

14

LE AGGIUNTE POZZOLANICHE IN CENTRALE DI BETONAGGIO

I materiali pozzolanici oltre ad essere impiegati nella produzione dei cementi comuni vengono diffusamente impiegati anche direttamente in centrale di betonaggio per la produzione del calcestruzzo. Questa modalità di impiego offre il vantaggio, rispetto all'utilizzo dei cementi Portland di miscela o dei cementi tipo III, IV e V dove la percentuale di materiale pozzolanico viene fissata dal produttore, di poter modulare il dosaggio di queste aggiunte nell'impasto in relazione alle specifiche prestazioni che si vogliono conferire al calcestruzzo.

Le aggiunte più comunemente impiegate in centrale di betonaggio sono costituite dalla cenere volante e dal fumo di silice.

La cenere volante

Almeno in Italia la cenere volante può ormai essere considerata un ingrediente di routine per la produzione del calcestruzzo essendo utilizzata in centrale di betonaggio estensivamente da circa un ventennio. La cenere volante e, in generale, tutte le aggiunte di tipo II in accordo alla EN 206, possono essere utilizzate:

- in sostituzione di parte del cemento lasciando invariato il rapporto acqua/cemento equivalente, $(a/c)_{eq}$, derivante dalle esigenze meccaniche e di durabilità dell'impasto;
- in aggiunta al cemento (sostituendo, quindi, parte della sabbia) con una conseguente diminuzione del rapporto acqua/cemento equivalente.

Il calcolo del rapporto $(a/c)_{eq}$ si effettua in accordo a quanto stabilito dalla norma EN 206 tenendo conto che indipendentemente dalla quantità di cenere volante (CV) introdotta nel calcestruzzo:

- si può computare nel calcolo un quantitativo di cenere (cv) non superiore a 1/3 della massa del cemento;
- la somma della massa del cemento (c_{eff}) e della cenere (cv) nell'impasto deve risultare maggiore della massa di cemento minimo (c_{min}) derivante dalle esigenze di durabilità;
- la differenza tra la massa di cemento minima (c_{min}) e quella effettivamente impiegata (c_{eff}) a seguito della parziale sostituzione con cenere deve risultare minore di $K_{cv} (c_{min} - 200 \text{ Kg/m}^3)$, dove K_{cv} il fattore di equivalenza della cenere è fissato dalla norma UNI 11104 e può essere desunto dalla Tabella che segue.

Valori del coefficiente K_{cv} (Norma UNI 11104)

TIPO DI CEMENTO	CLASSE DEL CEMENTO	K_{cv}
CEM I	32.5 N,R	0.2
CEM I	42.5 N,R 52.5 N,R	0.4
CEM II/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2
CEM III/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2
CEM IV/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2
CEM V/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2



Rispetto agli impasti di solo cemento quelli confezionati con cenere volante in aggiunta, alla luce del fatto che la cenere volante nei primi giorni di stagionatura si comporta come materiale sostanzialmente inerte per il ridotto contenuto di idrossido di calcio derivante dalla reazione pozzolanica, posseggono sia durante la fase plastica che nei primi 3 giorni, rapporti $(a/c)_{eq}$ sostanzialmente identici a quello del calcestruzzo di solo cemento. Alle stagionature successive, quando inizia la reazione pozzolanica, il rapporto $(a/c)_{eq}$ degli impasti con cenere in aggiunta diventa minore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Conseguentemente, si possono trarre le seguenti conclusioni circa **l'utilizzo della cenere volante in aggiunta al cemento:**

- non modifica i tempi di presa dell'impasto di solo cemento²⁸;
- non modifica lo sviluppo di calore e conseguentemente i gradienti termici nei getti massivi;
- non modifica le prestazioni meccaniche a 1-3 giorni le quali, invece, risultano alle stagionature successive (7 e 28 giorni) maggiori di quelle dell'impasto di solo cemento;
- la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle sollecitazioni aggressive ambientali migliora sia per la maggiore impermeabilità derivante dal minor rapporto $(a/c)_{eq}$ che per il minor contenuto di idrossido di calcio nella matrice cementizia impegnato nella reazione pozzolanica con la cenere volante.

Gli impasti confezionati con cenere in sostituzione parziale del cemento sia durante la fase plastica che alle brevi stagionature sono caratterizzati da un rapporto $(a/c)_{eq}$ superiore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Solo alle lunghe stagionature (dopo i 28 giorni) grazie alla reazione pozzolanica, il rapporto $(a/c)_{eq}$ eguaglierà quello del calcestruzzo di solo cemento. Pertanto, in seguito a questo assunto si intuisce che l'impiego della cenere volante in sostituzione parziale del cemento:

- determina un allungamento dei tempi di presa rispetto all'impasto di solo cemento. Questo giustifica, ad esempio, perché calcestruzzi con cenere in sostituzione vengono raramente impiegati nel settore delle pavimentazioni industriali in quanto l'allungamento dei tempi di presa costringerebbe ad una maggiore attesa per poter realizzare gli strati di usura a base di spolvero o pastina²⁹;
- consente di ridurre lo sviluppo di calore e, conseguentemente, i gradienti termici nei getti massivi;
- produce una riduzione delle resistenze meccaniche a compressione alle brevi stagionature rispetto a quelle dell'impasto di solo cemento. Una diretta conseguenza di questo risiede nella necessità di operare una stagionatura umida più prolungata rispetto ad un calcestruzzo di solo cemento per compensare la maggiore porosità derivante da un maggior rapporto $(a/c)_{eq}$;
- permette di conseguire alle lunghe stagionature (purché il conglomerato venga maturato a umido) resistenze a compressione sostanzialmente equivalenti a quelle dell'impasto di solo cemento;
- garantisce una maggiore durabilità nei confronti della reazione alcali-aggregato, della penetrazione del cloruro e dell'attacco solfatico. La resistenza alla penetrazione dell'anidride carbonica, invece, diminuisce per i calcestruzzi scadenti e non migliora per quelli con rapporti a/c inferiori a 0.50.

Relativamente alle influenze esercitate dall'impiego della cenere sulle proprietà reologiche del calcestruzzo è importante sottolineare come è convinzione abbastanza diffusa che l'introduzione di cenere volante nell'impasto produca un generalizzato miglioramento della lavorabilità del calcestruzzo a pari acqua di impasto rispetto a quello del conglomerato di solo cemento (o, il che è lo stesso, che l'impiego di cenere produca una riduzione dell'acqua di impasto a pari consistenza). In effetti, la lavorabilità del calcestruzzo potrà risultare maggiore o minore a seconda della qualità della cenere impiegata. Da questo punto di vista il parametro più significativo è rappresentato dalla percentuale di materiale di dimensioni superiori a 0.045 mm. Le particelle di dimensioni superiori a questo valore, infatti, sono costituite prevalentemente da materiale incombusto e presentano una struttura spugnosa caratterizzata da una elevata superficie specifica. Pertanto, l'impiego di ceneri con tenori rilevanti di particelle superiori a 45 μ m in sostituzione del cemento, può



Gruppo Cementirosi S.p.A.

determinare un incremento della richiesta d'acqua per conseguire la stessa lavorabilità di un impasto privo di cenere.

L'impiego di cenere in aggiunta o in sostituzione del cemento determina rispettivamente nessuna modifica o un leggero miglioramento in termini di mantenimento della lavorabilità del calcestruzzo durante il trasporto.

Relativamente alla riduzione dell'acqua di bleeding e al miglioramento della pompabilità degli impasti si possono ottenere dei vantaggi significativi solo se la cenere volante viene impiegata in aggiunta al cemento. In tal caso la riduzione dell'acqua di bleeding può risultare, per aggiunte di cenere comprese tra 40 e 60 Kg/m³, di circa il 100%.

Il fumo di silice

Rispetto alla cenere volante il fumo di silice, per il maggior contenuto di SiO₂, per la maggiore finezza e per la totale assenza di composti cristallini a bassa reattività possiede caratteristiche pozzolaniche migliori³⁰. Tuttavia, per l'elevato costo esso viene utilizzato in centrale di betonaggio solo in casi eccezionali per la produzione di calcestruzzi speciali allorché si richiede una elevata impermeabilità oppure si vogliono produrre impasti ad alta ed altissima resistenza meccanica a compressione.

A causa della finezza delle particelle, il fumo di silice determina sempre un incremento della richiesta d'acqua a pari consistenza di un impasto di solo cemento, stimabile in circa il 7-15% per quantitativi di microsilice variabili tra il 5 e il 10%. Ne consegue che l'aggiunta di questo materiale non può essere effettuato disgiuntamente dall'impiego di un additivo superfluidificante.

Relativamente al calcolo del rapporto $(a/c)_{eq}$ esso si persegue dividendo l'acqua di impasto per il dosaggio di cemento (c_{eff}) sommato a quello del fumo di silice (fs) moltiplicato per il corrispondente fattore di equivalenza:

$$(a/c)_{eq} = \frac{a}{(c_{eff} + k_{fs} \cdot fs)}$$

dove K_{fs} è il fattore di equivalenza del fumo di silice pari a 2 per i calcestruzzi con rapporto a/c inferiore a 0.45 e per tutti quelli che indipendentemente dal rapporto a/c sono destinati a strutture in classe di esposizione diverse dalla XC e XF. Per i conglomerati destinati a queste strutture aventi rapporti a/c maggiori di 0.45 il fattore di equivalenza viene posto pari a 1. In sostanza, questo significa che per la stragrande maggioranza delle strutture impiegare 1 Kg di fumo di silice equivale ad impiegare 1 kg di cemento.

La norma EN 206, inoltre, impone:

- di computare al massimo un quantitativo di fumo di silice non superiore all'11% della massa del cemento;
- il dosaggio di cemento effettivamente impiegato e di fumo di silice non deve risultare inferiore a quello minimo desunto da considerazioni legate alla durabilità;
- se il dosaggio di cemento minimo per la durabilità è inferiore a 300 kg/m³ deve verificarsi anche che la differenza tra dosaggio di cemento minimo e dosaggio effettivo deve risultare inferiore a 30 kg/m³.

Rispetto agli impasti di solo cemento quelli confezionati con fumo di silice in aggiunta, alla luce del fatto che solo per le prime 12 ore di stagionatura si comporta come materiale sostanzialmente inerte, possiede durante la fase plastica rapporto $(a/c)_{eq}$ sostanzialmente identico a quello del calcestruzzo di solo cemento. Già alla stagionatura di 1 giorno, ed



Gruppo Cementirosi S.p.A.

ancor più a quelle successive, il rapporto $(a/c)_{eq}$ degli impasti con fumo di silice in aggiunta diventa minore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Conseguentemente, si possono trarre le seguenti conclusioni circa l'utilizzo del **fumo di silice in aggiunta al cemento**:

- non modifica i tempi di presa dell'impasto di solo cemento;
- incrementa lo sviluppo di calore e conseguentemente i gradienti termici nei getti massivi;
- migliora, sia pur lievemente, le prestazioni meccaniche già dopo 1 giorno rispetto a quelle dell'impasto di solo cemento;
- incrementa in maniera significativa le resistenze meccaniche alle stagionature successive (3 e 28 giorni) rispetto all'impasto di solo cemento;
- la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle sollecitazioni aggressive ambientali migliora sia per la maggiore impermeabilità derivante dal minor rapporto $(a/c)_{eq}$ che per il minor contenuto di idrossido di calcio impegnato nella reazione pozzolanica.

L'impasto confezionato con fumo di silice **in sostituzione parziale del cemento** durante la fase plastica e dopo circa 24 ore è caratterizzato da un rapporto $(a/c)_{eq}$ inferiore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Già alla stagionatura di 3 giorni, però, grazie alla elevata reattività pozzolanica del fumo di silice, il rapporto $(a/c)_{eq}$ dapprima eguaglierà quello della malta di solo cemento e, successivamente, risulterà inferiore. Pertanto, in seguito a questo assunto si intuisce che l'impiego del **fumo di silice in sostituzione parziale del cemento**:

- determina un allungamento dei tempi di presa rispetto all'impasto di solo cemento;
- consente di ridurre lo sviluppo di calore e, conseguentemente, i gradienti termici nei getti massivi, anche se per questo scopo è più conveniente dal punto di vista economico ricorrere all'impiego della cenere volante;
- produce una riduzione modesta delle resistenze meccaniche a compressione a 1 giorno rispetto a quella dell'impasto di solo cemento;
- permette di eguagliare già dopo 3 giorni la resistenza a compressione del calcestruzzo di solo cemento e alle stagionature successive di superarla;
- garantisce una maggiore durabilità nei confronti della reazione alcali-aggregato, della penetrazione del cloruro e dell'attacco solfatico.

Tra le maggiori potenzialità del fumo di silice, infine, si deve menzionare quella di confezionare calcestruzzi di alta ed altissima resistenza meccanica a compressione grazie alla possibilità di ricorrere a surdosaggi di additivo superfluidificante (4-6%) rispetto a quelli tradizionalmente impiegati per i conglomerati convenzionali (1-2%) senza generare apprezzabili ritardi nei tempi di presa e di indurimento del conglomerato cementizio.

²⁸⁾ Questo assunto è valido per le ceneri siliciche. Le ceneri calciche, invece, per la presenza dell'ossido di calcio e di composti di natura cristallina con caratteristiche idrauliche determinano un accorciamento dei tempi di presa qualora impiegate in aggiunta al cemento. E' da evidenziare che queste ceneri, molto diffuse negli Stati Uniti, non sono disponibili in Italia. Inoltre, la norma EN 450 di fatto le esclude dall'impiego nel calcestruzzo fissando per le ceneri da utilizzare direttamente nelle centrali di betonaggio un limite al contenuto di CaO del 10% inferiore a quello normalmente presente nelle ceneri calciche. L'esclusione di queste ceneri, inoltre, discende dal mancato rispetto di un ulteriore requisito imposto dalla norma relativo alla somma della silice, dell'allumina e del sesquiossido di ferro che deve risultare maggiore del 70%. Nelle ceneri calciche, infatti, la somma di questi costituenti varia generalmente tra il 50 e il 60%.

²⁹⁾ Al fine di evitare eccessivi ritardi sui tempi di presa con conseguenti ripercussioni sui tempi di scasso la norma EN 450 impone che il tempo di inizio presa di una malta confezionata con il 25% di cenere in sostituzione del cemento non deve risultare maggiore di più di 120 minuti rispetto a quello della malta di solo cemento.

³⁰⁾ Il contenuto di silice in accordo alla norma EN 13263 deve essere superiore all'85%. L'area superficiale specifica deve risultare compresa tra 15 e 35 m²/Kg, questa, quindi, risulta di gran lunga maggiore di quella della cenere (0.3-0.6 m²/Kg).



Gruppo Cementirosi S.p.A.