

Calcestruzzo: gli aggregati

8.1 Generalità

Il calcestruzzo, nella sua essenza, è costituito da due componenti: il lapideo (aggregato) e il collante che ricopre, avvolge e collega i singoli elementi lapidei. Il componente lapideo, spesso chiamato, erroneamente, inerte invece che aggregato, comprende a sua volta almeno due ingredienti: la sabbia e la ghiaia o pietrisco. Anche il componente collante, detto pasta o matrice cementizia, comprende almeno due ingredienti: acqua e legante.

Il calcestruzzo indurito è il materiale da costruzione che costituisce le strutture reali (travi, pilastri, solai ecc.) esposte in servizio alle sollecitazioni di carattere statico o dinamico e a quelle chimico-fisiche dell'ambiente (pioggia, gelo, mare ecc.). In realtà, nella maggioranza delle strutture reali, all'interno del calcestruzzo sono annegati rinforzi metallici (armature) predisposti dentro le casseforti prima del getto di calcestruzzo fresco. Pertanto, il materiale impiegato nelle costruzioni – calcestruzzo armato, c.a. – è un materiale doppiamente composito, costituito da elementi lapidei dispersi in una matrice cementizia rinforzata da armature di acciaio, la cui funzione è di sopperire alle caratteristiche deficitarie del calcestruzzo.

Ancora maggiore è il beneficio che deriva alla struttura dalla presenza delle armature metalliche quando queste sono pretese prima del getto del calcestruzzo e poi allentate, quando il calcestruzzo è indurito. In questo caso, i ferri di armatura sono ostacolati, nel riassumere la lunghezza originale, dall'aderenza al calcestruzzo indurito e rimangono in tensione, mentre il calcestruzzo resta in uno stato di compressione (calcestruzzo armato precompresso, c.a.p.). Questo stato di coazione (di trazione dei ferri e di compressione del calcestruzzo) consente alla struttura di sopportare carichi flessionali molto maggiori prima di arrivare al collasso.

La resistenza meccanica (R_c , R_t o R_f) – rispettivamente a compressione, a trazione o a flessione – è quel valore della tensione (σ) che provoca la fessurazione che precede il collasso della struttura o del provino campionario. In generale, il valore di R_c può variare, secondo le qualità del calcestruzzo, da 15 a 80 MPa, e può raggiungere, in taluni conglomerati speciali, anche valori molto maggiori, fino a oltre 200 MPa. Il valore di R_t si attesta su valori compresi fra 1 e 4 MPa, mentre il valore di R_f in genere varia tra 2 e 6 MPa, ma può raggiungere valori fino a 40-60 MPa in alcuni conglomerati speciali.

La presenza delle armature metalliche se da una parte migliora le prestazioni meccaniche della struttura, dall'altra è essa stessa fonte delle maggiori preoccupazioni per quanto riguarda la durabilità delle opere, cioè la capacità di garantire la funzionalità delle strutture per la vita di servizio attesa.

Gli ingredienti per confezionare un calcestruzzo – aggregati, cemento, acqua – sono largamente disponibili. La differenza tra un calcestruzzo mediocre e un calcestruzzo di buona qualità non sta tanto negli ingredienti, ma piuttosto nel loro proporzionamento, nella cura posta nel getto, nella compattazione e nella stagionatura, cioè conservazione dopo la rimozione delle casseforme, delle strutture in ambiente umido per un limitato ma essenziale periodo (3-10 giorni).

Gli aggregati, così come i cementi e gli additivi, devono essere marcati CE in ottemperanza alla legislazione vigente, ai sensi della Direttiva UE sui prodotti da costruzione (89/106/CEE).

In un calcestruzzo gli aggregati rappresentano lo scheletro, la struttura portante, mentre la pasta di cemento rappresenta il collante. Ne consegue che questa struttura portante – il cosiddetto *misto granulometrico* – deve essere la più compatta possibile, in altri termini costituita da tutti gli elementi di vario diametro, da quello massimo a quello prossimo a zero, opportunamente assortiti. Si comprende quindi che il proporzionamento delle varie frazioni del misto granulometrico è un fattore di grande importanza ai fini delle caratteristiche del calcestruzzo risultante.

Quando i singoli granuli hanno dimensione che non supera i 4-5 mm l'aggregato prende il nome di sabbia. Se i granuli hanno dimensione maggiore prendono il nome di aggregato grosso. Quest'ultimo è chiamato ghiaia se di origine alluvionale e di forma tondeggiante, pietrisco se proveniente dalla frantumazione della roccia.

La sabbia è ottenuta a partire da rocce massive mediante frantumazione, macinazione e classificazione. In alternativa, nei giacimenti di origine alluvionale, la sabbia è presente già nella pezzatura adeguata.

8.2 Granulometria

Analisi granulometrica

La caratteristica più evidente dell'aggregato è la sua granularità, cioè il fatto che si presenta in forma di granuli sciolti. Per determinare la distribuzione granulometrica si ricorre alla separazione mediante vagliatura, con setacci di diversa apertura delle maglie, di un suo campione significativo. L'aggregato è separato in diverse frazioni granulometriche, ciascuna delle quali è compresa, quanto a dimensione, tra l'apertura del setaccio attraverso cui il materiale è passato e quella del setaccio dove l'aggregato è trattenuto. In pratica, la vagliatura avviene scuotendo, preferibilmente su un tavolo vibrante, una serie di setacci contenenti un peso noto (almeno 5 kg) del materiale in esame. I setacci sono impilati l'uno sopra l'altro, disposti in modo tale che, man mano che ci si dirige verso l'alto, i setacci abbiano reti con maglie di dimensioni crescenti. Al termine della stacciatura si pesano le quantità trattenute sui singoli setacci (*residuo o trattenuto parziale*). Sommando per ogni setaccio, con rete di dimensione d , tutti i residui parziali dei setacci con reti aventi apertura maggiore di d , si ottiene il *residuo cumulativo* per il setaccio di dimensione d . Queste singole frazioni si esprimono poi in percentuale del peso di tutto il campione analizzato ottenendo così il *residuo cumulativo percentuale* su cia-

Tabella 8.1 Esempio di analisi granulometrica di un aggregato

Apertura del setaccio (mm)	Residuo parziale (kg)	Residuo cumulativo (kg)	Residuo cumulativo (%)	Passante cumulativo (%)
40	0	0	0	100,0
30	0,70	0,70	8,75	91,2
25	2,16	2,86	35,8	64,2
20	3,22	6,08	76,0	24,0
15	1,69	7,77	97,1	2,9
10	0,21	7,98	99,7	0,3
7	0,02	8,00	100,0	0
5	0			
3	0			
1	0			
0,5	0			
<i>Totale</i>	8,00			

scun setaccio. Il complemento a 100 di questo valore è il *passante cumulativo percentuale* per il setaccio con apertura d .

In Tabella 8.1 è riportato un esempio di analisi granulometrica di un aggregato. Peso del campione sottoposto all'analisi: 8 kg.

Riportando in un grafico il passante cumulativo in funzione dell'apertura d del setaccio, si costruisce la cosiddetta curva granulometrica dell'aggregato in esame.

La somma dei vari trattenuti cumulativi su alcuni setacci caratteristici, divisa per 100, prende il nome di *modulo di finezza* ed è tanto maggiore quanto più grosso è l'aggregato.

Diametro massimo

La dimensione massima dell'aggregato grosso (D_{max}) è scelta in relazione alle caratteristiche del conglomerato fresco e indurito (resistenza meccanica, modulo elastico) e anche in funzione del tipo di costruzione, cioè spessore delle strutture, presenza delle armature e quindi distanza tra i ferri. Essa può passare da valori di 15-20 mm a 70-100 e, in particolari situazioni, raggiungere anche valori superiori. La scelta di D_{max} deve tener conto dei seguenti vincoli:

- non superare il 25% della sezione minima della struttura (per evitare di creare eterogeneità nel materiale);
- non superare di 2/3 la distanza tra i ferri di armatura (intraferro) per evitare che l'aggregato più grosso ostruisca il flusso del calcestruzzo attraverso i ferri stessi;
- non superare del 30% lo spessore del copriferro (per evitare che tra i caseri e i ferri di armatura sia ostruito il passaggio degli aggregati grossi).

8.3 Caratteristiche fisiche

Porosità

La porosità dell'aggregato (espressa come percentuale di volume occupato dai pori rispetto al volume totale del granulo) può variare entro un ampio intervallo, da qualche decimo fino a 30-40% del volume totale, secondo il tipo di roccia. La porosità è costituita non solo dai pori intercomunicanti tra loro e la superficie (porosità aperta), ma anche da quelli isolati dalla superficie (porosità chiusa). Mentre le proprietà meccaniche dell'aggregato (e indirettamente quelle del calcestruzzo indurito) sono influenzate negativamente sia dalla porosità aperta sia da quella chiusa, la gelività e la permeabilità solo dalla porosità aperta.

La porosità aperta può essere misurata per assorbimento di acqua fino a saturazione dell'aggregato. Quella chiusa è ottenuta per differenza tra la massa volumica dell'aggregato tal quale e quella dello stesso aggregato macinato e quindi privo di porosità chiusa.

Per non deprimere la resistenza meccanica la porosità complessiva (aperta e chiusa) dell'aggregato dovrebbe essere inferiore al 10%.

Massa volumica (detta in passato peso specifico)

La massa volumica – peso dell'unità di volume – per gli aggregati, in genere, è espressa in Mg/m^3 (Mg = tonnellata).

La misura della massa volumica apparente, comprendente i pori chiusi ma non quelli aperti, si effettua sul materiale essiccato con il metodo picnometrico e con quello della bilancia idrostatica.

È di fondamentale importanza per il calcolo della miscela del calcestruzzo (*mix design*) la massa volumica nello stato di *s.s.a.* (*saturo con superficie asciutta* cioè privo di umidità sulla superficie) il cui valore si determina con la porosità aperta piena di acqua. Con la ghiaia e il pietrisco la valutazione dello stato *s.s.a.* è visuale: il materiale lapideo, liberato dall'eventuale presenza di polveri e d'incrostazioni friabili, è portato a umidità totale zero mediante essiccazione in stufa a 105 °C. Poi è pesato e immerso in acqua per 24 ore alla temperatura ambiente. Allo scadere del tempo di prova, l'aggregato è rimosso e tamponato con un panno assorbente fin quando, a giudizio dell'operatore, la superficie visibile è ritenuta asciutta. Poi di nuovo pesato. Poiché gli elementi grossi essiccano prima di quelli piccoli, è opportuno operare su frazioni granulometriche ristrette.

Per la sabbia, la condizione *s.s.a.* è individuata mediante una prova di *slump*. Il materiale, saturato come nel caso precedente, è disposto in strato sottile su di un piano e lasciato asciugare, rimescolandolo periodicamente. Dopo un certo tempo, si riempie uno stampo tronco-conico di dimensioni standard, poggiato sulla base maggiore, e si compatta secondo prefissate modalità. Poi si toglie cautamente lo stampo: se vi è umidità il cono di sabbia mantiene la forma, cioè resiste al proprio peso, altrimenti crolla; nel primo caso la prova si ripete dopo un ulteriore periodo di essiccamento.

La maggior parte degli aggregati normali ha una massa volumica apparente compresa tra 2,4 e 3,0 Mg/m³, con valori più comuni tra 2,6 e 2,7 Mg/m³. Per gli aggregati leggeri la massa volumica può scendere intorno a 1,4 mentre per quelli pesanti variare tra 3,8 e 5,2 Mg/m³.

Umidità del materiale

La conoscenza dell'umidità dei materiali lapidei, nel momento in cui sono introdotti nella betoniera, e di conseguenza la correzione da apportare

Stabilità dimensionale

Un aggregato è instabile quando le variazioni di volume provocano un deterioramento del calcestruzzo, sia esso limitato alla semplice scagliatura superficiale, o esteso in profondità tale da compromettere seriamente la stabilità della struttura. La principale causa fisica che può procurare variazioni temporanee o permanenti del volume di un aggregato è l'alternanza del gelo e disgelo. Quando la temperatura ambientale scende di qualche grado al di sotto di $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'acqua, gelando, aumenta di volume sviluppando pressioni tali da fratturare il materiale.

La gelività degli aggregati (ossia la scarsa resistenza alla formazione del ghiaccio) è associata alla presenza di micropori con diametro di qualche micron. Gli aggregati gelivi non sono accettabili per strutture in calcestruzzo esposte ai cicli di gelo-disgelo anche se si impiegano additivi aeranti capaci di proteggere la matrice cementizia (ma non gli aggregati) dall'azione del gelo.

8.5 Caratteristiche meccaniche

In genere, la resistenza meccanica di un calcestruzzo non può essere superiore a quella degli aggregati che costituiscono la maggior parte del suo volume. È difficile tuttavia valutare la resistenza alla frattura degli aggregati come tali. Pertanto, si effettuano valutazioni per via indiretta. È prassi comune ricorrere al controllo delle caratteristiche di resistenza meccanica dell'aggregato studiando il comportamento di provini di calcestruzzo confezionati con gli aggregati in esame e, per confronto, provini di calcestruzzo preparati con aggregati di comprovata idoneità. Per una corretta valutazione dei risultati è necessario che le differenze tra i due impasti siano limitate alla sola natura dell'aggregato impiegato, con tutti gli altri fattori (granulometria, forma delle particelle, rapporti di composizione, tipo di cemento, modalità di preparazione e di stagionatura) identici.

L'insufficiente resistenza degli aggregati è un caso limite. In genere, la resistenza a compressione degli aggregati è intorno a 2000 MPa anche se molti aggregati, pur essendo considerati di buona qualità, possono scendere a 800 MPa.

Per calcestruzzi destinati a opere particolari, per esempio a pavimentazioni, sono da considerare altre proprietà meccaniche. La *resistenza all'urto* può essere determinata su campioni di roccia misurando l'altezza minima da cui deve essere lasciato cadere un peso standard per provocarne la frattura. La *resistenza all'usura* è valutata operando con un mezzo abrasivo sulla roccia in esame. Nella prova *Los Angeles*, la resistenza all'usura è determinata come percentuale di materiale che si è frantumato, attraverso un'analisi granulometrica¹.

8.8 Aggregati leggeri

Il termine di aggregato leggero comprende gli aggregati che hanno una massa volumica compresa tra 500 e 1500 kg/m³ e, quindi, inferiore a quella degli aggregati impiegati nel calcestruzzo ordinario.

La caratteristica degli aggregati leggeri è la loro elevata porosità che è responsabile della bassa massa volumica. È tuttavia necessario che l'aggregato possieda una resistenza meccanica la più alta possibile. L'aggregato leggero ideale dovrebbe essere costituito da granuli tondeggianti, porosi all'interno e impermeabili all'esterno. Queste caratteristiche sono riscontrabili solo in alcuni aggregati leggeri preparati artificialmente, quali per esempio l'argilla espansa.

Argilla espansa

Questo materiale è prodotto mediante cottura di particolari argille. In un forno rotante, incontrando temperature sempre maggiori (da 150 °C fino a circa 1200 °C), per l'azione combinata dei gas che si sviluppano all'interno dell'argilla (CO₂, vapor acqueo ecc.) e del movimento rotatorio del forno, l'argilla espande, nella fase quasi fluida, in forma di palline rotondeggianti. Il materiale incandescente in uscita dal forno attraversa un "letto fluido", costituito da una corrente di aria che, oltre a raffreddare

l'argilla espansa, provoca la clinkerizzazione dell'involucro. È in questo momento che si completa la caratteristica fondamentale del materiale: un nucleo interno poroso, costituito da micro-cavità contenenti aria che rendono l'aggregato leggero, legato a un involucro esterno vetroso che garantisce elevati valori di resistenza meccanica.

Altri aggregati leggeri

Con procedimenti analoghi a quello ora illustrato, è possibile ottenere aggregati leggeri anche con materiali non argillosi quali, per esempio, la perlite e la vermiculite³.

Un altro tipo di aggregato leggero è prodotto spruzzando una piccola quantità di acqua sulla loppa fusa in uscita dall'altoforno. Il vapor acqueo che si genera fa rigonfiare la loppa ancora plastica che, raffreddandosi, dà luogo a un materiale poroso di aspetto molto simile a quello della pomice.

Tra gli aggregati leggeri è ancora da ricordare il polistirolo espanso per il basso peso specifico del calcestruzzo che si può confezionare con esso.

Oltre agli aggregati sopra menzionati, tutti prodotti artificiali, è disponibile in natura una vasta gamma di aggregati leggeri quali pomice, tufo, terra di diatomee.

Calcestruzzo: il cemento

9.1 Generalità

I cementi idraulici sono materiali di natura inorganica, finemente macinati, che hanno la capacità di reagire con l'acqua e indurire anche in ambiente subacqueo, assumendo l'aspetto e le proprietà dei materiali lapidei.

Il cemento è il costituente essenziale di un calcestruzzo, ma non costituisce il solo elemento che ne determini le caratteristiche meccaniche. Le prestazioni del calcestruzzo dipendono anche, ma non solo, dal cemento prescelto e, quindi, soltanto un'oculata composizione della miscela, una sua corretta messa in opera e una maturazione accurata possono garantire, in termini sia tecnici sia economici, l'affidabilità e la durevolezza di una costruzione.

9.2 Costituenti dei cementi

Tutti i cementi comuni contengono clinker di portland, che è il costituente idraulico per eccellenza, e gesso, come regolatore di presa. A essi possono essere associati altri materiali inorganici, naturali o artificiali, che impartiscono caratteristiche peculiari. Tali materiali appartengono a tre grandi categorie: i *materiali a comportamento pozzolanico*, le *loppe basiche siderurgiche* e i *calcari*.

Clinker

Costituenti principali

Il clinker portland si ottiene cuocendo a circa 1400 °C opportune miscele di CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A questo scopo s'impiegano miscele di

calcare (carbonato di calcio) e di argilla (silicati idrati di allumina e ferro) finemente macinate. Il trattamento termico comporta la formazione di quattro composti principali¹:

3 CaO · SiO ₂	(C ₃ S)	<i>silicato tricalcico;</i>
2 CaO · SiO ₂	(C ₂ S)	<i>silicato bicalcico;</i>
3 CaO · Al ₂ O ₃	(C ₃ A)	<i>alluminato tricalcico;</i>
4 CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	(C ₄ AF)	<i>allumino ferrito tetracalcico.</i>

I primi due composti predominano nella massa del clinker (> 67%) e sono quelli che, in pratica, impartiscono la caratteristica resistenza al cemento indurito. In particolare, la resistenza meccanica, che si sviluppa in seguito all'idratazione del C₃S, è raggiunta entro i primissimi giorni dall'impasto con acqua. Il C₂S, a differenza del C₃S, presenta velocità d'indurimento iniziale molto lenta che, in seguito aumenta, e si mantiene quasi costante per alcuni mesi. Gradualmente poi diminuisce. Alle lunghe stagionature le resistenze meccaniche diventano quasi uguali a quelle del C₃S.

Gli altri due composti danno un modestissimo contributo all'indurimento, ma sono indispensabili per la formazione del clinker giacché, agendo come fondenti, accelerano il processo di cottura. Inoltre, il C₃A, talvolta, agisce come accelerante dell'idratazione del C₃S.

Il C₃A, quando è mescolato con l'acqua, si irrigidisce istantaneamente e il fenomeno è accompagnato da intenso sviluppo di calore. Se all'impasto si aggiunge gesso, si osserva che all'aumentare della sua percentuale i fenomeni termici e d'irrigidimento istantaneo si riducono. Gli impasti con contenuti ottimali di gesso induriscono lentamente. L'alluminato di calcio ha un ruolo fondamentale nella durabilità delle strutture. Infatti, nel calcestruzzo indurito è responsabile della sua disintegrazione in presenza di

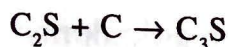
¹ Nella letteratura tecnica e scientifica le formule dei composti anidri o idrati del cemento sono scritte come somma di ossidi e, per abbreviare la notazione, si sostituisce ad ogni ossido una lettera maiuscola:

SiO ₂ = S	CaO = C	MgO = M
Al ₂ O ₃ = A	K ₂ O = K	SO ₃ = S̄
Fe ₂ O ₃ = F	Na ₂ O = N	H ₂ O = H

Così il silicato di calcio Ca₂SiO₄ si scrive come somma di ossidi 2CaO · SiO₂ e, abbreviato, C₂S; la reazione dell'ossido di calcio con il silicato bicalcico si scrive:



e abbreviata

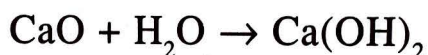


Per il seguito si adotterà in prevalenza la notazione abbreviata.

solfati (formazione di ettringite secondaria); dall'altra parte, formando composti poco solubili con i cloruri presenti, ne inibisce almeno in parte l'azione corrosiva nei confronti dei ferri di armatura. Il C_3A può essere contenuto nel clinker fino a circa il 15%, limite che nei cementi solfato-resistenti deve essere ridotto a valori prossimi allo zero. Il C_3A , anche in presenza di gesso, sviluppa una notevole quantità di calore nei primi tempi d'idratazione.

Costituenti minori (dannosi)

- **CaO libera.** In genere, non tutta la CaO (proveniente dalla decomposizione termica del calcare) si combina, durante la cottura, per formare silicati, alluminati e ferriti. In quantità più o meno piccole, essa rimane nel clinker allo stato di ossido di calcio libero (calce stracotta). Questa calce, detta libera, presenta, per l'alta temperatura alla quale è stata sottoposta (1400-1450 °C), un'idratazione molto lenta. Essa si idrata quando il cemento è già indurito secondo la reazione:



In queste condizioni si passa da un solido con volume V_0 all'idrato con volume V_i molto maggiore. Ciò provoca, in un sistema già in parte irrigidito, tardive dilatazioni. Per questo motivo la calce libera nei cementi deve essere limitata a valori bassi (< circa il 2%) mediante un'idonea omogeneizzazione, macinazione e cottura della miscela cruda.

- **MgO.** In fase di cottura del clinker, l'ossido di magnesio contenuto, come impurezza, nelle materie prime non si combina con gli ossidi acidi e, se si eccettua la modesta frazione che passa in soluzione solida nei diversi composti, la parte restante si ritrova nel clinker allo stato libero. La velocità d'idratazione del MgO presente sotto forma cristallina, calcinato alla temperatura raggiunta nel forno, è molto lenta. Poiché l'idratazione del MgO è accompagnata da espansione, quando il fenomeno avviene in un manufatto indurito e il tenore di ossido di magnesio supera determinati valori, la stabilità della struttura è compromessa. In tutte le nazioni sono in vigore norme che fissano il tenore massimo di MgO tollerabile in un clinker: la UNI EN 197-1 lo limita al 5%.

Materiali pozzolanici

Il termine *pozzolana* deriva da depositi vulcanici incoerenti, che si trovano nel distretto eruttivo flegreo (Pozzuoli, presso Napoli). Nell'industria

si usa per designare tutti i materiali, sia naturali sia artificiali, atti a reagire e indurire, a temperatura ambiente, una volta impastati con acqua e calce o con prodotti che, come il clinker portland, reagendo con l'acqua, liberano idrossido di calcio. Nella reazione con la calce, la pozzolana produce silicati e alluminati di calcio idrati simili a quelli che si ottengono nella idratazione del cemento portland. La capacità di reagire, in presenza di acqua, con l'idrossido di calcio è definita con l'espressione "attività pozzolanica". La pozzolana non è di per sé un legante, perché mescolata con sola acqua dà luogo a un impasto di consistenza più o meno plastica che non è però in grado d'indurire.

Accanto alle pozzolane naturali trovano largo impiego anche le artificiali, alcune delle quali, come le argille cotte, in uso da millenni. In tempi più recenti, il carattere pozzolanico è stato riscontrato nelle ceneri volanti (*fly ash*), cioè nelle polveri che si ottengono nell'abbattimento dei fumi generati dalla combustione del carbone fossile negli impianti di produzione di energia elettrica. La microsilice (*silica fume*), sottoprodotto della produzione del silicio e delle ferroleghie, è stata utilizzata nell'industria del cemento in tempi abbastanza recenti. A causa della sua elevata superficie specifica ($25000 \text{ m}^2/\text{kg}$), l'aggiunta di microsilice al cemento aumenta di molto la richiesta di acqua. A ciò si ovvia impiegando additivi riduttori di acqua.

Loppe di altoforno granulate

Le loppe di altoforno sono scorie che si ottengono nella produzione della ghisa primaria negli altiforni. Quelle utilizzabili per la produzione dei cementi devono essere basiche. Inoltre, la loppa fusa deve essere raffreddata con rapidità facendola cadere in grandi masse di acqua, oppure spruzzandola con rilevanti quantità di aria e acqua sotto pressione. L'obiettivo è in ogni caso quello di raffreddare bruscamente la loppa fusa in modo da prevenire al massimo il processo di cristallizzazione del liquido e di favorire, invece, la solidificazione sotto forma di vetro. Il materiale raffreddato bruscamente si presenta sotto forma di granuli vetrosi e prende perciò il nome di loppa granulata.

La loppa granulata di altoforno, macinata a finezza cemento e mescolata con acqua, indurisce molto lentamente. Se, invece, la loppa è impastata con acqua in presenza di piccole quantità di calce o gesso, o di cemento portland, che nell'idratazione libera idrossido di calcio, o di altre sostanze quali l'idrossido di sodio o di potassio, indurisce abbastanza velocemente, comportandosi come un vero e proprio legante idraulico. La loppa si differenzia quindi dalla pozzolana che è capace, invece, d'indu-

rire solo in presenza di quantità rilevanti di calce idrata con la quale si combina.

Calcare

La presenza del calcare, finemente macinato, nel cemento portland è una pratica usata per migliorare alcune caratteristiche del cemento stesso e, anche, per ridurre i costi energetici nella produzione del cemento.

Il calcare, considerato in passato inerte nei riguardi del cemento, mostra invece una certa reattività nei confronti degli alluminati di calcio quantunque i carboalluminati di calcio di neoformazione non possiedano proprietà cementanti. Tuttavia, il calcare giuoca un ruolo non trascurabile nel determinare le proprietà del cemento. Esso, infatti, agisce da coadiuvante di macinazione e ottimizza la granulometria del cemento con conseguente accelerazione dell'indurimento. Per tale motivo la sostituzione del clinker con calcare macinato non può avvenire in cantiere.

Non tutti i calcari sono idonei all'impiego come costituenti dei cementi. La norma UNI EN fissa limiti di composizione per garantire la qualità del materiale.

Gesso

L'azione fondamentale del gesso (solfato di calcio biidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) riguarda la regolazione della presa. La quantità di gesso presente influenza anche altre proprietà dei cementi, come la resistenza meccanica, il calore d'idratazione, la durabilità ecc.

Un eccesso di gesso può provocare espansione della pasta di cemento per formazione di ettringite (primaria). Per questo motivo il suo contenuto, espresso come SO_3 , è limitato dalle norme.

Filler

Con questo termine inglese si definisce un costituente impiegato in piccola quantità nel cemento (max 5% in peso) per migliorare alcune proprietà tecnologiche, quali la lavorabilità o la ritenzione di acqua degli impasti, ovvero per legalizzare piccole adulterazioni.

Additivi per cemento

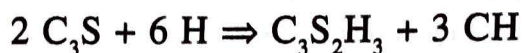
Gli additivi impiegati nella produzione del cemento (max 1%) sono prodotti che migliorano il rendimento energetico in alcune fasi della produzione.

9.4 Idratazione

L'idratazione del cemento, cioè la reazione tra l'acqua e i costituenti del cemento, è il fenomeno fondamentale al quale si deve l'indurimento delle malte e dei calcestruzzi.

Quando il cemento viene a contatto con l'acqua, i singoli costituenti danno origine a una serie di prodotti d'idratazione: silicati di calcio idrati derivati dal C_3S e C_2S , solfoalluminati idrati di calcio (ettringite) derivati dal C_3A in presenza di gesso, solfoalluminati idrati di ferro derivati dal C_4AF . Man mano che i costituenti del cemento reagiscono con l'acqua, provocano un progressivo irrigidimento della massa.

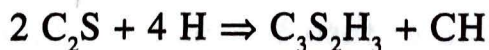
Le reazioni d'idratazione per i costituenti fondamentali del cemento sono, senza rigore stechiometrico, per il C_3S :



con rapporto ponderale:

$$100 \quad 24 \quad 75 \quad 49$$

e per il C_2S :



con rapporto ponderale:

$$100 \quad 21 \quad 99 \quad 22$$

Il rapporto C/S nei silicati di calcio idrati non è fisso ma può variare entro certi limiti. Anche il rapporto H/S varia. In altri termini, l'idratazione dei silicati di calcio produce una serie di silicati idrati che nel seguito indicheremo C-S-H.

I due silicati, su base ponderale, richiedono circa la stessa quantità di acqua, mentre la quantità d'idrossido di calcio – *calce d'idrolisi* – liberata dall'idratazione del C_3S è circa il doppio rispetto a quella liberata dall'idratazione del C_2S . Ciò è di grande importanza, tra l'altro, ai fini della durabilità.

I prodotti ottenuti nell'idratazione del C_3S e del C_2S presentano una struttura analoga sia per composizione sia per morfologia. Questi silicati idrati, all'analisi dei raggi X, non presentano picchi distinti, caratteristici delle sostanze cristalline, ma solo bande diffuse che corrispondono all'incirca ai principali riflessi del minerale tobermorite di composizione $C_5S_6H_5$.

Per questo motivo, e per la sua natura ritenuta per lungo tempo colloidale, il silicato idrato è noto anche con il nome di *gel tobermoritico*. L'idrossido di calcio che precipita dalla soluzione satura è detto *portlandite*. Si noti che la quantità di gel prodotto nell'idratazione del C_2S è ben maggiore di quella che si produce nell'idratazione del C_3S . Se ne deduce, pertanto, che il C_2S fornisce più materiale legante quantunque il C_3S lo fornisca con maggiore rapidità.

Per una completa idratazione dei costituenti del cemento è necessario circa il 23% in peso di acqua. Tuttavia, per trasformare la miscela in una pasta lavorabile, questa percentuale deve essere aumentata.

Se alla pasta di cemento è aggiunta sabbia (malta) o sabbia e aggregato grosso (calcestruzzo), il fabbisogno di acqua, necessaria per ottenere un'ideale lavorabilità della miscela, aumenta ancora.

Durante la macinazione del *clinker* si aggiunge da 2 al 6% di gesso per evitare la rapida idratazione dell'alluminato di calcio e conseguente rapidissimo indurimento della massa. Il gesso forma ettringite (ettringite primaria) che si dispone come uno strato protettivo sui granuli del C_3A , rallentandone l'idratazione.

Il processo d'idratazione modifica radicalmente le proprietà chimiche, fisiche e meccaniche degli impasti di cemento. Le principali modificazioni riguardano:

- la lavorabilità;
- la resistenza meccanica;
- l'entalpia (calore d'idratazione);
- la microstruttura (porosità).

La prima modifica che si osserva riguarda la *lavorabilità* degli impasti: essi con il passare delle ore perdono l'attitudine alla modellazione.

La resistenza meccanica è il requisito generale e fondamentale della pasta di cemento, perché essa è alla base dell'attitudine a dar luogo a malte e calcestruzzi, resistenti e durabili, agglomerando materiali lapidei sciolti.

La principale fonte di *resistenza meccanica* nei prodotti della pasta di cemento è l'esistenza di forze di attrazione di van der Waals². L'adesione tra due superfici solide è attribuita a queste forze e l'entità dell'azione adesiva dipende dalla estensione e dalla natura delle superfici coinvolte. I gel di C-S-H hanno un'enorme area superficiale e, quindi, una grande capacità adesiva. Questi prodotti tendono ad aderire non solo tra loro, ma anche a solidi con bassa superficie specifica come l'idrossido di calcio, i solfoalluminati idrati, i grani di *clinker* non idratati, le particelle di aggregati e i ferri di armatura.

² Forze di van der Waals: si tratta di legami che derivano da attrazioni elettrostatiche tra molecole dipolari per conformazione o tra molecole dipolari indotte.

Lo sviluppo nel tempo della resistenza meccanica procede rapidamente all'inizio e sempre più lentamente a tempi lunghi in quanto il C-S-H di prima formazione, depositato sui granuli di cemento, ostacola il processo di diffusione dell'acqua verso il nucleo ancora anidro dei granuli di cemento. Nei cementi portland normali, a 3 e 7 giorni la resistenza meccanica è pari al 30 e al 60%, rispettivamente, di quella ottenibile a 28 giorni, con un ulteriore incremento del 20-40% nell'anno successivo. Altri parametri, quali la composizione del cemento, la finezza e la temperatura, possono influenzare lo sviluppo della resistenza meccanica. Cementi macinati più fini, quindi con maggiore area superficiale esposta all'acqua, si idratano più velocemente e sviluppano con maggiore rapidità la resistenza meccanica. Una temperatura più bassa rallenta la cinetica del processo d'idratazione e comporta un più lento sviluppo della resistenza meccanica soprattutto alle brevi stagionature. L'impiego di cementi a più elevato contenuto di C_3S comporta una più rapida formazione di C-S-H e quindi un effetto analogo sulle prestazioni meccaniche.

Il consolidamento della pasta di cemento, pur essendo un processo **graduale e progressivo**, è *usualmente* distinto in presa e indurimento. Il "tempo d'inizio presa" indica il momento in cui l'impasto assume una consistenza convenzionale. L'indurimento progressivo è dovuto alla graduale formazione di C-S-H.

Anomalie del fenomeno di presa

L'irrigidimento iniziale (*presa*) del cemento portland può manifestarsi con andamento anomalo a causa d'inconvenienti che si sono verificati in sede di fabbricazione o durante la conservazione. Nel mulino, in fase di macinazione, si possono raggiungere temperature per le quali il gesso biidrato in tutto o in parte si trasforma in emidrato e, quando ciò avviene, il cemento dà luogo alla **falsa presa**: dopo qualche minuto dall'aggiunta di acqua, l'impasto si consolida in seguito alla formazione di cristalli associati all'idratazione del gesso emidrato. Comunque, il fenomeno è temporaneo ed è sufficiente rimescolare con forza la massa per rompere lo scheletro dei cristalli e restituire all'impasto la sua plasticità normale. In pratica, quando si ha falsa presa, l'operatore è portato a risolvere l'inconveniente nel modo più semplice, cioè aggiungendo altra acqua. Questo provvedimento è del tutto errato, e per di più dannoso, perché l'aumento del rapporto acqua-cemento (*a/c*) provoca una riduzione della resistenza meccanica dell'impasto indurito.

La falsa presa si distingue dalla **presa rapida** per l'intensità dei fenomeni termici. Questi nella falsa presa sono molto inferiori. Inoltre, la presa rapida segna l'inizio di un indurimento progressivo che non può essere

annullato con il rimescolamento. In tali condizioni il cemento è da portare a rifiuto. La presa rapida è dovuta all'insufficiente quantità di gesso nel cemento.

Le caratteristiche di presa sono anche influenzate dallo stato di conservazione del legante, in pratica dal grado di *aerazione* che esso ha subito prima dell'impiego. Il fenomeno interessa, in particolare, il cemento conservato in sacchi e le variazioni che si osservano sono a volte di accelerazione, a volte di ritardo. In presenza di umidità, l'anidride carbonica contenuta nell'aria, si fissa sui grani del *clinker* formando carbonati alcalini e, in certe situazioni, anche carbonato di calcio. Secondo il grado d'intensità della reazione, la carbonatazione può causare accelerazione o ritardo nel tempo d'inizio presa.

Quando si deve impiegare un cemento confezionato in sacchi, conservato per lungo tempo, è buona norma controllare il tempo d'inizio presa. La carbonatazione ha influenza negativa anche sulle resistenze meccaniche alle brevi stagionature da 1 a 3 giorni, mentre non ne ha alcuna su quella a 28 giorni.

Calore d'idratazione

L'idratazione del cemento è sempre accompagnata da una variazione di entalpia, cioè dallo sviluppo di calore. Essa varia da tipo a tipo di cemento.

I problemi associati all'entità e velocità di sviluppo del calore d'idratazione sono in particolare sentiti nel caso di manufatti di grosse dimensioni nei quali il rapporto superficie/volume è basso. Il fattore forma del manufatto è sfavorevole nei riguardi di un'efficace dispersione del calore svolto durante l'indurimento. Nella costruzione di dighe, plinti di grosse dimensioni e anche nel caso di manufatti con fattore forma sfavorevole, o per calcestruzzi molto ricchi di cemento, la temperatura all'interno della massa di calcestruzzo può aumentare fino a 50-60 °C e occorrono tempi dell'ordine di mesi prima che la temperatura delle zone interne si stabilizzi. Poiché il calcestruzzo, raffreddandosi, subisce un ritiro, se il raffreddamento non avviene in modo uniforme si creano zone a ritiro differenziato. Ciò dà luogo a tensioni che possono provocare fessurazioni anche molto profonde. La velocità con cui si sviluppa il calore d'idratazione, soprattutto alle brevi stagionature, è importante. A parità di calore liberato, una più alta velocità comporta un maggiore accumulo di calore all'interno della massa e, quindi, un maggiore aumento della temperatura. D'altro canto, lo sviluppo del calore d'idratazione può essere di aiuto quando si opera in climi freddi. L'aumento di temperatura, provocato dallo sviluppo di calore, accelera il processo d'indurimento che altrimenti risulterebbe rallentato per la bassa temperatura ambientale.

9.7 Cementi speciali

Cemento bianco

I cementi tipo portland hanno un colore grigio-verdastro dovuto alla presenza dei composti a base di ferro (C_4AF). Per alcuni impieghi necessita poter disporre di leganti bianchi. Questi si possono ottenere partendo da materie prime prive, o quasi, di ferro (calcarei puri, caolino anziché argille), supplendo alla mancata azione fondente dei composti contenenti ferro, con l'aggiunta di fluoruro di calcio dotato di azione analoga. Il *clinker* così ottenuto è abbastanza bianco e lo diviene ancora di più miscelandolo, durante la macinazione, con calcare bianco puro.

Questi leganti sono a tutti gli effetti cementi e devono rispondere ai requisiti dei cementi tipo I o II, secondo i casi. Essi sono impiegati, unitamente ad aggregati di colorazione chiara, per la confezione di calcestruzzi a vista quando si desidera realizzare costruzioni di particolare interesse architettonico.

Il requisito essenziale di un cemento bianco è la *brillanza* o *indice di bianchezza*, che rappresenta il rapporto percentuale tra il coefficiente di riflessione del cemento bianco e quello del solfato di bario purissimo, assunto come riferimento. Di solito la brillanza di un cemento bianco è superiore a 90%.

Cemento alluminoso

È un cemento dal costo molto elevato, utilizzabile solo per usi particolari. È chiamato anche cemento fuso perché durante la cottura la fase liquida è predominante. Il maggiore costituente (60% e oltre) del cemento alluminoso è l'alluminato monocalcico, CA. Questo ha uno spiccato comportamento idraulico, superiore a quello dei costituenti il *clinker* portland. I prodotti d'idratazione sono C_2AH_8 cristallino e $Al(OH)_3$ gelatinoso. Successivamente, il C_2AH_8 si trasforma nella fase più stabile C_3AH_6 . Questa reazione, chiamata di conversione, è molto lenta in atmosfera asciutta e a bassa temperatura, ma molto veloce se l'atmosfera è umida e la temperatura supera i 25 °C. La conversione ha un effetto importante sul comportamento della pasta indurita, in quanto provoca diminuzione della resistenza meccanica.

Rispetto al cemento portland, l'alluminoso ha caratteristiche uniche quali l'elevata resistenza iniziale, anche a basse temperature, e l'elevata durabilità all'ambiente solfatico. Tuttavia, diversi fallimenti strutturali, dovuti alla graduale perdita di resistenza, tipica di questi cementi, sono stati decisivi nel limitarne l'uso nelle applicazioni strutturali.

Il tempo di presa dei cementi alluminosi è simile a quello del cemento portland, mentre l'indurimento è molto più rapido. Dopo 24 ore dall'impa-

sto, la resistenza a compressione sviluppata è già vicina al suo valore massimo e supera quella che il cemento portland normale acquisterebbe dopo 28 giorni. Il processo d'idratazione del legante è esotermico. La quantità di calore che si svolge durante la presa e l'indurimento non è molto diversa da quella sviluppata dal portland, ossia all'incirca $120 + 130$ cal/g. Ma, a causa dell'elevata velocità d'idratazione del CA, la gran parte del calore si libera entro le prime 10-20 ore dall'impasto e, di conseguenza, la temperatura del getto aumenta di molto anche nel caso di sezioni di spessore modesto.

Il cemento alluminoso trova la principale applicazione nelle pigiate per rivestimento dei forni e come malta di giunzione tra i mattoni refrattari. All'aumentare della temperatura, il legame fornito dai prodotti idrati provenienti dalla reazione d'idratazione, si indebolisce sensibilmente fino ad annullarsi a 900 °C, mentre comincia a formarsi, a partire già da 700 °C, un legame di natura ceramica, nell'interno della pasta di cemento e tra questa e la superficie dell'aggregato.

Cementi a pronta presa

I cementi a pronta presa sono fabbricati miscelando, in opportune quantità, in funzione delle condizioni climatiche, *clinker* portland e cemento alluminoso.

Essi sono caratterizzati da un tempo d'inizio presa molto breve (3-5 minuti) e resistenza meccanica *su pasta* intorno a 40 MPa a 28 giorni.

Tali caratteristiche consentono di preparare malte e paste destinate a lavori che necessitano celerità d'indurimento quali:

- sigillature;
- bloccaggi;
- fissaggio di tubazioni e sanitari;
- tasselli, applicazioni elettriche;
- lavori in muratura;
- riparazioni.

Cementi colorati

I cementi colorati, destinati come il cemento bianco a costruzioni di particolare interesse architettonico, sono ottenuti per colorazione del cemento bianco o del cemento portland. Nel primo caso è possibile ottenere una vasta gamma di colori con tonalità chiare, mentre nel secondo la colorazione grigia del cemento consente di ottenere solo colori scuri, in pratica limitati al rosso e al marrone.

Sia il cemento bianco sia quello grigio possono essere colorati macinando il *clinker* e il gesso con piccole aggiunte di un pigmento colorato.

Calcestruzzo: l'acqua

10.1 Generalità

L'acqua d'impasto ha la funzione d'idratare il legante, di bagnare l'aggregato, in modo da favorire l'aderenza con la pasta legante, e di portare la massa alla consistenza voluta, come richiesto dalle condizioni di trasporto, di getto e di costipamento.

I principali effetti nocivi che possono essere provocati dal contenuto d'impurezze nell'acqua d'impasto sono: variazioni dei tempi di presa, riduzione delle resistenze finali, efflorescenze e macchie superficiali e, non ultima per importanza, corrosione delle armature.

10.2 Qualità dell'acqua d'impasto

Sostanze che agiscono sulle resistenze meccaniche

La maggior parte delle acque naturali è da ritenersi idonea all'utilizzo come acqua d'impasto. Per il calcestruzzo non armato, si ammette la possibilità d'impiegare acqua di mare o salmastra, qualora le circostanze l'impingano. Entrambi i tipi di acqua devono però essere esclusi nelle opere in calcestruzzo armato a causa dell'influenza dei cloruri sulla corrosione delle armature.

Di tutte le sostanze contenute nell'acqua, quelle che al disopra di certe concentrazioni possono modificare lo sviluppo delle resistenze meccaniche sono i carbonati, i solfati e i cloruri.

I dati della letteratura indicano che una quantità di carbonati e bicarbonati fino a 2000 ppm può essere tollerata senza eccessivo danno. Gli effetti delle due sostanze sono diversi tra loro e per differenti tipi di *clinker* e, nel

caso dei carbonati si può avere, secondo le quantità, azione accelerante o ritardante sull'indurimento. È buona norma effettuare una prova di resistenza a compressione e la misura del tempo d'inizio presa, quando nell'acqua d'impasto il contenuto di una delle due sostanze superi 1000 ppm.

I solfati e i cloruri possono essere tollerati in quantità elevata senza che le resistenze meccaniche debbano risentirne. Il cloruro sodico non ha influenza sullo sviluppo delle resistenze meccaniche sino a concentrazione del 2%, mentre ne ha molto poca fino a concentrazione del 5%. Il timore di un'azione disgregante da parte dei solfati contenuti nell'acqua d'impasto non è molto giustificato. Un tal evento potrà verificarsi solo se il contenuto di SO_3 dell'acqua raggiunge valori molto elevati. Dai dati della letteratura si desume che, ai fini della resistenza meccanica, si può ritenere idonea un'acqua nella quale la concentrazione totale dei cloruri e dei solfati sia pari a 10.000 ppm cioè 1% in peso.

La presenza di solidi sospesi può aumentare in modo indesiderabile il tempo di presa del calcestruzzo. Pertanto, un'acqua torbida dovrebbe essere lasciata decantare in vasche, prima dell'uso.

Sostanze dannose ai fini della corrosione delle armature di acciaio

Per la corrosione dell'acciaio immerso nel calcestruzzo, ha molta importanza il contenuto di cloruri. Questi in parte reagiscono con l' Al_2O_3 del cemento, in parte restano in soluzione nella fase liquida che permea l'impasto indurito. Il coefficiente di ripartizione è funzione della concentrazione di cloruri nella fase acquosa, del contenuto di Al_2O_3 e di SO_3 nel cemento e della temperatura. In generale, la frazione fissata dall' Al_2O_3 è molto inferiore rispetto a quella che resta in soluzione.

Il massimo contenuto di cloruri accettabile nell'acqua d'impasto deve essere tale che la quantità totale di cloruri nel calcestruzzo, apportato dai vari materiali componenti, – espresso come percentuale di cloruri rispetto alla massa di cemento – non superi prefissati valori (0,20% in presenza di armature di acciaio normali e 0,10% in presenza di armature di acciaio da precompressione).

In modo del tutto diverso si comportano i solfati i quali reagiscono con l' Al_2O_3 scomparendo dalla fase liquida e pertanto non sono d'interesse ai fini della corrosione.