

# Calcestruzzo: gli additivi

## 11.1 Generalità

Gli additivi costituiscono, con il cemento, l'acqua e gli aggregati, il quarto ingrediente che entra spesso nella progettazione e nella composizione del calcestruzzo. Gli additivi sono definiti dalla UNI EN 934-2 come "materiale da aggiungere durante il confezionamento del calcestruzzo in quantità non superiore al 5% in massa sul contenuto di cemento", allo scopo di modificare le proprietà della miscela allo stato fresco e/o indurito.

Gli additivi sono sostanze di natura polimerica o non, per la maggior parte dei casi, disciolte e veicolate in acqua. Gli additivi disponibili sul mercato sono raggruppati in base alla loro funzione principale, correlata al tipo di beneficio che si vuole ottenere. Accanto a questa, di solito, esistono una o più funzioni secondarie a volte volute, o effetti collaterali indesiderati, di cui occorre tener conto al momento della scelta e dell'impiego. È buona regola controllare, con idonea sperimentazione, l'azione dell'additivo evitando di fare affidamento solo sulle indicazioni del produttore. Per ottenere i migliori risultati può essere necessario adattare all'additivo il tipo di cemento, l'assortimento granulometrico, i rapporti di composizione, il metodo e il modo di preparazione, trasporto e posa in opera. Il dosaggio richiede un accurato controllo perché le quantità usate sono molto piccole. Un eccesso è sempre dannoso o per la resistenza meccanica o per altre proprietà.

Gli additivi sono classificati prendendo in considerazione la loro funzione principale, trascurando gli eventuali effetti secondari.

# Calcestruzzo: gli additivi

## 11.1 Generalità

Gli additivi costituiscono, con il cemento, l'acqua e gli aggregati, il quarto ingrediente che entra spesso nella progettazione e nella composizione del calcestruzzo. Gli additivi sono definiti dalla UNI EN 934-2 come "materiale da aggiungere durante il confezionamento del calcestruzzo in quantità non superiore al 5% in massa sul contenuto di cemento", allo scopo di modificare le proprietà della miscela allo stato fresco e/o indurito.

Gli additivi sono sostanze di natura polimerica o non, per la maggior parte dei casi, disciolte e veicolate in acqua. Gli additivi disponibili sul mercato sono raggruppati in base alla loro funzione principale, correlata al tipo di beneficio che si vuole ottenere. Accanto a questa, di solito, esistono una o più funzioni secondarie a volte volute, o effetti collaterali indesiderati, di cui occorre tener conto al momento della scelta e dell'impiego. È buona regola controllare, con idonea sperimentazione, l'azione dell'additivo evitando di fare affidamento solo sulle indicazioni del produttore. Per ottenere i migliori risultati può essere necessario adattare all'additivo il tipo di cemento, l'assortimento granulometrico, i rapporti di composizione, il metodo e il modo di preparazione, trasporto e posa in opera. Il dosaggio richiede un accurato controllo perché le quantità usate sono molto piccole. Un eccesso è sempre dannoso o per la resistenza meccanica o per altre proprietà.

Gli additivi sono classificati prendendo in considerazione la loro funzione principale, trascurando gli eventuali effetti secondari.

## 11.2 Additivi riduttori di acqua

In base al grado di efficacia, gli additivi riduttori di acqua possono essere classificati in fluidificanti, superfluidificanti e iperfluidificanti.

### Fluidificanti

Gli additivi fluidificanti migliorano l'attitudine alla deformazione dei calcestruzzi freschi sotto l'effetto della costipazione e della vibrazione. In genere, sono dei tensioattivi e funzionano come disperdenti dei granuli di cemento, in quanto caricano negativamente la superficie del granulo provocando la repulsione elettrostatica delle particelle.

Gli additivi fluidificanti, a pari rapporto  $a/c$ , migliorano la lavorabilità e, a pari lavorabilità, permettono di abbassare il rapporto  $a/c$  con beneficio, in questo secondo caso, delle resistenze meccaniche e della durabilità.

Occorre tenere presente che l'azione di questi additivi diventa meno efficiente man mano che diminuisce il dosaggio di cemento nel calcestruzzo. Pertanto, con calcestruzzi magri (cioè bassi dosaggi in cemento), una migliore lavorabilità è ottenuta con l'aumento del dosaggio di cemento piuttosto che con l'uso di additivi.

### Superfluidificanti

I normali fluidificanti sono impiegati in dosi piuttosto esigue, non superiori cioè allo 0,1-0,4% del peso del cemento, per evitare effetti collaterali di forti ritardi nell'idratazione. I superfluidificanti non provocano invece questo inconveniente e, pertanto, possono essere aggiunti in quantità anche 10 volte superiori consentendo di ottenere incrementi di lavorabilità più marcati.

Il potere disperdente di questi additivi permette di confezionare calcestruzzi con rapporti  $a/c$  molto ridotti, fluidi e superfluidi, consentendo una facile messa in opera. L'aspetto più importante dell'impiego dei superfluidificanti riguarda la possibilità di mettere in opera, senza eccessivi problemi di compattazione, calcestruzzi fluidi le cui prestazioni allo stato indurito siano equivalenti a quelle di un calcestruzzo a basso rapporto  $a/c$  che richiederebbe, invece, un'accurata vibrazione. Anche a fluidità elevate, gli impasti presentano buona coesione senza segregazione dei componenti. Esistono versioni ritardanti e a bassa perdita di lavorabilità.

## Iperfluidificanti

Sono superfluidificanti di nuova generazione che presentano spiccato potere di riduzione dell'acqua d'impasto con assenza di ritardo nei tempi di presa del calcestruzzo, pur garantendo prolungati mantenimenti della lavorabilità. L'ampio spettro di dosaggio che caratterizza questi additivi, insieme all'elevato potere disperdente, consente di ottenere calcestruzzi iperfluidi caratterizzati da bassissimi valori del rapporto *a/c*. È, quindi, insostituibile elemento per i calcestruzzi cui sono richieste prestazioni elevate in termini di scorrevolezza, resistenze meccaniche alle brevi e brevissime stagionature, impermeabilità e durabilità.

L'utilizzo di questi additivi, tuttavia, in calcestruzzi con contenuti di cemento al di sotto di  $280-300 \text{ kg/m}^3$  si è dimostrato meno efficace di quello di additivi superfluidificanti.

## 11.3 Altri additivi

### Plastificanti

Gli additivi plastificanti migliorano la stabilità e omogeneità delle malte e dei calcestruzzi, aumentandone la coesione fra i vari componenti e diminuendo il *bleeding* (vedi Cap. 12).

In genere, sono prodotti solidi, con finezza all'incirca uguale a quella del cemento, i quali completano la granulometria delle malte e dei calcestruzzi. Tra gli additivi plastificanti, i più comuni sono la bentonite, la farina fossile e l'acetato di polivinile.

I calcestruzzi confezionati con additivi plastificanti richiederebbero, a parità di lavorabilità dei calcestruzzi che non li contengono, un quantitativo di acqua maggiore, ossia un più alto rapporto *a/c* con conseguente abbassamento delle resistenze. I prodotti commerciali ad azione plastificante contengono, perciò, anche agenti fluidificanti che controbilanciano l'effetto negativo dei plastificanti nei riguardi delle resistenze meccaniche.

### Aeranti

Gli additivi aeranti sono indispensabili per assicurare durabilità alle strutture in calcestruzzo esposte in servizio a cicli di gelo-disgelo, specialmente per calcestruzzi sottoposti a costanti bagnature. Il loro dosaggio (0,05-0,10% sul peso del cemento) deve essere regolato in modo da far sviluppare il volume di aria (4-6%) richiesto per garantire la durabilità.

Gli aeranti sono additivi che consentono d'incorporare una quantità controllata di microbolle di aria, distribuita in modo omogeneo durante la

fase di miscelazione del calcestruzzo fresco, e che permangono anche dopo l'indurimento, diventando parte della matrice legante. L'aria introdotta dagli aeranti è costituita da un'enorme quantità di piccolissime bolle inglobate nel calcestruzzo, non comunicanti né tra loro né con l'esterno. Queste bollicine occludono i pori capillari e in un calcestruzzo soggetto a cicli di gelo e disgelo si comportano come cuscinetti, i quali assorbono le tensioni che si generano in seguito al passaggio acqua liquida-ghiaccio.

L'aria occlusa migliora le proprietà del calcestruzzo fresco. Le bolle di aria, diminuendo gli attriti fra le varie particelle, hanno in un certo qual modo un comportamento simile alla sabbia molto fine, migliorando la fluidità e la plasticità del calcestruzzo. Ne consegue che un aerante è anche un fluidificante-plastificante. Inoltre, le bolle di aria opponendosi all'introduzione di acqua nei capillari, migliorano l'impermeabilità.

Un non trascurabile effetto di un aerante è quello che, a pari rapporto *a/c*, un calcestruzzo aerato presenta resistenza meccanica inferiore a quella di un calcestruzzo non aerato. La diminuzione di resistenza può raggiungere e oltrepassare il 30%. Poiché un aerante agisce anche da fluidificante, tale abbassamento di resistenza può essere in parte ridotto riducendo l'acqua d'impasto. In ogni caso, a pari lavorabilità, il calcestruzzo aerato fornirà sempre resistenze inferiori a quelle del non aerato.

Sono stati proposti, in sostituzione degli additivi aeranti, piccolissime sfere cave (10-100  $\mu\text{m}$ ), a base polimerica, deformabili: la formazione del ghiaccio fa deformare le sfere cave disperse nella matrice cementizia con conseguente rilascio delle tensioni insorte per l'aumento di volume dell'acqua congelata.

## **Acceleranti e ritardanti**

Gli additivi acceleranti e ritardanti, a differenza degli additivi sopra esaminati, non sono impiegati per modificare le prestazioni in servizio, ma solo per agevolare alcune operazioni riguardanti il processo produttivo.

Gli acceleranti rendono più rapido il processo d'idratazione del cemento e sono utilizzati quando si deve mettere in opera il calcestruzzo in climi freddi, con conseguenti ritardi nella presa e indurimento iniziale.

Gli additivi acceleranti fanno aumentare la velocità d'idratazione del cemento. Si dividono in acceleranti di presa o d'indurimento, a seconda che l'azione si manifesti in un'anticipazione dell'inizio presa o in uno sviluppo più rapido della resistenza meccanica.

Gli *acceleranti di presa* sono utilizzati per disporre di un impasto che faccia presa e si autosostenga immediatamente. I prodotti più comuni sono a base di silicato di sodio. L'utilizzo di questo sale, però, comporta una notevole riduzione delle resistenze meccaniche alle lunghe stagionature.

Lo sviluppo della tecnologia ha portato alla formulazione di prodotti che possono soddisfare l'obiettivo di addensare la miscela fresca e portare anche ad un rapido sviluppo delle resistenze meccaniche con limitate perdite a 28 giorni.

La norma UNI 10834 prescrive che gli additivi acceleranti devono garantire resistenza a compressione a 28 giorni, maggiore o uguale a quella determinata su provini non accelerati.

Gli *acceleranti d'indurimento*, spesso indicati come *additivi antigelo*, sono adoperati durante il periodo invernale per confezionare malte e calcestruzzi, anche armati se l'additivo è privo di cloruri, con temperatura ambiente sino a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Essi abbassano la temperatura di congelamento dell'acqua e incrementano il calore sviluppato nell'idratazione del cemento, accelerandone il processo d'idratazione.

Al giorno d'oggi sono stati messi al bando i prodotti a base di cloruri e sono stati posti in commercio additivi, esenti da cloruri, a base di nitrito di calcio e altri composti chimici, che esaltano le caratteristiche acceleranti del nitrito. Inoltre, a differenza degli acceleranti a base di cloruri, l'effetto accelerante sulle resistenze meccaniche si protrae alle lunghe stagionature.

L'accelerazione dell'indurimento a temperatura normale ( $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) è ottenibile riducendo il rapporto  $a/c$  con l'impiego di additivi superfluidificanti o iperfluidificanti. L'additivo accelerante funziona, in pratica, solo per la protezione dei getti durante la stagione invernale come vero e proprio "antigelo".

I *ritardanti di presa*, aggiunti al momento della miscelazione, conservano più a lungo le iniziali proprietà reologiche del calcestruzzo fresco durante il trasporto dall'impianto di betonaggio al cantiere. L'effetto di questi additivi è vantaggioso quando si debba trasportare il calcestruzzo per tempi lunghi in climi caldi o per realizzare opere monolitiche.

Il ritardo dell'idratazione del cemento comporta una bassa resistenza meccanica alle brevi stagionature con un recupero, e un incremento, alle lunghe stagionature rispetto al calcestruzzo non additivato.

## Idrofughi

Gli additivi impermeabilizzanti o idrofughi sono prodotti, liquidi o in polvere, che aggiunti all'impasto durante la fase di miscelazione, riducono la porosità capillare della pasta cementizia. Nel momento in cui detti pori non sono più comunicanti fra loro, si ha una forte riduzione del coefficiente di permeabilità.

In pratica, tenendo conto che l'impermeabilità del calcestruzzo indurito è influenzata dal rapporto  $a/c$  e dalla compattazione, si può produrre un

calcestruzzo impermeabile utilizzando anche additivi iperfluidificanti per confezionare un calcestruzzo fluido, non segregabile, con un rapporto  $a/c$  compreso fra 0,25 e 0,35.

Sono utilizzati per:

- impermeabilizzazione di sotterranei, vasche;
- muri soggetti a continue permeazioni di acqua;
- intonaci di facciate.

## **Coadiuvante di pompaggio**

In un calcestruzzo normale la pressione di pompaggio tende a provocare la separazione della fase acquosa dai componenti solidi. Quando è invece pompato un calcestruzzo leggero, l'acqua è spinta nei pori dell'aggregato. In ambo i casi, modificando la reologia della fase fluida, si ha aumento dell'attrito nella tubazione e conseguente blocco del flusso di calcestruzzo. I coadiuvanti di pompaggio incrementano la coesione dell'impasto e l'adesione di quest'ultimo alle superfici dei componenti solidi. Si riducono così, nei calcestruzzi normali, sia gli attriti interni sia quelli tra miscela e tubazioni e nei calcestruzzi leggeri l'assorbimento di acqua da parte degli aggregati porosi.

## **Agenti espansivi**

Gli agenti espansivi sono prodotti in polvere capaci di provocare nel calcestruzzo, o malta, un aumento di volume tale da compensare il successivo ritiro nello stato indurito.

L'espansione è contrastata da un'armatura ad aderenza migliorata in modo da creare uno stato di precompressione (acciaio teso e conglomerato compresso). Nella successiva fase di ritiro si ha l'annullamento delle tensioni. L'impiego di espansivi è oggi molto diffuso nel campo delle malte da restauro.

## **Riduttori di ritiro**

Questi additivi sono aggiunti all'impasto cementizio per ridurre il ritiro idraulico. Questo è causato dall'evaporazione dell'acqua dai pori con conseguente insorgere di tensioni interne che, in alcuni casi, provocano oltre al ritiro anche fessurazioni.

Il meccanismo di funzionamento è basato sulla riduzione della tensione superficiale dell'acqua contenuta nei pori capillari della matrice cementizia.

Quando sono impiegati in combinazione con i superfluidificanti, il ritiro

può essere ridotto dal 30 all'80% (a secondo delle stagionature). In ogni caso, l'azione di riduzione del ritiro è proporzionale alla qualità dell'impasto.

## **Modificatori di viscosità**

Sono prodotti che modificano in modo sensibile la viscosità dell'impasto cementizio. Questi additivi sono polimeri di natura organica o inorganica, solubili in acqua.

Il meccanismo di azione si diversifica in base alla diversa natura chimica del prodotto. Alcuni composti agiscono aumentando la viscosità dei liquidi, altri possono interagire con le particelle di solido, legandole insieme. Il risultato finale è, comunque, un aumento complessivo della viscosità della miscela. Essi danno all'impasto un corretto profilo reologico, cioè un bilanciamento tra fluidità e resistenza alla segregazione, due proprietà apparentemente antitetiche.

Sono utilizzati nei "calcestruzzi autocompattanti" (SCC) e per i getti subacquei.

## **11.4 Aggiunte idrauliche**

Secondo le norme di molte Nazioni, è possibile aggiungere al calcestruzzo notevoli quantità di cenere volante o loppa macinata al fine di migliorarne la resistenza meccanica e la durabilità. Questa tendenza in Italia è meno sentita per la massiccia presenza sul mercato di cementi di miscela che di per sé hanno già aggiunte, più o meno elevate, di tali prodotti. L'ulteriore loro aggiunta porterebbe a uno scadimento qualitativo del calcestruzzo.

## **11.5 Trattamenti superficiali**

### **Disarmanti**

Questi prodotti hanno la funzione di facilitare il distacco del calcestruzzo indurito dalla superficie dei casseri e di contribuire all'ottenimento di una buona faccia a vista. Vengono applicati sulla superficie dei casseri prima del contatto con il getto di calcestruzzo fresco. Sono, di solito, miscele di oli minerali o vegetali, oppure a base di tensioattivi.

## **Stagionanti**

Gli stagionanti sono applicati sulla superficie di calcestruzzo fresco, creando una pellicola impermeabile, per rallentare l'evaporazione dell'acqua d'impasto e consentire una migliore stagionatura del calcestruzzo.

Sono prodotti importanti quando il clima è sfavorevole, per esempio in ambiente caldo, asciutto e ventilato, oppure quando le superfici esposte sono molto ampie e relativamente sottili come nelle pavimentazioni.

# Il calcestruzzo allo stato fresco

## 12.1 Lavorabilità

La resistenza finale di un calcestruzzo è influenzata dal grado di costipazione raggiunto durante la messa in opera. È della massima importanza, pertanto, che la consistenza dell'impasto sia tale da essere trasportato e gettato con sufficiente facilità e senza che avvengano fenomeni di segregazione. Un calcestruzzo che soddisfa i requisiti di cui sopra è detto *lavorabile*.

Con il termine lavorabilità s'indica, pertanto, l'attitudine di una miscela di aggregati, legante, acqua ed eventualmente additivi a essere sottoposta, senza inconvenienti e a un costo ragionevole, a determinate operazioni di preparazione, trasporto, posa in opera e finitura. La lavorabilità non rappresenta una proprietà intrinseca dell'impasto fresco perché uno stesso calcestruzzo è considerato di lavorabilità adeguata, o meno, in relazione ai sistemi di lavorazione, alla forma e dimensioni del manufatto, alla densità e disposizione delle armature, ai mezzi di compattazione disponibili, alla situazione ambientale.

La lavorabilità coinvolge tre aspetti del comportamento del calcestruzzo fresco, ossia la *stabilità* (nel senso di non segregabilità), la *mobilità* e l'*attitudine alla compattazione* vista sotto il profilo del lavoro che è necessario spendere per vincere l'attrito interno tra le particelle.

L'attitudine alla compattazione è importante per agevolare, per effetto della vibrazione, la fuoriuscita dell'aria intrappolata nel calcestruzzo fresco e assicurare la massima densità possibile del materiale indurito, oltre che il massimo contatto tra armatura e calcestruzzo. A parità di sistema vibrante, in un calcestruzzo molto lavorabile, l'aria intrappolata è facilmente espulsa, mentre in un calcestruzzo poco lavorabile possono permanere macrovuoti di aria (*vespai*) che penalizzano la resistenza meccanica,

l'aderenza ferro-calcestruzzo e la protezione dalla corrosione delle armature metalliche.

La lavorabilità del calcestruzzo dipende dal contenuto di acqua, dal rapporto  $a/c$  e da quello aggregato/cemento (cioè dal dosaggio di cemento).

Il contenuto di acqua comprende l'acqua d'impasto più quella eventualmente contenuta dall'aggregato ed eccedente l'umidità nella condizione di saturo a superficie asciutta. Nel caso che l'aggregato sia insaturo o asciutto, occorre sottrarre all'acqua d'impasto quella necessaria a saturare i pori dell'aggregato.

## 12.2 Perdita di lavorabilità

Il calcestruzzo, subito dopo la miscelazione, perde progressivamente la sua mobilità iniziale. Pertanto, una misura della lavorabilità, intesa come misura della mobilità, dovrebbe tener conto del tempo che intercorre tra il mescolamento e la posa in opera, giacché è soprattutto in questa seconda fase che interessa la lavorabilità del calcestruzzo.

Le cause della perdita di lavorabilità sono l'assorbimento di acqua da parte di aggregati insaturi, l'evaporazione e le reazioni dell'acqua stessa con il cemento. I fattori che influenzano la perdita di lavorabilità sono il tempo, la temperatura e le modalità di trasporto del calcestruzzo, mentre influenze meno importanti, anche se non trascurabili, sono esercitate dal tipo di cemento, dal rapporto aggregati/cemento, dalla presenza di additivi.

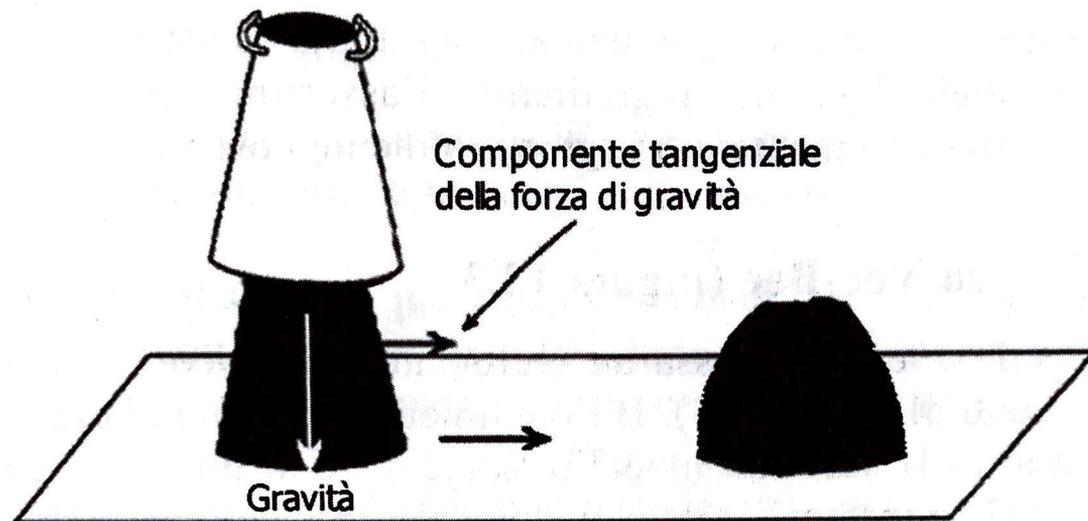
## 12.3 Misura della lavorabilità

Nessun metodo permette di misurare direttamente la lavorabilità. Esistono invece diversi metodi, ciascuno dei quali ne mette in evidenza un aspetto.

Le informazioni di maggiore utilità pratica si ricavano con il cono di Abrams (*slump*), il consistometro Vee-Bee, il consistometro di Walz e con la tavola a scosse.

### Cono di Abrams o *slump test*

Il cono di Abrams è il metodo più rapido, di più semplice esecuzione e necessita di un'attrezzatura economica ed è, perciò, impiegato in cantiere. Una forma tronco conica di acciaio, poggiata su una lastra metallica orizzontale, è riempita con strati successivi di calcestruzzo, avendo cura di costipare strato dopo strato, secondo modalità prefissate. Dopo aver rasato la



**Figura 12.1** Nel cono di Abrams l'impasto scorre sotto l'azione della forza di gravità.

superficie superiore con una cazzuola, si solleva la forma metallica. L'impasto, non più sostenuto, cede al proprio peso e il cono si allarga diminuendo di altezza, Figura 12.1.

L'abbassamento in mm, detto anche grado di assestamento o *slump*, è la misura della *consistenza al cono*. Il cedimento può manifestarsi secondo i modi mostrati in Figura 12.2. Il primo rappresenta il vero *slump* e si osserva con i calcestruzzi plastici mentre il secondo mostra un cedimento per taglio ed è presentato da impasti asciutti, mentre il crollo è tipico d'impasti troppo fluidi.

La misura dello *slump*, attendibile soltanto nel primo caso, consente una buona valutazione della mobilità per impasti di alta e media lavorabilità, ossia né fluidi né troppo asciutti.

## 12.4 La lavorabilità e l'affidabilità

Se si eccettuano alcune particolari tipologie strutturali, per le quali la tecnica esecutiva adottata (vibrofinitrice o casseri rampanti) richiede una particolare classe di consistenza (terra umida con la vibrofinitrice e plastica con i casseri rampanti), per la quasi totalità delle opere in calcestruzzo, gettato entro casseri, la lavorabilità prescelta è compresa tra la classe di consistenza semifluida ( $S3$ ) e quella superfluida ( $S5$ ). In generale, maggiore è la densità dei ferri di armatura più elevata deve essere la fluidità del calcestruzzo.

Un calcestruzzo più lavorabile è anche meno dipendente dall'efficacia della compattazione in opera, ossia dalla qualità della manodopera sul cantiere: in sostanza, esso è più affidabile. Se si confrontano due calcestruzzi di pari composizione (in particolare di pari  $a/c$  e tipo di cemento), ma differenti solo per la classe di consistenza ( $S5$  e  $S2$ ), per la presenza o meno di un additivo superfluidificante, si otterrà la stessa resistenza meccanica (in relazione allo stesso rapporto  $a/c$  e allo stesso cemento) purché i due calcestruzzi siano vibrati per un tempo sufficientemente lungo, così da ottenere lo stesso grado di compattazione.

## 12.5 Segregazione

Non esistono metodi di misura della segregazione degli aggregati, ossia della separazione dei diversi costituenti solidi la miscela (Figura 12.4), che consentano di valutare l'entità del fenomeno in maniera quantitativa. I metodi disponibili sono laboriosi e forniscono solo indicazioni qualitative. Per esempio, la tendenza alla segregazione può essere valutata compattando un provino di calcestruzzo in maniera standardizzata e misurando la variazione del centro di gravità a causa della segregazione, oppure spaccando il provino in due porzioni eguali – una superiore e l'altra inferiore – e misurare il contenuto di aggregati grossi in ciascuna delle due frazioni.

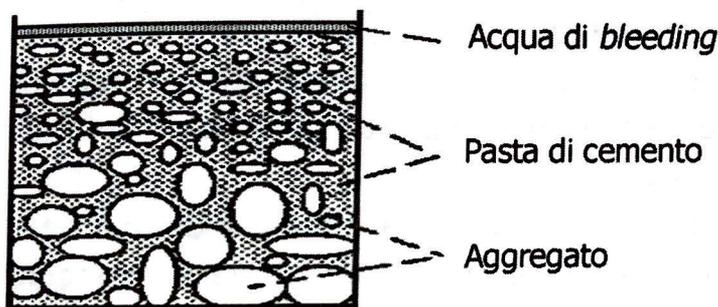


Figura 12.4 Segregazione e *bleeding* del calcestruzzo.

### *Bleeding*

Al termine della posa in opera, prima dell'inizio della presa, la sospensione delle particelle di cemento non è stabile, ma sedimenta con segregazione di parte dell'acqua d'impasto, che tende ad affiorare alla superficie.

Per i calcestruzzi la velocità di sedimentazione è piccola, dell'ordine di alcune decine di milionesimi di cm/sec e la durata del processo è piuttosto breve (90-120 minuti). Di conseguenza il fenomeno sarebbe osservabile con difficoltà se sulla superficie orizzontale dell'impasto non si formasse uno strato di acqua. La sedimentazione, vista sotto l'aspetto dell'acqua che affiora in superficie, è descritta con il termine di *bleeding*, dall'inglese *to bleed*: essudare (Figura 12.4).

Quantunque il fenomeno sia di entità molto modesta, tuttavia dà luogo a numerosi difetti, per la gran parte invisibili dall'esterno, ma di rilevante importanza nei riguardi delle proprietà dell'impasto indurito.

Nella posa in opera in una forma profonda, se il calcestruzzo presenta un *bleeding* copioso, gli strati superiori si arricchiscono in acqua e, a causa dell'aumento del rapporto *a/c*, presenteranno caratteristiche inferiori rispetto alle zone a maggiore profondità. Inoltre, parte dell'acqua può essere bloccata sotto la superficie di grosse particelle di aggregati, in parti-

colare se appiattite, o sotto le armature, creando zone di scarsa coesione.

L'acqua di *bleeding* è, pur tuttavia, qualche volta di vantaggio. L'acqua di *bleeding* nella finitura di una pavimentazione è utile a lubrificare gli utensili e a impedire che si crei la situazione di tensione idrostatica tipica del ritiro plastico. Tuttavia, se il *bleeding* è eccessivo, il trattamento di finitura provoca il richiamo in superficie di un sottile strato di sospensione finissima con scadimento delle caratteristiche superficiali.

Le paste di cemento molto fluide (con un rapporto *a/c* compreso tra 1 e 2), dette anche boiacche, sono impiegate per il riempimento di vuoti all'interno di un sistema da consolidare. Per esempio, s'inietta una boiaccia di cemento per il consolidamento di una muratura a sacco in edilizia o di una roccia fessurata in geotecnica, o per il riempimento delle guaine di una struttura precompressa al fine di proteggere dalla corrosione i ferri post-tesi. Il *bleeding*, in queste applicazioni, comporta un incompleto riempimento del sistema da consolidare o da proteggere. Infatti, a indurimento avvenuto, l'acqua di *bleeding* rappresenta una porzione destinata a rimanere vuota per effetto della successiva evaporazione o della migrazione dell'acqua stessa nelle zone adiacenti porose.

Fermo restando che la sospensione cementizia da iniettare deve essere fluida, per ridurre o eliminare il *bleeding* e i difetti che ne derivano, si può agire su:

- la finezza del cemento;
- le aggiunte minerali;
- gli additivi chimici.

L'aumento della finezza del cemento comporta un duplice benefico effetto nella riduzione del *bleeding*: innanzi tutto la diminuzione della dimensione particellare comporta una minore velocità di sedimentazione come si evince dalla legge di Stokes. In secondo luogo, la maggiore area superficiale specifica del cemento, conseguente alla sua maggiore finezza, comporta una reazione più rapida con l'acqua e, quindi, un più rapido aumento della viscosità del sistema. Si riduce, pertanto, il tempo disponibile per la sedimentazione delle particelle solide e l'affioramento dell'acqua: entrambi i fenomeni, infatti, cessano con l'inizio della presa.

In aggiunta alla riduzione del *bleeding*, una finezza più spinta presenta anche il vantaggio di una più facile penetrazione dei micro-vuoti esistenti nel sistema da consolidare. Tutto ciò ha portato allo sviluppo dei cosiddetti **microcementi**, i quali presentano la quasi totalità delle particelle di cemento sotto 10  $\mu\text{m}$ , contro una dimensione massima di 80-100  $\mu\text{m}$  per i cementi normali.

I cementi microfini devono essere impiegati con elevati rapporti *a/c* (circa 1) perché la loro elevata reattività, conseguente della grande superficie esposta all'acqua, provoca un irrigidimento eccessivo con gli usuali rapporti *a/c*.

Le aggiunte minerali impiegate per la riduzione del *bleeding* nelle sospensioni cementizie, sono di tre tipi: bentonite, *silica fume* e silice colloidale. In tutti i casi si tratta di prodotti inorganici a elevatissima area superficiale specifica in grado di sedimentare molto lentamente.

Gli additivi chimici possono ridurre il fenomeno del *bleeding* attraverso meccanismi diversi:

- riducendo l'acqua necessaria, con i superfluidificanti, per ottenere una determinata fluidità;
- con gli aeranti, provocando la formazione di microbolle di aria che, legandosi ai granuli di cemento, ne riducono la sedimentazione;
- con gli acceleranti di presa;
- con gli additivi addensanti (a base di metil-cellulosa) che aumentano la viscosità del mezzo fluido (acqua), riducendo la sedimentazione delle particelle solide.

## 12.6 Ritiro plastico

È così denominato il ritiro che si manifesta entro le prime ore dopo la posa in opera, prima del completamento della presa, quando la miscela è ancora plastica e si differenzia dal ritiro idraulico che si manifesta invece nella pasta indurita.

Il ritiro plastico è dovuto alla perdita di acqua, principalmente per evaporazione, ma anche per assorbimento da parte delle casseforme e degli aggregati porosi non *s.s.a.* Può giungere a provocare fessurazioni superficiali che si sviluppano, di preferenza, in corrispondenza di elementi che ostacolano un riassetto uniforme dell'impasto, come per esempio armature o aggregati di dimensioni più grandi.

Il ritiro plastico può essere evitato se si impedisce l'evaporazione dell'acqua. È evidente che il fenomeno acquista particolare rilevanza nella stagione estiva e la sua entità è controllata dalla temperatura e umidità dell'aria, dalla temperatura del calcestruzzo e dalla velocità del vento.

La velocità di evaporazione dell'acqua dalla superficie del getto può essere diminuita ricorrendo ai seguenti accorgimenti: saturare gli aggregati e bagnare le casseforme, nella stagione estiva mantenere bassa la temperatura del calcestruzzo e in quella invernale evitare un eccessivo riscaldamento degli ingredienti, erigere frangivento e proteggere i getti dal sole, salvaguardare il manufatto durante le prime ore dal getto con teli umidi o con additivi stagionanti.

## 12.7 Lavorazione in clima caldo

La temperatura elevata agisce anche sulla velocità di presa e sul ritiro a indurimento avvenuto. La maggiore velocità di presa condiziona in modo determinante i tempi di trasporto, di posa in opera e di compattazione. Il ritiro dell'impasto indurito sarà maggiore, perché tale è stata la domanda di acqua, a parità di consistenza, al momento del betonaggio. Poiché questo ritiro si manifesta in una fase nella quale la resistenza meccanica è ancora modesta, è molto probabile che si abbiano formazione di fessure. Gli inconvenienti menzionati crescono d'intensità se alla temperatura elevata si aggiungono bassa umidità e una ventilazione quantunque moderata. Una tale combinazione di eventi è, tra tutte, la più sfavorevole.

Esistono alcuni accorgimenti pratici che possono essere presi in considerazione. Il tenore in cemento deve essere tenuto il più basso possibile, affinché il calore d'idratazione non aggravi ulteriormente l'effetto della temperatura elevata. La temperatura stessa del calcestruzzo fresco può essere diminuita pre-raffreddando uno o più componenti del calcestruzzo. Si può usare, per esempio, ghiaccio in sostituzione di parte dell'acqua d'impasto (accertandosi della sua completa fusione prima del termine del mescolamento). Il raffreddamento degli aggregati è più difficoltoso.

L'impiego di cemento caldo può non essere evitato. Semplici calcoli permettono di stabilire che l'utilizzo di un cemento a 80 °C comporta un aumento della temperatura del calcestruzzo di 10-15 °C.

## 12.8 Produzione dell'impasto

Gli ingredienti, dosati secondo i rapporti di composizione prescelti, sono mescolati in betoniera in modo da amalgamare gli aggregati nella pasta e disperdere in modo omogeneo i diversi componenti. La durata della miscelazione dipende dal volume d'impasto, dalla sua consistenza, dal tipo di aggregati e dalle caratteristiche operative della macchina. Non è quindi possibile stabilire regole precise. Di solito la soluzione ottimale si trova controllando in cantiere le prestazioni del mescolatore nella particolare situazione d'impiego. Il controllo si effettua mediante prove di uniformità.

## 12.9 Stagionatura (*curing*)

Al fine di ottenere un buon calcestruzzo, una volta effettuato il getto, è necessario che esso sia "stagionato" in adatte condizioni, nel periodo iniziale. S'intende per stagionatura l'insieme di quelle procedure che assicurano

un'adeguata idratazione del cemento e che consistono nel controllo della temperatura e dell'umidità del calcestruzzo.

La necessità di stagionare in modo idoneo i getti freschi appare evidente dal fatto che l'idratazione del cemento può avvenire solo nell'ambito della fase acquosa che riempie i pori capillari. È necessario, pertanto, evitare che questi si svuotino per evaporazione verso l'esterno. Se vi è un apporto di acqua dall'esterno non vi sono rischi in questo senso.

L'evaporazione dell'acqua dai getti freschi dipende dalla temperatura, dall'umidità relativa dell'ambiente e dalla velocità del vento. Gli accorgimenti adottati per ottenere la migliore stagionatura sono diversi, secondo il tipo di cantiere, il tipo di getto e il clima in cui esso è effettuato.

Se il getto ha un rapporto superficie/volume modesto, si può procedere a una periodica bagnatura. Vaste superfici esposte, come manti stradali o solai, presentano maggiori problemi. Al fine di prevenire il ritiro plastico, deve essere impedita la perdita di acqua anche prima dell'inizio della presa. Dopo la presa, l'ambiente può essere mantenuto umido irrorando in continuazione la superficie o coprendo la superficie stessa con sabbia bagnata, segatura, paglia. Esistono oggi mezzi di stagionatura più progrediti e di più facile applicazione, costituiti da vernici isolanti applicabili a spruzzo o a pennello.

# Calcestruzzi particolari

## 14.1 Calcestruzzo leggero

Il calcestruzzo leggero è un conglomerato cementizio la cui massa volumica – variabile tra 300 e 2000 kg/m<sup>3</sup> – è inferiore a quella di un calcestruzzo ordinario, in genere compresa tra 2300-2650 kg/m<sup>3</sup>. La ridotta massa volumica è ascrivibile alla presenza di un sistema di vuoti.

L'introduzione di un sistema di vuoti nel conglomerato cementizio si realizza in tre modi, ciascuno dei quali caratterizza il calcestruzzo con una diversa microstruttura:

- sostituendo gli aggregati ordinari con aggregati naturali o artificiali caratterizzati da un'elevata porosità e, quindi, da una ridotta massa volumica; vengono definiti in tal caso calcestruzzi con aggregati leggeri;
- inglobando nella malta bolle di aria oppure di gas di dimensioni di 1-2 mm; questi sono i calcestruzzi aerati;
- utilizzando un aggregato ordinario in pezzatura grossa monogranulare, i cui granuli sono legati da uno strato sottile di pasta cementizia, in modo da creare un sistema di vuoti grossolani tra i granuli di aggregato; sono indicati come calcestruzzi alveolari.

### Calcestruzzo con aggregati leggeri

Il calcestruzzo con aggregati leggeri è, tra i conglomerati alleggeriti, il più interessante poiché consente di coniugare il requisito di leggerezza con le esigenze di resistenze meccaniche, per la realizzazione di strutture armate.

Per il maggior costo di produzione degli aggregati leggeri rispetto a quelli ordinari, il costo per metro cubo di calcestruzzo leggero è superiore a quello di un calcestruzzo comune. Tuttavia, l'impiego del calcestruzzo leggero può essere più economico giacché, per la sua leggerezza, diminui-

scono i carichi permanenti della struttura ed è possibile ridurre le dimensioni degli elementi strutturali. Il peso minore dell'ossatura portante permette, inoltre, di costruire anche su terreni di scarsa portanza, senza dover ricorrere a tipologie di fondazione complesse e costose.

L'utilizzo di questi calcestruzzi è molto vasto. Variando la composizione della miscela (*mix design*) è possibile ottenere calcestruzzi strutturali e non.

Gli aggregati leggeri impiegati per la produzione dei calcestruzzi si contraddistinguono per la struttura cellulare molto porosa, con una massa volumica in mucchio minore di  $1100 \text{ kg/m}^3$ . Dal punto di vista delle applicazioni nel campo strutturale, e non, gli aggregati leggeri di maggior importanza sono senz'altro le argille espanse.

## Calcestruzzo con argilla espansa

In aggiunta alle doti di leggerezza, questo tipo di calcestruzzo, per la natura vetrificata dei granuli di argilla espansa – alveolare all'interno ma chiusa verso l'esterno –, assicura anche isolamento termico.

Con questi aggregati il contenuto di cemento deve essere del 20-30% superiore rispetto ai contenuti di cemento richiesti dai calcestruzzi con aggregati normali. Tuttavia, esiste una soglia di resistenza oltre la quale un aumento del dosaggio di cemento non porta benefici apprezzabili. Usando materiali e metodi di preparazione opportunamente scelti, si ottengono resistenze fino a 40 MPa. Resistenze più elevate, fino a 70 MPa, possono essere ottenute con aggregati aventi un grado di espansione inferiore e utilizzando per la parte più fine del fuso granulometrico una sabbia tradizionale.

La lavorabilità di un calcestruzzo con argilla espansa è, in genere, inferiore a quella dei calcestruzzi con aggregati normali. La lavorabilità può essere migliorata mediante l'impiego dell'aggregato fine con massa volumica "normale". In tal modo però la densità del calcestruzzo è più elevata. All'uopo si può operare anche con l'aggiunta di additivi superfluidificanti. D'altra parte, calcestruzzi leggeri molto fluidi possono presentare fenomeni di segregazione a causa del galleggiamento degli aggregati. Calcestruzzi leggeri fluidi e non segregabili sono ottenuti impiegando additivi superfluidificanti *ad hoc*. Il calcestruzzo con argilla espansa non richiede attrezzature particolari per essere messo in opera ed essere anche pompato.

Infine, è da notare che i calcestruzzi con argilla espansa presentano una maggiore resistenza al fuoco.

## **Calcestruzzo cellulare**

I metodi di preparazione del calcestruzzo cellulare, meglio definibile come microcalcestruzzo, con introduzione di gas nella malta di cemento, sono di due tipi. Il primo consiste nella formazione di bollicine di idrogeno prodotto dalla reazione tra alluminio, o zinco, in polvere, aggiunto all'impasto, e idrossido di calcio proveniente dall'idratazione dei silicati. L'aggiunta della polvere di metallo è pari a circa 0,2% rispetto al peso di cemento. L'idrogeno diffonde verso l'esterno e i vuoti del calcestruzzo indurito si riempiono progressivamente di aria.

Un secondo metodo si basa sulla produzione di bolle mediante l'aggiunta di sostanze schiumogene durante la miscelazione della malta con acqua. La resistenza meccanica e la conducibilità termica, come per gli altri manufatti cementizi leggeri diminuiscono con il diminuire del peso specifico del materiale cellulare. Il ritiro è maggiore di quello del calcestruzzo ordinario. Se il calcestruzzo cellulare è stagionato a vapore ad alta pressione migliorano le resistenze meccaniche e diminuisce il ritiro.

Questi calcestruzzi trovano impiego non solo per la leggerezza e la bassa conducibilità termica, ma anche per la resistenza al fuoco e al gelo.

## **Calcestruzzo monogranulare (alveolare)**

Il calcestruzzo monogranulare è preparato mescolando cemento, acqua e aggregati monogranulari aventi una dimensione variabile tra 1 e 2 cm. In queste condizioni ciascuna particella di aggregato è circondata da pasta di cemento di spessore più o meno uniforme intorno al millimetro. Ne risulta un calcestruzzo poroso e leggero.

La massa volumica del calcestruzzo può essere ulteriormente ridotta utilizzando aggregati leggeri monogranulari.

Tra le altre caratteristiche del calcestruzzo monogranulare sono da segnalare l'elevata resistenza al gelo, dovuta alla forte riduzione di pori capillari, le buone caratteristiche di isolante termico e acustico. Inoltre, il ritiro è minore di quello del calcestruzzo ordinario, per la presenza di una piccola quantità di pasta cementizia. Naturalmente, la resistenza meccanica di questi calcestruzzi diminuisce con il diminuire della sua massa volumica.

## **Calcestruzzo leggero isolante**

Questo conglomerato, avente una massa volumica compresa fra 200 kg/m<sup>3</sup> e 1000 kg/m<sup>3</sup> e una resistenza a compressione che varia da 0,3 a 4 MPa, è

prodotto miscelando malta cementizia con aggregati costituiti da granuli di polistirolo espanso o di vermiculite.

Questi microcalcestruzzi sono utilizzati quando è richiesto un elevato isolamento termico, con valori di termo-coibenza vicini a quelli degli isolanti "classici", in unione con una resistenza meccanica più elevata. Essi consentono anche il riempimento alleggerito d'interstizi. Oltre all'elevato potere di termo-coibenza, presentano in genere:

- trascurabile assorbimento di acqua;
- buona resistenza al fuoco;
- stabilità dimensionale.

## 14.2 Calcestruzzo pesante

Il calcestruzzo pesante – con massa volumica di  $3000 \div 4000 \text{ kg/m}^3$  – è ottenuto impiegando aggregati con elevata massa volumica. Esso è destinato alle strutture che devono proteggere l'ambiente da radiazioni nocive. In tal caso, l'impiego di un calcestruzzo ordinario richiederebbe strutture con sezioni troppo elevate.

L'aggregato pesante più impiegato è la barite,  $\text{BaSO}_4$ , che presenta una massa volumica di circa  $4,1 \text{ g/cm}^3$ . Nella confezione e nelle operazioni di getto occorre massima precauzione affinché non si verifichi segregazione degli aggregati.

## 14.3 Calcestruzzo pompabile

Un calcestruzzo è "pompabile" quando può essere messo in opera mediante l'impiego di un'ideale pompa. I vantaggi operativi sono:

- aumentata velocità nelle operazioni di getto;
- possibilità di raggiungere posizioni difficili o inaccessibili con altri mezzi.

La miscela per un calcestruzzo pompabile deve essere proporzionata in modo da conferire al calcestruzzo due caratteristiche fondamentali: omogeneità – così da scorrere senza sforzo in tutta la tubazione senza separarsi – e deformabilità – affinché possa essere aspirato e compresso dalla pompa e passare con facilità attraverso sezioni a gomito, restringimenti e giunti delle tubazioni.

Affinché il calcestruzzo sia allo stesso tempo omogeneo e deformabile, deve essere progettato in termini di composizione, tenendo conto della:

- giusta quantità di malta costituita con sabbia passante a  $0,25 \text{ mm}$  o *fly ash* o *silica fume*;

- morfologia degli aggregati;
- lavorabilità del calcestruzzo.

La corretta quantità di malta nel calcestruzzo da pompare è importante. Infatti, il suo contenuto, in volume, deve essere tale da avvolgere gli aggregati medi e grossi e nello stesso tempo garantire un giusto grado di coesione. Si tengono così legati gli aggregati durante il pompaggio e la contemporanea formazione di un film lubrificante sulle pareti delle tubazioni. Il volume ottimale di malta dipende dalla forma e assortimento degli aggregati medi e grossi.

La forma ideale dell'aggregato è quella tonneggiante. È comunque possibile pompare anche materiale di frantumazione, a patto che sia prevalentemente poliedrico. È necessaria, in tal caso, una maggiore quantità di malta cementizia per riempire i vuoti tra i diversi granuli, avendo gli aggregati poliedrici una superficie più elevata rispetto a quella degli aggregati tonneggianti. È da escludere elevate quantità di granuli a forma piatta o aghiforme.

La curva di riferimento ottimale per il calcestruzzo da pompare è una curva piuttosto appiattita nella zona intermedia, tra 2 e 8 mm (in casi particolari perfino con andamento orizzontale), in modo tale che l'aumentata quantità di materiali fini sia compensata dalla riduzione delle frazioni intermedie. Queste frazioni, d'altra parte, sono poco influenti sullo sviluppo delle resistenze meccaniche.

Il calcestruzzo pompato ideale non deve essere troppo fluido. I migliori risultati si ottengono con calcestruzzi con *slump* compresi tra 12 e 18 cm e un fattore di compattazione tra 1,05 e 1,03. Quanto sopra illustrato corrisponde al vero nel caso di produzione di calcestruzzi normali, senza aggiunta di additivi riduttori di acqua. Tuttavia, oggi, componente sempre presente nella produzione del calcestruzzo pompato è l'additivo, in particolare superfluidificanti e/o coesivizzanti (definiti anche coadiuvanti di pompaggio). La nuova generazione di superfluidificanti, i polycarbossilati modificati, consente di produrre una malta legante molto fluida e nello stesso tempo coesiva, tale da consentire un'efficace pompabilità di calcestruzzi superfluidi o autocompattanti, senza fenomeni di segregazione.

## 14.4 Calcestruzzo autocompattante

Il calcestruzzo autocompattante (*Self Compacting Concrete SCC*) è definito dalla Norma UNI "calcestruzzo omogeneo che è messo in opera e compattato senza intervento di mezzi esterni (vibrazione) ma per effetto della sola forza gravitazionale. Il calcestruzzo autocompattante, oltre a soddisfare i requisiti di classe di resistenza e di esposizione definiti nella

UNI EN 206-1, ha la specifica proprietà, allo stato fresco, di un'elevata fluidità con assenza di segregazione".

Il calcestruzzo autocompattante è messo in opera (sia per mezzo di una pompa che direttamente dalla "canala" dell'autobetoniera) senza l'ausilio di personale che lo distribuisca nel cassero e lo costipi con vibratori, qualsiasi sia la forma del cassero e la densità dei ferri di armatura.

Il calcestruzzo SCC fresco deve avere due requisiti fondamentali: poter scorrere e fluire facilmente e, allo stesso tempo, essere resistente alla segregazione, cioè essere coesivo. Ciò si può ottenere operando sul *mix design*.

Il calcestruzzo autocompattante si può considerare costituito da due fasi di cui una – la malta – costituisce il fluido trasportatore, l'altra, invece, costituita dagli aggregati, rappresenta la fase "trasportata". La possibilità di confezionare un calcestruzzo autocompattante è associata all'aumento del volume di materiale finissimo, che costituisce il fluido trasportatore, a scapito di un minor volume di aggregato grosso, che è il trasportato.

Il materiale finissimo deve avere particelle di diametro massimo pari a 150  $\mu\text{m}$ . Alcuni, come le ceneri volanti, le loppe di altoforno, la *silica fume* contribuiscono, insieme al cemento, alla resistenza meccanica del calcestruzzo. Altri, come la polvere di calcare, servono solo per aumentare il contenuto di parti fini.

Con riferimento alla formulazione, i calcestruzzi autocompattanti devono avere:

- dosaggio di cemento elevato (400-500  $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- minore volume di aggregato grosso (280-350 litri per  $\text{m}^3$ ), per ridurre la quantità di materiale trasportato;
- dimensione max dell'aggregato al di sotto di 20-25 mm (aggregati più grossi si muovono con difficoltà).
- aggiunta di prodotti finissimi (500-600  $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- rapporto acqua/cemento compreso tra 0,30 e 0,35;
- impiego di additivi modificatori di viscosità;
- aggiunta di additivi iperfluidificanti.

Una serie di prove, che fanno riferimento ad apposite norme UNI richiamate dalla norma generale UNI 11040, qualificano il SCC. Esse determinano l'attitudine del calcestruzzo autocompattante a scorrere entro spazi confinati e verificano l'eventuale tendenza del calcestruzzo a "bloccarsi". In particolare le prove di:

- *Slump-Flow Test* (svuotamento al cono) determinano la consistenza del SCC mediante la misura dello spandimento e del tempo impiegato per raggiungere i 500 mm di diametro;
- *V-Funnel Test* dà un indice della variazione di viscosità del calcestruzzo attraverso la misura del tempo di efflusso da un imbuto standard a tem-

po zero e dopo 5 minuti;

- *J-ring* valuta la capacità del calcestruzzo ad attraversare ostacoli, in presenza di barre di armatura molto fitte, rapportando le altezze raggiunte dal calcestruzzo a monte e a valle di un anello;
- *scatola a L* e *scatola ad U* valutano la capacità della miscela di calcestruzzo a scorrere senza bloccarsi.

Il controllo del calcestruzzo indurito, invece, non si differenzia da quello di un calcestruzzo tradizionale (resistenza a compressione, misura del ritiro ecc.).

Il calcestruzzo autocompattante è consigliabile per:

- azzerare i costi di messa in opera del calcestruzzo, evitando qualsiasi intervento di compattazione e vibrazione;
- migliorare le condizioni di lavoro e il rendimento degli operatori in fase di getto;
- ridurre i tempi di esecuzione delle opere;
- eseguire getti che presentino difficoltà di posa in opera per fittezza dell'armatura metallica, presenza di inserti o complessa articolazione dei casseri, evitando nello stesso tempo ogni rischio di formazione di vespai; le prestazioni ottenibili in termini di faccia a vista, compattezza ed omogeneità della matrice sono superiori a quelle fornite dai calcestruzzi tradizionali.

Nella messa in opera del SCC si raccomanda di:

- non superare di 5 m l'altezza di caduta;
- pompare il calcestruzzo dal basso;
- non oltrepassare di 15 m la massima distanza di scorrimento;
- curare e stagionare in condizioni identiche a quelle di un calcestruzzo tradizionale;
- utilizzare, per il calcolo delle casseforme, a scopo cautelativo, la spinta idrostatica; ciò in quanto la spinta aumenta con l'aumentare dell'innalzamento dei getti.

Il SCC, per le sue caratteristiche qualitative e per i vantaggi tecnici ed economici che ne derivano, è destinato a trovare crescenti aree di impiego in sostituzione dei calcestruzzi tradizionali.

## 14.5 Calcestruzzo ad alte prestazioni

Il calcestruzzo ad alte prestazioni, noto in inglese come *HPC (High Performance Concrete)* è caratterizzato da una resistenza meccanica a compressione superiore a 80 MPa grazie a:

- un ridotto rapporto *a/c* (0,25-0,35) per l'impiego di additivi superriduttori di acqua (iperfluidificanti);

- un impiego di aggiunte minerali ad alta attività pozzolanica ed elevata area superficiale specifica come la *silica fume*, la loppa di altoforno microfine, zeoliti ecc.;
- aggregati di frantumazione con un'elevata resistenza meccanica intrinseca della roccia e ottima adesione, all'interfaccia, tra elemento lapideo e matrice cementizia.

Un elenco non esaustivo delle principali applicazioni per questi calcestruzzi comprende i settori delle costruzioni:

- di strutture che richiedono prestazioni di alto livello non solo in termini di resistenza meccanica, ma anche di durabilità;
- di contenitori di alta affidabilità per lo stoccaggio di fluidi o solidi pericolosi per tossicità, infiammabilità ecc.

## 14.6 Calcestruzzo a vista

La tendenza attuale è di ridurre il più possibile il numero delle lavorazioni da eseguire in cantiere. Per questo motivo, in molti casi, la superficie dei getti di calcestruzzo, dopo la scasseratura, non è rivestita, ma resta visibile durante l'uso della struttura: calcestruzzo a vista. È evidente l'importanza, in questi casi, di ottenere superfici gradevoli, omogenee e prive di difetti.

Nel calcestruzzo a vista riveste importanza la qualità degli aggregati. La "pelle", ossia la superficie esterna del conglomerato cementizio, ha composizione diversa rispetto alla parte interna, in quanto è costituita, in maggior parte, da pasta cementizia e sabbia e in essa l'aggregato grosso non appare. La frazione grossolana dell'aggregato è influente rispetto al colore della pelle, a meno che l'aggregato non presenti elementi piatti e la sabbia sia carente in finissimo. In tal caso, gli elementi grossi prossimi alla superficie formano macchie scure che riproducono la forma dell'aggregato (effetto trasparenza). Pure il colore dell'aggregato grosso è poco influente, a meno che successive lavorazioni non asportino la pelle del calcestruzzo.

Il calcestruzzo a vista può presentare superfici "tal quali", che non subiscono ulteriori lavorazioni dopo la rimozione dei casseri, la cui tessitura superficiale, liscia o sagomata, è impressa dai casseri stessi, oppure superfici lavorate (meccanicamente o lavate) su cui la frazione grossa dell'aggregato è messo in vista.

L'aspetto cromatico delle superfici "tal quali" risulta dai colori del cemento e dell'aggregato fine. Una sabbia molto chiara, in combinazione con un cemento bianco, è indicata quando si desidera ottenere una superficie bianca, mentre una sabbia colorata permette di ottenere effetti cromatici

con tonalità particolari. Viceversa, il colore e la qualità dell'aggregato grosso sono importanti nella realizzazione di superfici a vista lavorate.

Nel calcestruzzo a vista è importante che la sabbia abbia caratteristiche granulometriche costanti<sup>1</sup>. Inoltre, è fondamentale l'utilizzo di idonee casseforti, avendo cura di effettuare su di esse un'accurata pulizia dopo ogni getto. In alternativa, si utilizzano casseforti a perdere. La scelta del tipo di disarmante deve essere effettuata anche in funzione della tipologia della cassaforma.

È di primaria importanza effettuare il getto della struttura in un'unica operazione, per evitare di creare riprese di getto antiestetiche.

Anche la scelta del tipo di cemento è importante. Il cemento al calcare risulta quasi sempre indicato allo scopo. Cementi assolutamente non indicati sono i cementi contenenti loppa di altoforno, in quanto causano *bleeding* e antiestetiche macchie bluastre, che scompaiono solo dopo lungo tempo.

Esiste una consistenza ottimale per ogni tipo di cassero e modalità di vibrazione. Una bassa lavorabilità genera formazione di vespai ed espulsione incompleta di aria. D'altra parte, un'elevata lavorabilità provoca tendenza alla segregazione, *bleeding* e striature di sabbia.

I trattamenti adottati per la lavorazione della superficie, con l'asportazione della pelle, possono essere ricondotti sia al lavaggio del calcestruzzo non ancora indurito in superficie – spennellando sulla superficie dei casseri un additivo ritardante – sia ricorrendo alla lavorazione meccanica (bocciardatura, spuntatura, sabbiatura). Gli effetti dei due trattamenti sono differenti: mentre il sistema ritardante + lavaggio fa apparire gli aggregati più grossi come incastonati sulla superficie, l'altro mette in luce la tessitura interna del calcestruzzo.

## 14.7 Calcestruzzo fibrorinforzato

Una tecnologia che mira a prevenire le fessurazioni, o meglio, la propagazione delle fessure nel calcestruzzo, e nelle malte, utilizza una dispersione omogenea e casuale di fibre all'interno del calcestruzzo.

---

<sup>1</sup> La costanza di fornitura di una sabbia può essere verificata prendendo come riferimento il Modulo di Finezza (MF), parametro calcolato in base alla somma delle percentuali del trattenuto cumulativo sulla serie standard di setacci:

$$MF = \frac{\Sigma (> 4 \text{ mm}) + (> 2 \text{ mm}) + (> 1 \text{ mm}) + (> 0,5 \text{ mm}) + (> 0,25 \text{ mm}) + (> 0,125 \text{ mm})}{100}$$

## **Fibre sintetiche (polimeriche)**

Esistono due principali categorie di fibre sintetiche, micro e macro fibre, dimensionalmente distinte e caratterizzate da differenti proprietà e destinazione d'uso.

Le *micro fibre* sono state introdotte, in commercio da lungo tempo, per diminuire le fessurazioni da ritiro plastico nei conglomerati. Sono usate sia per le pavimentazioni sia per gli intonaci. Le micro fibre non hanno alcun effetto sulle fessurazioni da ritiro in essiccazione o sulla tenacità del conglomerato indurito. Esse sono utilizzate in quantità non superiori allo 0,1% (in volume rispetto a quello del calcestruzzo). I dosaggi sono bassi a causa della notevole influenza che queste fibre hanno sulla lavorabilità degli impasti, per la loro alta area superficiale ( $> 150 \text{ m}^2/\text{kg}$ ).

Le *macro fibre* sono utilizzate a dosaggi più elevati, anche fino all'1% in volume, per ottenere significativi vantaggi anche nella resistenza all'urto e nella resistenza a fatica<sup>2</sup> del calcestruzzo.

Le proprietà delle macro fibre rendono questi materiali adatti alla sostituzione parziale, o totale, delle reti elettrosaldate nelle pavimentazioni in calcestruzzo.

## **Fibre di acciaio**

Le fibre di acciaio, realizzate in diverse tipologie, consentono di aumentare in modo sensibile sia la resistenza alla flessione sia quella agli urti. Inoltre, contrastano il ritiro sia plastico sia in essiccazione e le conseguenti fessurazioni.

A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora se aumenta il rapporto di aspetto (lunghezza/diametro) e se la forma assume un contorno irregolare che favorisca l'adesione alla matrice cementizia.

L'utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio trova applicazione nelle pavimentazioni industriali, nei piazzali di sosta e movimentazione merci, nelle strutture antisismiche e nella realizzazione di massetti nella ristrutturazione edilizia.

L'omogenea distribuzione delle fibre nel calcestruzzo è il primo degli aspetti che deve essere considerato. Le fibre di acciaio fornite sfuse tendono ad aggrovigliarsi tra loro e a opporsi a una dispersione omogenea nella

---

<sup>2</sup> Resistenza a fatica: i materiali metallici, sottoposti a carichi alternati, presentano una tensione di rottura più bassa di quella misurata in condizioni statiche. Il fenomeno è da attribuire ad un progressivo incrudimento con accumulo di dislocazioni, per questo motivo il metallo presenta alla fine una frattura fragile. Nei calcestruzzi, per carichi alternati di molta minore ampiezza, la rottura per fatica si verifica per un meccanismo diverso, cioè per un leggero progressivo scollamento all'interfaccia malta-aggregati.

massa del calcestruzzo. Si formano grumi che la sola betoniera non riesce a rompere, con conseguenze sia per le prestazioni del calcestruzzo sia per la posa in opera. Per questo motivo, molte volte, le fibre sono fornite incollate in pacchetti. Questi si sciolgono durante la miscelazione del calcestruzzo in modo omogeneo senza creare problemi per la loro distribuzione.

## **Fibre di vetro**

L'impiego delle fibre di vetro è molto limitato, in quanto esiste incompatibilità tra tali fibre e gli alcali contenuti nel cemento (reazione alcali-silice).

## **14.8 Calcestruzzo impermeabile**

Questo calcestruzzo consente di realizzare strutture impermeabili mediante l'uso di additivi superfluidificanti e di agenti impermeabilizzanti. Va tuttavia sottolineato che a tale risultato finale concorrono la congruità delle armature, la corretta collocazione ed esecuzione dei giunti, un'attenta messa in opera e un'accurata stagionatura.

Questi calcestruzzi sono indispensabili in tutte le opere nelle quali è necessaria la massima impermeabilità: vasche a tenuta, piscine, getti in presenza di acque sorgive, scantinati e cantine sotto il livello di falda ecc.

## **14.9 Calcestruzzo per getti subacquei**

È un calcestruzzo specifico per getti sotto acqua, caratterizzato da elevata omogeneità, coesività e assenza di segregazione. Ciò è ottenuto mediante l'utilizzo di un composto colloidale, molto viscoso e tenace, che conferisce al calcestruzzo proprietà coesive tali da impedire la separazione dei componenti durante tutte le fasi di getto.

Questi calcestruzzi garantiscono il mantenimento delle caratteristiche nell'esecuzione di getti subacquei solo in acque ferme e non correnti. La posa dovrà avvenire per mezzo di tubi di getto.

## **14.10 Calcestruzzo per riempimento**

I materiali cementizi per riempimenti sono progettati per ottenere un'elevata fluidità, in modo che per la posa in opera non sia richiesta alcun tipo

di compattazione. Questo calcestruzzo si propone come metodologia alternativa ai tradizionali metodi di rinterro degli scavi. È utilizzato in quanto consente di evitare i problemi connessi alla posa in opera e all'assestamento del terreno. È destinato al riempimento di:

- scavi in trincea per condutture;
- scarpate;
- serbatoi interrati;
- cavità.

Di solito a questi calcestruzzi, al fine di ottenere prestazioni equiparabili a quelle di un terreno ben costipato, si richiede una resistenza a compressione compresa fra 0,5 e 2 MPa.

Il dosaggio di cemento deve essere tenuto basso, soprattutto perché un suo aumento inciderebbe sui costi senza apprezzabili miglioramenti delle prestazioni del materiale. La quantità di acqua è, invece, elevata al fine di ottenere una miscela fluida. Tuttavia il rapporto  $a/c$  non può essere troppo aumentato: infatti, troppa acqua avrebbe conseguenze negative sulla coesione della miscela fresca, portando alla segregazione dell'impasto. Talvolta sono aggiunte *fly ash* per aumentare la fluidità.

## 14.11 Calcestruzzo proiettato

Il calcestruzzo proiettato (*spritzbeton* o *shotcrete* o *gunite*) è stato inizialmente utilizzato per realizzare un sostegno immediato e temporaneo sul fronte di avanzamento di scavi sotterranei, nell'attesa di poter, poi, eseguire il rivestimento definitivo. L'evoluzione della tecnologia consente ora di realizzare uno *spritzbeton* con caratteristiche di sostegno permanente per capacità portante, sicurezza e durabilità.

I materiali utilizzati, in aggiunta ai cementi, sono gli additivi acceleranti, gli iperfluidificanti, la *silica fume* o il *fly ash*, ed eventualmente fibre polimeriche o metalliche.