche incaricare laboratori esterni autorizzati. La garanzia di qualità comprende il controllo di qualità e di conformità.

9.4.1 Controllo di produzione

Nell'ambito del controllo di produzione, eseguito all'interno della fabbrica di calcestruzzo preconfezionato, un istituto di controllo autorizzato verifica innanzitutto l'idoneità del personale, l'immagazzinamento delle materie prime e i dispositivi di dosaggio e miscela. Vengono inoltre controllati gli strumenti per l'esecuzione delle prove del calcestruzzo.

Viene quindi steso un verbale riportante i risultati del controllo. Se tutti i requisiti per la produzione del calcestruzzo sono soddisfatti, alla fabbrica di calcestruzzo preconfezionato viene rilasciata una **certificazione** da parte di un organo di certificazione (fig. 2).

Nei **controlli di routine**, viene poi accertato il mantenimento dei presupposti per una produzione conforme alle norme.

9.4.2 Controllo di conformità

Il controllo della produzione all'interno della fabbrica di calcestruzzo preconfezionato comprende anche la verifica del calcestruzzo prodotto, il quale si configura come un controllo di conformità, nel quale si verifica che il calcestruzzo prodotto sia conforme ai requisiti fissati. La verifica viene effettuata con procedimenti normati e in base a un programma, stabilito precedentemente, distinguendo tra il controllo di conformità delle proprietà e il controllo di conformità della composizione e del calcestruzzo standard. Il controllo prevede:

per le proprietà:

- resistenza alla compressione;
- contenuto di cloruri;
- resistenza alla trazione;
- peso specifico;
- rapporto acqua-cemento;
- contenuto di cemento;
- consistenza;
- porosità.

In base alle norme UNI, in cantiere, l'impresa, oltre a controllare, per esempio, le impalcature, le casseforme e l'armatura, deve eseguire anche un controllo di conformità del calcestruzzo fornito.

Nella posa in opera di calcestruzzo standard, il controllo è circoscritto alla correttezza della posa e alla verifica delle bolle di consegna.

Nella posa in opera di calcestruzzo in base alla composizione o alle proprietà, occorre controllarne nel primo caso le proprietà e, nel secondo caso, la corretta posa in opera. Il tipo e la frequenza dei controlli dipendono dalla **classe di controllo** (tab. 1).



Figura 1: laboratorio di prova di una fabbrica di calcestruzzo preconfezionato.



Figura 2: marchio di certificazione tedesco.

per la composizione e il calcestruzzo standard:

- contenuto di cemento;
- valore nominale della particella più grossa;
- distribuzione o curva granulometrica;
- rapporto acqua-cemento;
- contenuto di additivi;
- consistenza.

Tabella 1: classi di controllo per calcestruzzo normale e pesante

	Classe di controllo 1	Classe di controllo 2	Classi di controllo 3
Resistenza alla compressione	$\leq C25/30$	$\geq C30/37$ e $\leq C50/60$	$\geq C55/67$
Classe di esposizione	X0, XC, XF1	XS, XD, XA XM \geq XF2	—
Particolari proprietà		Esempio calcestruzzo impermeabile subacqueo	—

9.4.2.1 Controllo di conformità del calcestruzzo fresco

La verifica della conformità del calcestruzzo fornito si svolge sia nella fabbrica di produzione sia in cantiere. Il tipo, l'entità e il momento in cui viene eseguito il controllo sono stabiliti dalle norme UNI in base alla definizione e alla classe di controllo del calcestruzzo (**tab. 1**). L'impresa deve disporre di un laboratorio di prova (controllo interno) mentre l'idoneità viene valutata da un organo di controllo autorizzato (controllo esterno).

Tabella 1: entità e frequenza dei controlli del calcestruzzo fresco				
Oggetto	Procedura	Frequenza dei controlli per classe		
		1	2	3
Bolla di consegna	Controllo visivo	Ogni veicolo di fornitura		
Consistenza	Controllo visivo	A campione	Al primo montaggio, alla produzione di provini, in caso di dubbi	
	In base alle norme UNI ed EN 12350	Solo in caso di dubbi		
Peso specifico del calcestruzzo fresco	In base alle norme UNI ed En 12350	Alla produzione di provini e in caso di dubbi		
Omogeneità del calcestruzzo	Controllo visivo	A campione	Ogni veicolo di fornitura	
	Confronto proprietà	Solo in caso di dubbi		

Se il calcestruzzo preconfezionato viene consegnato in cantiere in base alla composizione, il controllo viene eseguito dall'impresa edile mentre il calcestruzzo scelto in base alle proprietà viene verificato nella fabbrica di produzione.

9.4.2.2 Controllo di conformità del calcestruzzo indurito

Le verifiche di qualità servono ad accertare che il calcestruzzo possieda le caratteristiche occorrenti. Il controllo dell'indurimento fornisce un riferimento circa la resistenza del calcestruzzo in opera in un determinato momento e viene eseguito con provini oppure direttamente sulla struttura.

Verifica dell'indurimento con provini

Nelle prove di resistenza in base alle norme UNI, i provini vengono compressi in una pressa finché si distruggono, visualizzando su un indicatore o un display la forza necessaria per distruggerli (**fig. 1**). In tal modo, si rileva la resistenza alla compressione, cioè il rapporto tra la forza applicata e l'unità di superficie in N/mm^2 . La resistenza alla compressione si verifica con numerosi provini.

I provini sono generalmente di forma cubica con un lato di 15 cm, ma la norma EN 206 prevede anche provini cilindrici di diametro di 150 mm e lunghezza di 300 mm (**fig. 2**).

La resistenza alla compressione accertata con la prova, è definita con la sigla $f_{ck, cube}$ per i provini cubici e $f_{ck, cyl}$ per i provini cilindrici. La prova di resistenza alla compressione si esegue normalmente dopo 28 giorni e il valore ottenuto è determinante ai fini dell'inserimento del calcestruzzo nelle classi di resistenza.

Famiglie di calcestruzzi

La verifica del calcestruzzo si può semplificare e migliorare, raggruppandolo in famiglie, soprattutto quando si impiegano vari tipi di calcestruzzo con composizioni diverse.



Figura 1: prova di indurimento.



Figura 2: forme dei provini.

Le variazioni delle proprietà, intervenute durante la produzione, si possono così rilevare prima di quanto non avvenga con la verifica distinta dei singoli tipi di calcestruzzo. I criteri di formazione di una famiglia di calcestruzzi sono, per esempio, l'utilizzo di cementi dello stesso tipo, la classe di resistenza e la provenienza, aggregati di tipo e provenienza identici.

Anche i calcestruzzi con una gamma limitata di classi di resistenza, per esempio da C8/10 a C25/30, possono essere raggruppati nella stessa famiglia e messi in relazione tra loro. A tale scopo, occorre stabilire, per ogni famiglia, un calcestruzzo di riferimento in base ai risultati del quale si convertiranno i risultati delle prove sugli altri tipi compresi nella stessa famiglia.

Prova di indurimento sugli elementi

Se il test di resistenza alla compressione del calcestruzzo si effettua sull'elemento finito, è possibile estrarre dei campioni e tagliarli a cubetti. Un'ulteriore possibilità consiste nel prelevare dei provini cilindrici mediante carotaggio (**fig. 1**) e, dopo averne livellato la superficie, porli nella pressa per testarne la resistenza alla compressione.

Nelle prove non distruttive, si misura la durezza superficiale dell'elemento strutturale finito per mezzo dello sclerometro. A tale scopo, si pone l'asta di percussione che sporge dallo strumento in posizione perpendicolare rispetto alla superficie di calcestruzzo (**fig. 2**) che eventualmente si sarà precedentemente resa uniforme mediante raschiatura.

Esercitando una pressione contro la superficie da provare, una molla fa scattare l'asta di percussione che batte contro il calcestruzzo e rimbalza indietro. A questo punto, con lo sclerometro ancora premuto, si legge la corsa di rimbalzo.

Maggiore è la corsa di rimbalzo, tanto più duro sarà il calcestruzzo. Con questo metodo, dalla durezza superficiale si deduce la resistenza alla compressione del calcestruzzo.



Figura 1: prelievo di una carota.

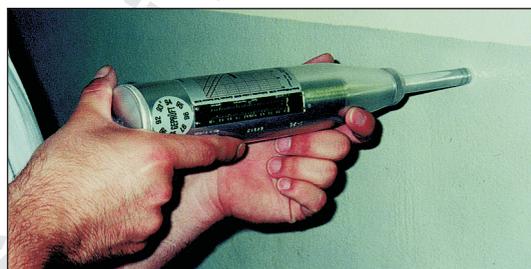


Figura 2: prova con lo sclerometro.

Esercizio:

- 1 Illustrate il procedimento di indurimento e lo sviluppo della resistenza del calcestruzzo.
- 2 Che incidenza ha una quantità eccessiva d'acqua sulle proprietà del calcestruzzo?
- 3 Con quali metodi si può modificare la consistenza del calcestruzzo?
- 4 Quali metodi si adottano per la verifica della consistenza plastica e quali per la consistenza rigida?
- 5 Spiegate perché i componenti del calcestruzzo si aggiungono in frazioni di massa e non di spazio.
- 6 In base a quali criteri si sceglie il calcestruzzo adatto?
- 7 Quale importanza ha a questo proposito l'appartenenza del calcestruzzo a una certa classe di esposizione?
- 8 Quali misure occorre adottare nella consegna del calcestruzzo preconfezionato al cantiere?
- 9 Quale importanza ha l'appartenenza di un cantiere a una classe di sorveglianza?
- 10 Illustrate le misure, necessarie prima del getto del calcestruzzo.
- 11 A cosa bisogna prestare attenzione quando si effettua la compattazione del calcestruzzo?
- 12 Che importanza ha il trattamento del calcestruzzo?
- 13 Illustrate i vari tipi di trattamento successivo del calcestruzzo.
- 14 Quali vantaggi offre il procedimento a vuoto?
- 15 Cosa si intende per calcestruzzo standard?
- 16 Quando si effettua la prova di resistenza alla compressione?

9.5 Calcestruzzo leggero

Il calcestruzzo con un peso specifico a secco non superiore a 2 kg/m^3 , composto da un aggregato di struttura compatta o porosa, nella norma DIN 1045 è indicato con la sigla LB e, nella norma EN 206, con la sigla LC.

Il calcestruzzo leggero possiede una porosità notevolmente superiore rispetto al calcestruzzo normale, dal quale si distingue inoltre per la composizione e le proprietà.

9.5.1 Tipi di calcestruzzo leggero

Esistono vari tipi di calcestruzzo leggero di diversa porosità (fig. 1), in funzione degli utilizzi, quali il calcestruzzo cellulare, il calcestruzzo alveolare con aggregati compatti o porosi e il calcestruzzo leggero a struttura compatta e aggregato poroso.

Calcestruzzo cellulare

Con il **calcestruzzo cellulare** si realizzano, per esempio, blocchi di muratura, lastre di costruzione e lastre armate per solai e tetti (fig. 2).

Calcestruzzo leggero alveolare

Il calcestruzzo leggero alveolare si ottiene utilizzando aggregati con particelle di dimensioni identiche o leggermente differenti. La quantità di pasta di cemento deve essere sufficiente ad avvolgere le particelle mentre gli spazi tra una particella e l'altra non vengono riempiti.

- Il **calcestruzzo leggero alveolare con aggregati porosi**, grazie alle sue buone proprietà isolanti e allo scarso peso, viene impiegato nella produzione di pannelli in calcestruzzo leggero armato per lastre per tetti e solai, blocchi di muratura e pannelli per pareti divisorie leggere.
- Il **calcestruzzo leggero alveolare con aggregato compatto** serve a produrre, per esempio, tubi di drenaggio e blocchi di muratura.

Calcestruzzo leggero e calcestruzzo leggero armato a struttura compatta e aggregati porosi

Il calcestruzzo leggero a struttura compatta e aggregati porosi è disciplinato dalle norme UNI e viene utilizzato nell'edilizia abitativa come calcestruzzo leggero non armato, calcestruzzo leggero armato e calcestruzzo leggero precompresso.

Il calcestruzzo leggero armato e il calcestruzzo leggero precompresso sono definiti anche calcestruzzo leggero da costruzione. In calcestruzzo leggero a struttura compatta si realizzano elementi di pareti, solai e pareti e, dato il peso scarso, si possono produrre anche elementi prefabbricati di grandi dimensioni (fig. 3).

9.5.2 Composizione

Il calcestruzzo leggero a struttura compatta e aggregati porosi si produce con aggregati leggeri (pag. 100), cemento e acqua. La miscela del calcestruzzo leggero si effettua sempre in base a un test di idoneità. La particella più grande degli aggregati leggeri deve avere un diametro non superiore a 25 mm.



Figura 1: calcestruzzo leggero con porosità diversa.



Figura 2: posa di lastre per tetti in calcestruzzo cellulare.



Figura 3: elementi in calcestruzzo leggero da costruzione.

Per il calcestruzzo leggero più resistente si usano aggregati di dimensioni non superiori a 16 mm.

L'aggregato leggero viene aggiunto separatamente in funzione dei gruppi di particelle. Sostituendo una parte dell'aggregato a grana grossa con un aggregato leggero a grana fine (sabbia leggera) o con sabbia naturale, si può ottenere un ulteriore aumento della resistenza alla compressione, ma a fronte di un incremento del peso specifico del calcestruzzo leggero (**tab. 1**).

Per ragioni di lavorabilità, il contenuto di cemento del calcestruzzo non armato deve essere pari ad almeno 200 kg per m³ di calcestruzzo compresso. Con un aumento del contenuto di cemento, per esempio, del 20% si può aumentarne la resistenza di circa il 10%. A causa del calore sviluppato durante l'indurimento, cui si associa una scarsa dispersione del calore, il contenuto di cemento non deve superare i 450 kg/m³. Eventuali riduzioni della quantità di cemento, possibili nella composizione del calcestruzzo normale, nel caso, per esempio, del cemento della classe di resistenza 42,5 R, non sono consentite. Se gli elementi in calcestruzzo leggero armato o in calcestruzzo leggero precompresso sono esposti a effetti corrosivi, come, per esempio, in caso di umidità variabile o di gas aggressivi, il calcestruzzo leggero deve essere impermeabile.

Dato il forte potere assorbente dell'aggregato, il calcestruzzo leggero richiede una maggiore quantità d'acqua rispetto al calcestruzzo normale mentre la quantità d'acqua occorrente per l'indurimento del cemento è approssimativamente pari a quella del calcestruzzo normale. Inoltre, al calcestruzzo leggero va aggiunta la quantità d'acqua che l'aggregato leggero è in grado di assorbire nell'arco di 30 minuti. Con una quantità d'acqua troppo scarsa, esiste il pericolo della "evaporazione". Per proteggere contro la corrosione l'armatura, che può essere prodotta con acciaio in barre e reti elettrosaldate, occorre attenersi a una quantità minima di cemento di 300 kg/m³ di calcestruzzo finito.

Dato l'elevato potere assorbente degli aggregati, occorre un maggiore dosaggio degli additivi, per esempio fluidificanti, rispetto al calcestruzzo normale.

9.5.3 Proprietà

Peso specifico

Il calcestruzzo leggero armato e il calcestruzzo leggero precompresso sono suddivisi in 6 classi di peso specifico da 0,8 kg/m³ a 2 kg/m³. La definizione delle classi di peso specifico corrisponde al limite superiore del relativo peso specifico a secco (**tab. 2**) che si rileva mediante miscele di prova, per le quali si utilizza un aggregato essiccato a 105 °C.

Isolamento termico

L'isolamento termico dipende dal peso specifico del calcestruzzo leggero (**tab. 3**). Più aria contiene e più piccoli sono gli alveoli, tanto maggiore sarà la capacità di isolamento termico che, nel calcestruzzo leggero, è da 3 a 5 volte superiore al calcestruzzo normale.

Resistenza al fuoco

La resistenza al fuoco si basa sull'isolamento termico del calcestruzzo leggero. Riducendo la conduttività termica, le inclusioni d'aria garantiscono una migliore protezione dell'armatura contro il surriscaldamento.

Resistenza al gelo e al sale antigelo

La resistenza al gelo e al sale antigelo del calcestruzzo leggero a struttura compatta corrisponde a quella del calcestruzzo normale. Nel calcestruzzo leggero a cellule aperte, l'acqua infiltratasi nelle cellule si espande senza provocare danni.

Tabella 1: valori di riferimento per le classi di resistenza e peso specifico del calcestruzzo leggero

Classe di resistenza	Classe di peso specifico	
	Con sabbia naturale	Con sabbia leggera
LC 8/9	—	da 1,0
LC 8/9	da 1,4	min 1,2
LC 16/18	min 1,4 o min 1,6	min 1,2 o min 1,4
LC 25/28	min 1,6	min 1,4
LC 35/38	min 1,4 o min 1,6	min 1,4 o min 1,6
LC 40/44	min 1,6	min 1,6

Tabella 2: classi di peso specifico del calcestruzzo leggero armato

Classi di peso specifico	Valori limite del peso specifico a secco in kg/dm ³
D 1,0	≥ 0,80 e ≤ 1,00
D 1,2	> 1,00 e ≤ 1,20
D 1,4	> 1,20 e ≤ 1,40
D 1,6	> 1,40 e ≤ 1,60
D 1,8	> 1,60 e ≤ 1,80
D 2,0	> 1,80 e ≤ 2,00

Tabella 3: valori di calcolo della conduttività termica

Classi di peso specifico	Valori di calcolo della conduttività termica in W/m · K
D 1,0	0,49
D 1,2	0,62
D 1,4	0,79
D 1,6	1,0
D 1,8	1,3
D 2,0	1,6

I valori si applicano solo agli aggregati a struttura porosa senza aggiunta di sabbia di quarzo

Resistenza alla compressione

Mentre, nel calcestruzzo normale, la resistenza alla compressione è determinata dalla durezza del cemento e non dell'aggregato, nel calcestruzzo leggero, essa dipende dalla durezza degli aggregati.

Poiché, nel calcestruzzo leggero, il cemento raggiunge la resistenza alla compressione dell'aggregato già dopo 7 giorni, successivamente la resistenza alla compressione aumenta in misura irrilevante.

Il calcestruzzo leggero è suddiviso in 14 gruppi di resistenza (**tab. 1**).

Tabella 1: classi di resistenza alla compressione del calcestruzzo leggero (in base alla norma EN 206)

Classe di resistenza alla compressione	Resistenza alla compressione di provini cilindrici $f_{ck,cyl}$	Resistenza alla compressione di provini cubici $f_{ck,cube}$		
Applicazione				
LC 8/9	8	9	Per elementi strutturali non armati ⁽¹⁾	Solo per carichi prevalentemente fermi
LC 12/13	12	13	Calcestruzzo leggero non armato e armato	
LC 16/18	16	18		
LC 20/22	20	22		
LC 25/28	25	28		
LC 30/33	30	33	Calcestruzzo leggero non armato, armato e precompresso	Anche per carichi non prevalentemente fermi
LC 35/38	35	38		
LC 40/44	40	44		
LC 45/50	45	50		
LC 50/55	50	55		
LC 55/60 ⁽²⁾	55	60		
LC 60/66	60	66		
LC 70/77	70	77		
LC 80/88	80	88		

⁽¹⁾ Nel calcestruzzo leggero armato, solo per elementi senza carico.

⁽²⁾ Per calcestruzzo leggero resistente a forti pressioni.

9.5.4 Lavorazione

Il calcestruzzo leggero si lavora come il calcestruzzo normale, ma, a causa dello scarso peso, quando viene gettato, non si distribuisce bene quanto il calcestruzzo normale nella cassaforma. Inoltre, la superficie è più difficile da rasare rispetto al calcestruzzo normale. Per quanto riguarda la lavorazione del calcestruzzo leggero, occorre prestare attenzione a quanto segue.

- Data la porosità dell'aggregato, lo strato copriferro deve essere in genere di 0,5 cm più spesso rispetto al calcestruzzo normale.
- Rispetto al calcestruzzo normale, i punti della gettata devono essere più vicini tra loro.
- Gli strati del getto non devono essere più alti di 50 cm.
- Rispetto al calcestruzzo normale, dimezzare la distanza tra i punti di costipazione, poiché nel calcestruzzo leggero le vibrazioni hanno una minore diffusione.
- Abbreviare i tempi di vibrazione a causa del rischio di separazione, poiché l'aggregato a grana grossa presenta una tendenza al flottaggio.
- Particolarmente importante è il trattamento successivo, poiché, data la scarsa conduttività termica, il calore di idratazione non si può sottrarre tanto rapidamente. Tra la superficie esterna e l'anima dell'elemento strutturale si crea quindi un gradiente termico che può provocare fessurazioni.

Esercizio:

- 1 Illustrate i vari tipi di calcestruzzo leggero.
- 2 In cosa si distingue il calcestruzzo leggero dal calcestruzzo normale per quanto riguarda la composizione?
- 3 Cosa si intende per calcestruzzo leggero da costruzione?
- 4 Per quali campi di utilizzo è adatto il calcestruzzo leggero?
- 5 Per quali proprietà il calcestruzzo leggero si distingue dal calcestruzzo normale?
- 6 Motivate le regole per l'aggiunta di cemento e acqua al calcestruzzo leggero.
- 7 In cosa la resistenza del calcestruzzo leggero si differenzia da quella del calcestruzzo normale?
- 8 Illustrate le regole da rispettare nella lavorazione del calcestruzzo leggero.
- 9 Spiegate perché occorre una particolare cura nel trattamento successivo del calcestruzzo leggero.

10 Costruzioni in cemento armato

Per **costruzione in cemento armato** si intende la realizzazione di opere o di strutture in calcestruzzo irrobustito con armature interne d'acciaio (**fig. 1**). Il cemento armato può essere gettato in opera o utilizzato per realizzare elementi prefabbricati. Gli elementi in cemento armato devono avere una portata sufficiente e soddisfare rigorosi **requisiti fisico-tecnici** e **normativi**, oltre a essere di forma gradevole ed economici dal punto di vista della produzione e manutenzione.

10.1 Cemento armato

Il cemento armato è un materiale composto che deve la sua portata all'interazione fra acciaio e calcestruzzo. Gli inserti in acciaio, denominati **armatura**, possono consistere in elementi d'acciaio a sezione circolare (dolce, semiduro, duro) caratterizzati da nervature trasversali o elicoidali che ne migliorano l'aderenza, denominati: barre, tondini o "ferri" e/o in reti elettrosaldate. L'armatura assorbe gli sforzi di trazione, aumenta la resistenza alla compressione del calcestruzzo e limita le fessurazioni nella struttura; dal canto suo, il calcestruzzo è in grado di assorbire solo la forza di compressione, determina la forma dell'elemento strutturale, protegge l'armatura dalla ruggine e ha una funzione di protezione antincendio.

I presupposti per un'interazione duratura tra l'acciaio e il calcestruzzo sono garantiti, per esempio:

- dal fatto che, a temperature normali, l'acciaio e il calcestruzzo hanno un coefficiente di dilatazione termica quasi identico;
- dall'aderenza (adesione) tra calcestruzzo e armatura che, insieme, presentano un'ottima resistenza alle sollecitazioni di attrito e di taglio (immorsatura della superficie di acciaio con il calcestruzzo);
- dalla protezione contro la corrosione dell'armatura assicurata dal calcestruzzo (strato copriferro).



Figura 1: strutture in cemento armato.

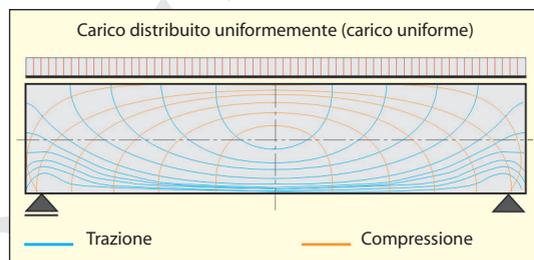


Figura 2: tensioni (traiettorie) in una trave di cemento armato.

I requisiti minimi per i materiali e la relativa lavorazione sono prescritti dalle norme UNI relative alle strutture portanti in calcestruzzo, cemento armato e cemento armato precompresso. Sono requisiti essenziali:

- il rispetto delle classi di resistenza minima in funzione delle classi di esposizione;
- l'attenersi ai valori limite per quanto riguarda il contenuto di cemento e il rapporto acqua-cemento;
- la particella più grossa dell'aggregato non deve essere superiore a 1/3 della dimensione più piccola dell'elemento;
- la maggior parte delle particelle dell'aggregato deve essere più piccola della distanza tra i tondini dell'armatura o della distanza tra l'armatura e la cassaforma;
- la superficie dell'acciaio di armatura deve essere priva di ruggine, olio, grasso e altre impurità nonché esente dal ghiaccio.

Alle diverse sollecitazioni (azioni) cui sono soggetti gli elementi strutturali di un'opera corrispondono delle reazioni che generano diverse tensioni. La maggior parte degli elementi in cemento armato, quali, per esempio, travi, solette e travi a T, è esposta a sollecitazioni esterne di flessione, con la conseguente generazione di momenti flettenti e forze trasversali che provocano, all'interno della trave, sollecitazioni di trazione, compressione e taglio. Queste sollecitazioni si presentano insieme e il loro andamento si può raffigurare mediante linee che riproducono le principali direzioni

delle tensioni (traiettorie) (**fig. 2, pag. 314**). L'armatura deve essere quindi montata in funzione del flusso di forza delle sollecitazioni di trazione, cosa possibile solo mediante approssimazione.

Per il dimensionamento delle costruzioni in cemento armato, si parte da ipotesi alle quali si possono applicare i procedimenti di calcolo adottati per la statica. In presenza di una flessione semplice, si generano una zona di compressione e una zona di trazione, laddove, nella zona di trazione, l'acciaio subisce una dilatazione e, nella zona di compressione, il calcestruzzo subisce uno schiacciamento (**fig. 1**).

La resistenza del composto garantisce deformazioni identiche in risposta alla sollecitazione esterna. Poiché tuttavia l'acciaio possiede un'elasticità nettamente superiore al calcestruzzo, quest'ultimo, come conseguenza della tensione dell'acciaio presente nella zona di trazione, può accusare delle fessurazioni. Affinché non risultino pregiudicati la protezione contro la ruggine e l'aspetto del manufatto, è prescritto un contenimento delle ampiezze delle fessurazioni, ottenibile, per esempio, mediante un'armatura minima, la riduzione della tensione ammessa per l'acciaio, la limitazione del diametro e della spaziatura dei ferri.

La portata e la resistenza degli elementi in cemento armato si possono aumentare scegliendo un calcestruzzo di classe di resistenza superiore.

10.1.1 Posizione e forma dell'armatura

Per realizzare l'armatura, si presuppone la conoscenza della direzione delle forze negli elementi in cemento armato. La posizione e la forma dell'armatura dipendono dalla sollecitazione e devono essere stabilite per ogni elemento.

Armatura di elementi strutturali sollecitati a flessione

All'interno di un elemento strutturale soggetto a sollecitazioni di flessione, come, per esempio, l'architrave di una porta (trave), si creano momenti flettenti e forze trasversali. Osserviamo l'architrave della porta dell'esempio, costituito da una trave su due pilastri.

Questo esempio semplificato si definisce sistema statico (**fig. 2**).

In questo architrave, i momenti flettenti sono maggiori al centro della trave e diminuiscono in direzione degli appoggi. La trave si flette, comprimendosi nella parte superiore. Ne deriva una pressione, chiamata anche flessione da compressione. Pertanto, questa parte si chiamerà zona di compressione. Nella parte inferiore, la trave si allunga. Si parla qui di trazione o flessione da trazione. Questa parte si chiamerà dunque zona di trazione (**fig. 2**).

Le forze trasversali hanno un andamento trasversale (ad angolo retto) rispetto all'asse della trave. Nel caso di una trave il cui carico sia distribuito uniformemente su due pilastri, le forze trasversali sono maggiori sugli appoggi e diminuiscono verso il centro della trave, sino a raggiungere lo zero. Le forze trasversali generano nella trave sollecitazioni di taglio longitudinali in senso longitudinale e sollecitazioni di taglio trasversali in senso trasversale, le quali, insieme, danno la sollecitazione di taglio. Quest'ultima è obliqua rispetto all'asse della trave ed è definita spinta. La spinta genera sollecitazioni di trazione in senso obliquo (**fig. 1, pag. 316**). Le forze di spinta vengono assorbite da staffe perpendicolari isolate o congiuntamente a ferri piegati verso l'alto oppure da staffe inclinate. Inoltre, spesso le distanze tra le staffe sono minori in direzione dell'appoggio (**fig. 3, pag. 316**).

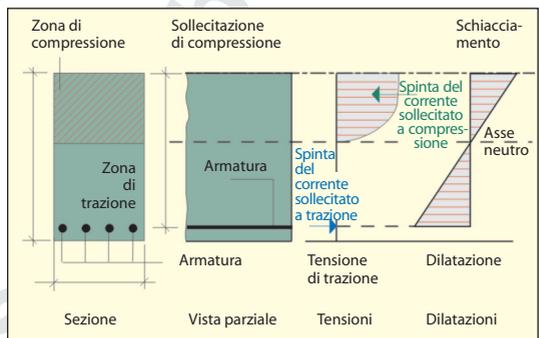


Figura 1: tensioni in presenza di flessione semplice.

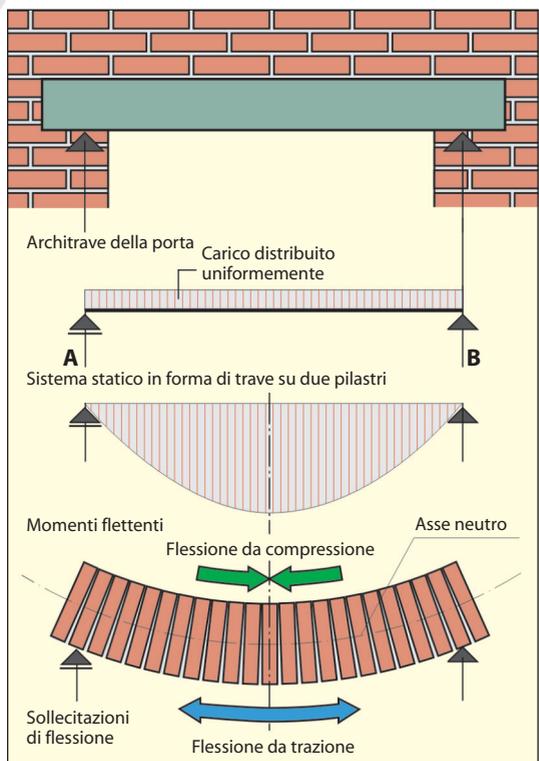


Figura 2: flessione da carico uniforme.