

# MICRO-POZZ<sup>®</sup> PFA

cenere volante selezionata e controllata  
migliora tutte le prestazioni del calcestruzzo





# SOMMARIO

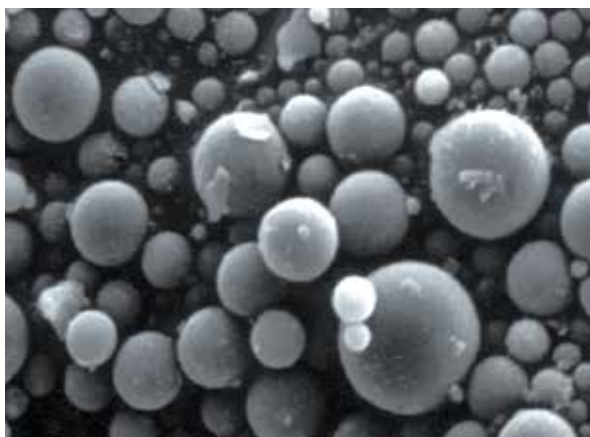
<b>GENERALITÀ</b>	<b>3</b>	<b>APPLICAZIONI</b>	<b>24</b>
<b>PROPRIETÀ</b>	<b>4</b>	<i>CALCESTRUZZI ORDINARI</i>	<b>24</b>
<i>COMPOSIZIONE CHIMICA</i>	<b>4</b>	Strutture in calcestruzzo armato potenzialmente soggette alla corrosione delle armature per carbonatazione	<b>24</b>
<i>STRUTTURA DELLE PARTICELLE</i>	<b>5</b>	Strutture in calcestruzzo armato potenzialmente soggette alla corrosione delle armature per penetrazione dei cloruri	<b>25</b>
<i>PARAMETRI FISICI</i>	<b>6</b>	<i>CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI (SCC)</i>	<b>26</b>
<i>COMPATIBILITÀ AMBIENTALE</i>	<b>7</b>	<i>CALCESTRUZZI AD ELEVATA RESISTENZA</i>	<b>27</b>
<b>EFFETTI DELL'UTILIZZO NEL CALCESTRUZZO</b>	<b>8</b>	<i>CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI (FRC)</i>	<b>28</b>
<i>EFFETTI FISICI</i>	<b>8</b>	<i>CALCESTRUZZI A RITIRO RIDOTTO</i>	<b>28</b>
Riduzione della richiesta di acqua	<b>8</b>	<i>CALCESTRUZZI A BASSO CALORE DI IDRATAZIONE</i>	<b>28</b>
Effetto fillerizzante	<b>8</b>	<i>ELEMENTI VIBROCOMPRESSI E TUBAZIONI</i>	<b>29</b>
<i>EFFETTI CHIMICI</i>	<b>9</b>	<b>APPLICAZIONI SPECIALI</b>	<b>30</b>
Reazione pozzolanica	<b>9</b>	<i>MISTI CEMENTATI</i>	<b>30</b>
<b>PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO CONTENENTE MICRO-POZZ PFA</b>	<b>11</b>	<i>CALCESTRUZZI CONTENENTI ELEVATI VOLUMI DI CENERE VOLANTE</i>	<b>31</b>
<i>PROPRIETÀ ALLO STATO FRESCO</i>	<b>11</b>	<i>CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI</i>	<b>32</b>
<i>PROPRIETÀ ALLO STATO INDURITO</i>	<b>14</b>	<b>RIFERIMENTI NORMATIVI PER L'USO NEL CALCESTRUZZO</b>	<b>33</b>
Resistenze meccaniche	<b>14</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>35</b>
Calore di idratazione	<b>15</b>		
Permeabilità all'acqua	<b>16</b>		
Ritiro igrometrico	<b>17</b>		
Deformazione viscosa - creep	<b>17</b>		
<i>DURABILITÀ DELLE STRUTTURE</i>	<b>17</b>		
Corrosione delle armature promossa da carbonatazione	<b>18</b>		
Corrosione delle armature promossa dai cloruri	<b>19</b>		
Concentrazione critica dei cloruri	<b>20</b>		
Cicli gelo - disgelo	<b>21</b>		
Attacco solfatico	<b>21</b>		
Reazione Alcali - Aggregato (ASR)	<b>23</b>		



# GENERALITÀ

Le Ceneri Volanti **MICRO-POZZ PFA** sono prodotti minerali derivanti dal processo di produzione dell'energia elettrica utilizzate principalmente nel settore delle costruzioni come aggiunte pozzolaniche per il confezionamento di conglomerati cementizi.

Costituite da micro-particelle di forma sferoidale (di dimensioni paragonabili a quelle del cemento), hanno una natura essenzialmente silico-alluminosa e struttura fondamentalmente non cristallina o vetrosa (Figura 1, Tabella 4).



**FIGURA 1** Ceneri Volante **MICRO-POZZ PFA** vista al microscopio elettronico [1]

Tali peculiari caratteristiche conferiscono alle Ceneri Volanti la cosiddetta attività pozzolanica, cioè la capacità di reagire con l'acqua e l'idrossido di calcio per formare fibre C-S-H (silicati di calcio idrati) del tutto analoghe a quelle che derivano dalla reazione di idratazione del cemento.

I Silicati di Calcio idrati (C-S-H) sono prodotti di natura fibrosa che determinano la quasi totalità delle caratteristiche del calcestruzzo, sia in termini di resistenze meccaniche che di durabilità.

Aggiungendo Ceneri Volanti **MICRO-POZZ PFA** ad un determinato impasto e lasciando invariato il quantitativo di cemento, si ottiene un calcestruzzo con prestazioni più elevate, grazie ai maggiori quantitativi di Silicati di Calcio (C-S-H). Utilizzandola invece, come avviene in genere, in parziale sostituzione del cemento, si ottengono ulteriori vantaggi sia tecnici che economici. Il miglioramento delle prestazioni allo stato fresco è dovuto alla dimensione ed alla forma sferica delle particelle di **MICRO-POZZ PFA**; allo stato indurito alla formazione di maggiori quantità di Silicati di Calcio (C-S-H).

Dal punto di vista economico, il vantaggio è dato dal fatto che il costo della **MICRO-POZZ PFA** è inferiore a quello del cemento che sostituisce. Nel Prospetto 1 vengono riassunti i vantaggi tecnici che **MICRO-POZZ PFA** conferisce al calcestruzzo sia allo stato fresco che a quello indurito.

L'impiego della Ceneri Volanti come aggiunta minerale nel calcestruzzo è contemplato dal recente DM 17 Gennaio 2018 (punto 11.2.9.3) nonché dalle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale edite dal Servizio Tecnico Centrale.

Le norme UNI EN 206-1 e UNI 11104 forniscono inoltre valide indicazioni sull'impiego della Ceneri Volanti per la realizzazione di calcestruzzi durabili nelle diverse classi di esposizione.

## PROSPETTO 1

### Genere Volante **MICRO-POZZ PFA** – VANTAGGI TECNOLOGICI

#### Calcestruzzo Fresco

- Migliore lavorabilità
- Aumento del mantenimento di lavorabilità
- Migliore finitura del getto
- Eliminazione dell'essudazione
- Maggiore coesione e Robustezza
- Facilità di pompaggio
- Regolazione dei tempi di presa in estate

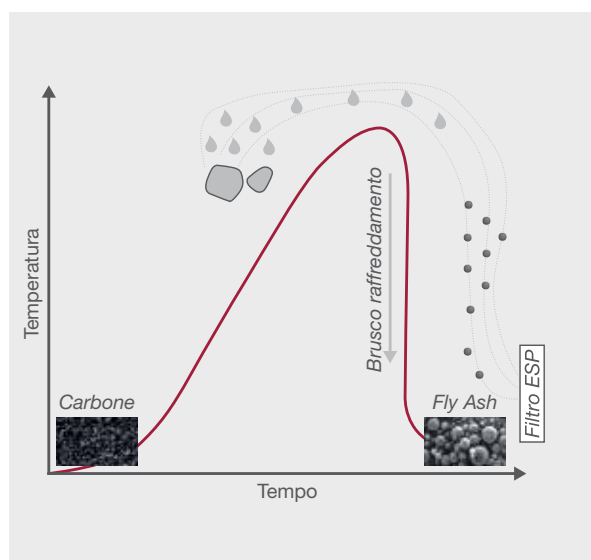
#### Calcestruzzo Indurito

- Incremento delle prestazioni meccaniche
- Riduzione della porosità e permeabilità
- Maggiore resistenza agli agenti aggressivi
- Maggiore aderenza alle barre d'armatura
- Maggiore protezione delle barre d'armatura
- Diminuzione delle temperature e delle conseguenti fessurazioni
- Riduzione della potenziale reazione Alkali-Aggregati
- Riduzione/Eliminazione delle efflorescenze superficiali

# PROPRIETÀ

La Cenere Volante deriva dalla combustione del carbone utilizzato nelle centrali di produzione di energia termoelettrica. Le elevate temperature che si raggiungono durante la combustione (circa 1500 °C) portano alla fusione dei minerali (inerti dal punto di vista della combustione) contenuti nel carbone.

Minerali quali il quarzo, l'argilla, la pirite fondono e seguono, in forma di minuscole gocce (Figura 2), il percorso dei prodotti gassosi (da qui il nome di Ceneri Volanti) verso l'esterno della camera di combustione. In seguito, a causa del brusco raffreddamento, solidificano sotto forma di piccole sferette che vengono trattenute e raccolte mediante filtri elettrostatici.



**FIGURA 2** Schematizzazione del processo di formazione della Cenere Volante

## COMPOSIZIONE CHIMICA

La composizione chimica è complessa e dipende essenzialmente dalla natura e composizione del carbone originario. Gli elementi chimici costituenti sono diversi (Tabella 1), tuttavia i componenti principali sono essenzialmente quattro:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ .

Dal tipo di carbone impiegato attualmente in Italia si ottiene una Cenere Volante caratterizzata da bassi contenuti di  $\text{CaO}$  (cenere silico-alluminosa), classificabile, con riferimento alla norma ASTM C618, come Cenere Volante tipo F.

**TABELLA 1** Composizioni chimiche tipiche della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**

Componente	Contenuto (% in massa)
$\text{SiO}_2$	36 ÷ 52
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22 ÷ 36
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2 ÷ 10
$\text{CaO}$	1 ÷ 10
$\text{MgO}$	0.2 ÷ 3
$\text{K}_2\text{O}$	0.2 ÷ 2
$\text{Na}_2\text{O}$	0.1 ÷ 0.6
$\text{TO}_2$	0.1 ÷ 1.7
$\text{SO}_3$	0.2 ÷ 2
Perdita al fuoco	1 ÷ 9

La composizione chimica delle ceneri silico-alluminose è molto simile a quella delle pozzolane naturali laziali e campane (Tabella 2).

**TABELLA 2** Composizione chimica tipica delle pozzolane naturali [2,3]

Costituente	Pozzolana Laziale	Pozzolana Campana
$\text{SiO}_2$	45 ÷ 47	53 ÷ 64
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15 ÷ 23	17 ÷ 20
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6 ÷ 12	4 ÷ 6
$\text{CaO}$	8 ÷ 9	3 ÷ 4
$\text{MgO}$	1 ÷ 3	1 ÷ 2
$\text{Na}_2\text{O} \div \text{K}_2\text{O}$	3 ÷ 4	5 ÷ 13

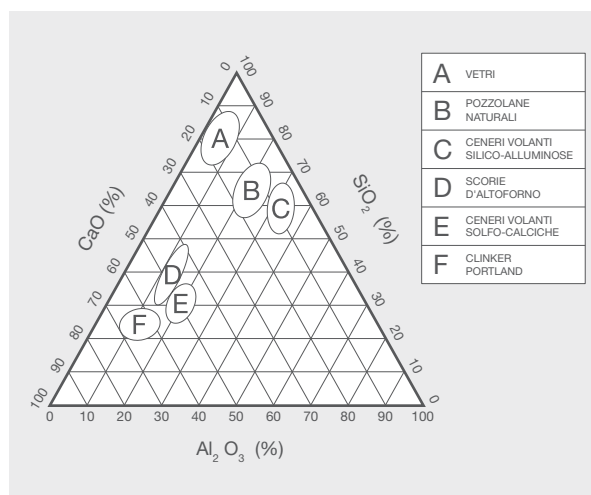
## CENERE VOLANTE MICRO-POZZ PFA PROPRIETÀ

È da rilevare inoltre che la composizione media di una Cenere Volante non differisce molto dalla composizione chimica media dei costituenti la crosta terrestre (Tabella 3).

**TABELLA 3** Composizione chimica media globale dei materiali solidi costituenti la crosta terrestre [3]

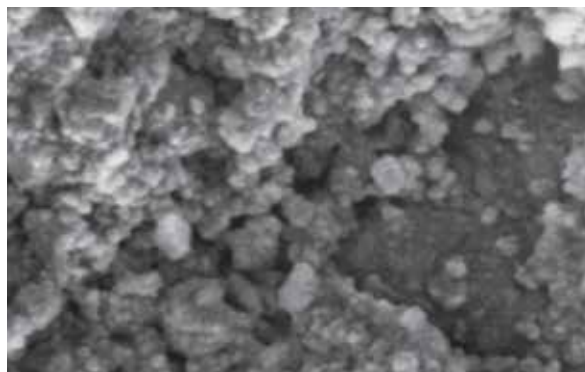
Costituente	%
SiO <sub>2</sub>	59,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,10
CaO	5,10
MgO	3,45
Na <sub>2</sub> O ÷ K <sub>2</sub> O	6,82

Il diagramma ternario riportato in Figura 3 evidenzia l'affinità cenere – pozzolana naturale in termini di composizione chimica e mostra le differenze con altri materiali di comune utilizzo.



**FIGURA 3** Diagramma ternario di composizione chimica di alcuni materiali di comune utilizzo [3]

In Figura 4 è riportato un ingrandimento di una pozzolana naturale proveniente da Viterbo.



**FIGURA 4** Ingrandimento al microscopio a scansione di una pozzolana naturale viterbese

### STRUTTURA DELLE PARTICELLE

La rapidità del raffreddamento subito dalle particelle di Cenere Volante all'uscita della camera di combustione non ne consente la solidificazione secondo reticoli cristallini ordinati. Per questo motivo più del 70% delle particelle costituenti la Cenere Volante è caratterizzata da una struttura non cristallina. Tale caratteristica rende la Cenere Volante, ed in particolare la silice in essa contenuta, energeticamente reattiva nei confronti di composti basici, tra i quali l'idrossido di calcio, in modo del tutto simile alle pozzolane naturali.

In Tabella 4 si riportano le percentuali tipiche delle diverse fasi contenute in una Cenere Volante silico – alluminosa quale la **MICRO-POZZ PFA**.

**TABELLA 4** Principali minerali costituenti una Cenere Volante silico-alluminosa [4]

Fase minerale	Contenuto (% in massa)
Non cristallina	60 - 83
Mullite	4 - 25
Quarzite	4 - 18
Ematite	0,5 - 2
Magnetite	1 - 7

## CENERE VOLANTE MICRO-POZZ PFA PROPRIETÀ

Mediante una scansione al microscopio elettronico si osserva come le singole particelle costituenti la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** abbiano una forma prevalentemente sferica; in particolare si possono distinguere sfere piene e cave.

Queste ultime, a loro volta, possono essere vuote (cenosfere) oppure contenere altre sfere più piccole all'interno (plenosfere, Figura 5).

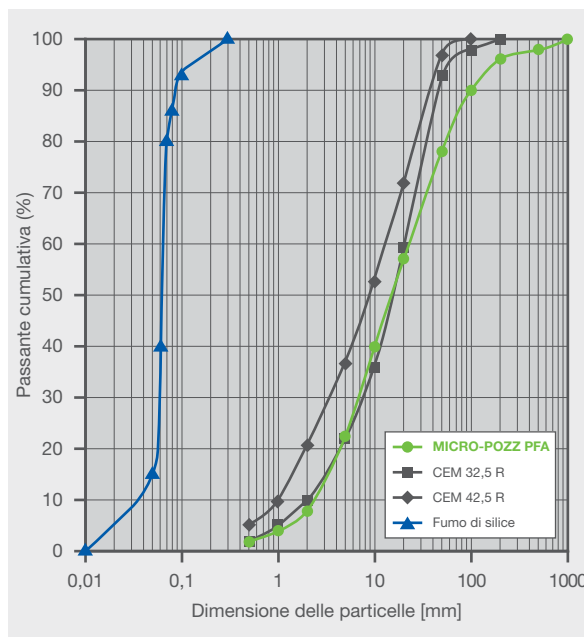


**FIGURA 5** Visione fortemente ingrandita di una plenosfera

### PARAMETRI FISICI

I principali parametri fisici della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** sono riportati in Tabella 5.

In Figura 6 si riporta il confronto tra le distribuzioni granulometriche della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**, quelle di due cementi Portland (32,5R e 42,5R) e del fumo di silice.



**FIGURA 6** Confronto tra le distribuzioni granulometriche tipiche della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**, dei cementi di comune utilizzo e del fumo di silice

Appare evidente come la distribuzione granulometrica della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** sia molto simile a quella di un cemento Portland ordinario.

La finezza e la distribuzione granulometrica della **MICRO-POZZ PFA** sono caratteristiche che giocano un ruolo essenziale per le due principali attività che essa svolge in un conglomerato cementizio: la reazione pozzolanica e l'effetto fillerizzante.

**TABELLA 5** Principali parametri fisici della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** [4]

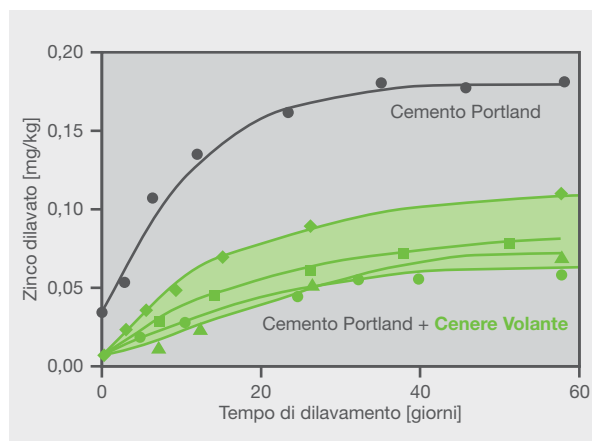
Parametro	Valore
Peso specifico del granulo	1900 ÷ 2400 (kg/m <sup>3</sup> )
Peso in mucchio secco	600 ÷ 800 (kg/m <sup>3</sup> )
Superficie specifica (Blaine)	3000 ÷ 7500 (cm <sup>2</sup> /g)
Diametro medio delle particelle (d <sub>50</sub> )	10 ÷ 30 µm

### COMPATIBILITÀ AMBIENTALE

Confrontando i dati riportati nelle Tabelle 1,2 e 3 si osserva che la composizione chimica (sia qualitativa che quantitativa) delle Ceneri Volanti riproduce essenzialmente quella delle pozzolane naturali e dei terreni di origine sedimentaria.

Infatti sono proprio queste particelle di terreno che, sedimentando assieme alle sostanze organiche vegetali, vanno a costituire la parte inerte presente nel carbone. Per quanto riguarda la possibilità di rilascio nell'ambiente di metalli pesanti da parte di miscele cementizie realizzate con Cenere Volante, diverse esperienze sperimentali hanno evidenziato una riduzione di inquinanti presenti nelle acque di contatto.

In particolare la Figura 7 riporta il risultato di una sperimentazione [5] dove è evidente l'effetto benefico della Cenere Volante nei confronti della dilavabilità dei metalli pesanti da una malta cementizia.



**FIGURA 7** Riduzione del dilavamento dello zinco ad opera della Cenere Volante (semplificato da [5])

Ciò è dovuto alla maggior compattezza e minore permeabilità della malta cementizia contenente la Cenere Volante.

Per quanto concerne le emissioni di radiazioni radon, la Cenere Volante, come del resto tutti i sottoprodotti derivanti da processi industriali e riutilizzati in nuove attività di produzione, è stata sottoposta negli anni a numerosi test di valutazione.

È stato dimostrato che la sua presenza nei conglomerati cementizi non determina alcun aumento della naturale radioattività; inoltre recenti esperienze [6] hanno dimostrato come l'impiego di Cenere Volante nel calcestruzzo comporti una riduzione della esalazione naturale di radon dalle strutture verso l'ambiente esterno.



Verifica della consistenza mediante misura dell'abbassamento al cono di Abrams (Norma EN 12350-2)

# EFFETTI DELL'UTILIZZO NEL CALCESTRUZZO

La Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**, impiegata come aggiunta minerale nel confezionamento dei conglomerati cementizi, ne influenza favorevolmente le proprietà, sia allo stato fresco che indurito. Tale influenza è conseguenza diretta di effetti fisici e chimici dovuti alla presenza di tale aggiunta.

## EFFETTI FISICI

Gli effetti fisici conseguenti all'introduzione della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** nelle miscele di calcestruzzo sono essenzialmente due:

- Riduzione della richiesta d'acqua di impasto
- Effetto fillerizzante

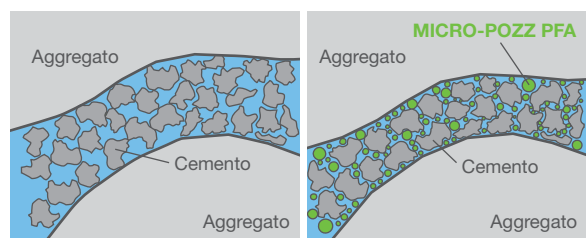
### Riduzione della richiesta di acqua

L'impiego di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**, costituita prevalentemente da micro-particelle sferiche di dimensioni inferiori a 45  $\mu\text{m}$ , determina una riduzione del quantitativo di acqua di impasto necessario al conseguimento di una determinata consistenza.

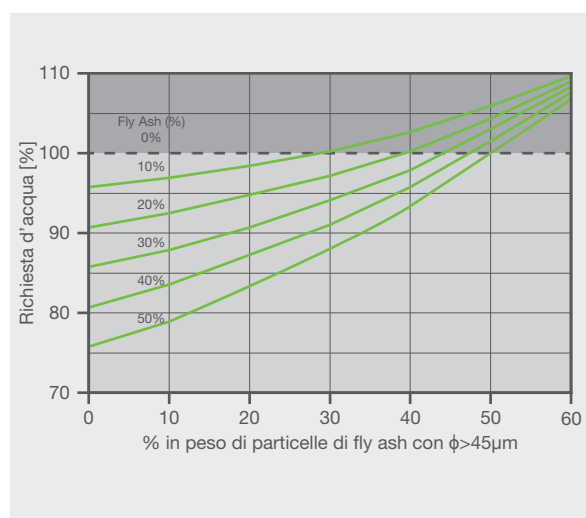
Se invece la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** viene utilizzata a parità di acqua di impasto, essa determina un incremento della lavorabilità del conglomerato. Questo comportamento è legato a tre fenomeni [7]:

- ✓ *Leggera capacità deflocculante.*  
Le particelle di Cenere Volante vanno ad allocarsi tra quelle di cemento riducendo la loro tendenza ad attrarsi vicendevolmente.
- ✓ Riduzione degli attriti interni.  
Le particelle sferiche di Cenere Volante, avendo dimensioni molto piccole, si comportano come una sorta di "cuscinetto a sfera" tra i granuli di cemento (ball bearing effect).
- ✓ "Particle packing effect" effetto fillerizzante di **MICRO-POZZ PFA** che riduce il volume di pasta di cemento necessario per una data lavorabilità (Figura 8).

In Figura 9 si evidenzia la riduzione della richiesta di acqua di impasto in funzione del contenuto di Cenere Volante nel calcestruzzo.



**FIGURA 8** Effetti "cuscinetto" e "impacchettamento" dovuti all'azione fillerizzante della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**



**FIGURA 9** Riduzione della richiesta d'acqua in funzione del contenuto di Cenere Volante [2,8]

### Effetto fillerizzante

Le particelle più piccole costituenti la cenere **MICRO-POZZ PFA** tendono ad allocarsi negli interstizi presenti tra le diverse componenti presenti nella miscela aiutando a migliorarne la distribuzione granulometrica.

Questo determina un netto miglioramento delle proprietà reologiche della miscela quali la **coesione**, la **pompabilità** e la **robustezza**.

## CENERE VOLANTE MICRO-POZZ PFA

### EFFETTI DELL'UTILIZZO NEL CALCESTRUZZO

L'effetto è particolarmente evidente quando si dispone di sabbie molto scabre (elevato modulo di finezza). In Figura 10 si riporta il confronto tra due miscele (Tabella 6) realizzate senza (Figura 10.a) e con (Figura 10.b) Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**, utilizzando gli stessi aggregati e pari contenuto di acqua e additivo superfluidificante.

**TABELLA 6** Miscela di calcestruzzo senza (a) e con (b) Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**

Mix	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	Aggregati (kg/m <sup>3</sup> )	Acqua (kg/m <sup>3</sup> )
a	310	0	1900	180
b	280	50	1875	175



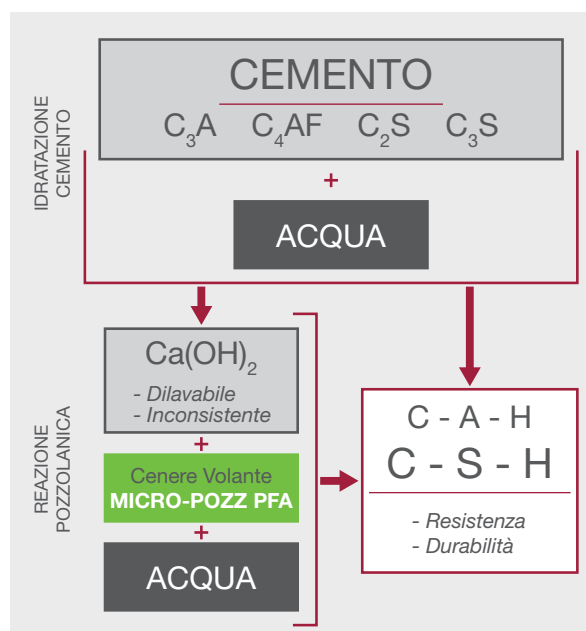
**FIGURA 10** Notevole miglioramento della coesione ad opera della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**

#### EFFETTI CHIMICI

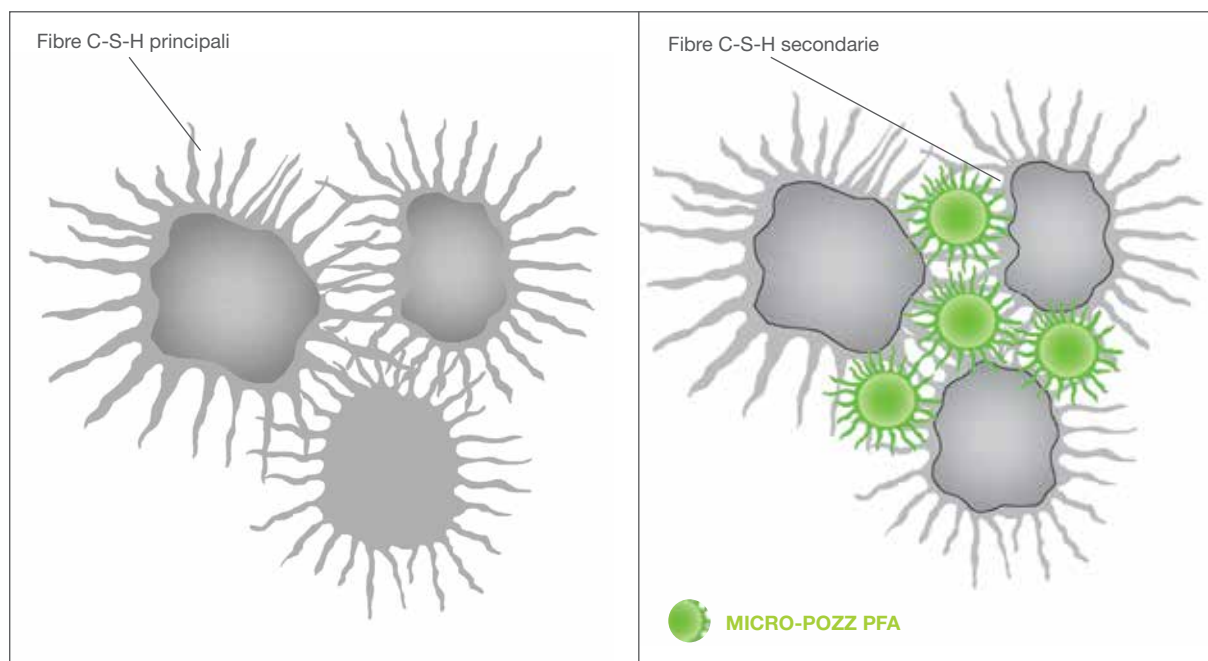
##### Reazione pozzolanica

La Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** di per sé non possiede capacità leganti, ma in presenza di idrossido di calcio (derivante dall'idratazione del cemento), è capace di produrre fibre di Silicati di Calcio Idrati (C-S-H) del tutto analoghe a quelle che si formano a seguito della reazione di idratazione del cemento. La reazione che coinvolge un materiale pozzolanico e determina la produzione di dette fibre, queste fibre sono dette secondarie per distinguerle da quelle che si formano per l'idratazione del cemento (dette primarie), prende il nome di **reazione pozzolanica** (Figura 11).

Durante le prime ore dal confezionamento del calcestruzzo il quantitativo di idrossido di calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  presente nella miscela è troppo basso per poter attivare la reazione pozzolanica. Per questo motivo nelle prime fasi la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** si comporta come un filler inerte, con grandi benefici in termini di mantenimento della lavorabilità dell'impasto (effetto lubrificante). Successivamente, al procedere della reazione di idratazione del cemento Portland, il contenuto di  $\text{Ca(OH)}_2$  disponibile aumenta e la reazione pozzolanica prende avvio, contribuendo allo sviluppo delle prestazioni, meccaniche e di durabilità, del calcestruzzo (Figura 12).



**FIGURA 11** Reazione pozzolanica: formazione di ulteriori prodotti C-S-H (fibre secondarie)



**FIGURA 12** Le fibre C-S-H secondarie prodotte dalla Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** contribuiscono ad addensare la matrice cementizia, rendendola più compatta, resistente e meno permeabile

## PROSPETTO 2

### BENEFICI APPORTATI DALLA REAZIONE POZZOLANICA

- ✓ Incremento delle prestazioni meccaniche
- ✓ Riduzione della permeabilità
- ✓ Riduzione della permeabilità ai cloruri
- ✓ Aumento della durabilità
- ✓ Aumento della resistenza agli attacchi solfatici
- ✓ Riduzione delle efflorescenze superficiali
- ✓ Riduzione del calore di idratazione
- ✓ Riduzione del rischio ASR: Alkali-Silica Reaction
- ✓ Incremento della resistenza ai cicli gelo-disgelo
- ✓ Incremento dell'adesione acciaio-calcestruzzo
- ✓ Miglioramento della qualità della zona di transizione (interfaccia) pasta – aggregato

# PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO CON MICRO-POZZ PFA

La presenza della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** nel calcestruzzo ne migliora tutte le prestazioni.

## PROPRIETÀ ALLO STATO FRESCO

La **lavorabilità** di un conglomerato cementizio può essere definita come la sua attitudine ad essere miscelato, trasportato, messo in opera, compattato e rifinito.

La lavorabilità di un calcestruzzo determina:

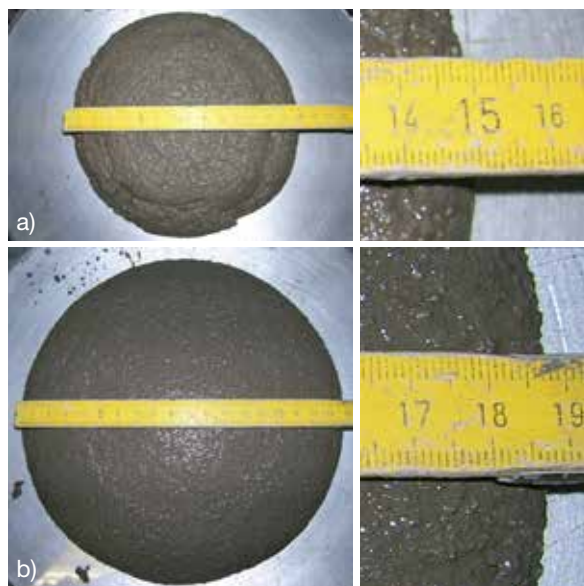
- ✓ La facilità con cui esso riempie il cassero in tutte le sue parti;
- ✓ La capacità di avvolgere le barre di armatura massimizzando la loro aderenza con il calcestruzzo;
- ✓ La facilità di espulsione dell'aria interna;
- ✓ L'energia da impiegare per raggiungere un determinato grado di compattazione;
- ✓ L'assenza di segregazione e la coesione.

L'impiego di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** in parziale sostituzione del cemento comporta una riduzione della richiesta di acqua di impasto necessaria, a parità di tutti gli altri fattori, per ottenere una determinata lavorabilità.

Mantenendo invece costante la quantità di acqua, il calcestruzzo ottimizzato con Cenere Volante presenterà una lavorabilità superiore.

In Figura 13 si riporta un confronto, in termini di spandimento, tra una malta confezionata con solo cemento Portland (a) ed una confezionata sostituendo il 25% del cemento con Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**. A parità di contenuto di acqua, la malta contenente **MICRO-POZZ PFA** esibisce una lavorabilità superiore.

Inoltre, la presenza di cenere ha un benefico effetto sul mantenimento nel tempo della lavorabilità della miscela.



**FIGURA 13** Confronto tra malta confezionata con il 100% di cemento Portland (a) e malta confezionata con il 75% di cemento Portland ed il 25% di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** (b)

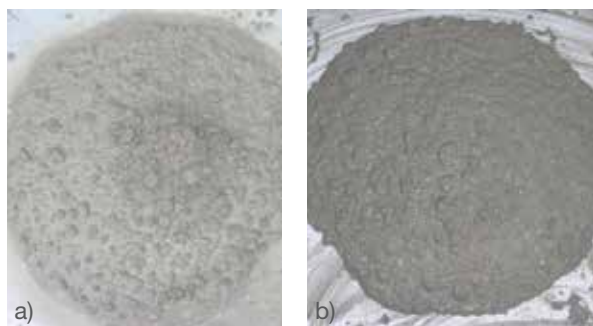
Entrambe le malte sono state confezionate con lo stesso quantitativo di acqua (rapporto acqua/legante = 0.50)

Spesso tra il confezionamento del calcestruzzo e la sua messa in opera intercorre molto tempo (a volte più di un'ora) e questo comporta, soprattutto in climi caldi, indesiderate perdite di lavorabilità.

Temperature elevate infatti, causano una accelerazione della cinetica di idratazione del cemento, determinando una rapida perdita di plasticità del calcestruzzo allo stato fresco e una riduzione dei tempi di presa ed indurimento.

La Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** ha un ruolo essenziale nella riduzione della perdita di lavorabilità. Essendo inizialmente inattiva da un punto di vista chimico (per poter avvenire, la reazione pozzolanica ha bisogno che parte del cemento cominci ad idratarsi producendo idrossido di calcio), nelle prime ore (trasporto e messa in opera del materiale) essa contribuisce esclusivamente a lubrificare lo scheletro solido del conglomerato senza essere interessata da fenomeni di presa.

Altro aspetto essenziale nella reologia di un impasto fresco è la **coesione**, cioè la tendenza delle singole fasi componenti (pasta e scheletro solido) a rimanere ben amalgamate.



**FIGURA 14** (a) Impasto poco coesivo realizzato con solo cemento. (b) Impasto coesivo e stabile realizzato con l'impiego di **MICRO-POZZ PFA**



**FIGURA 15** Risultato finale del getto di una miscela poco coesiva realizzata con solo cemento (a) e di una coesa e stabile realizzata con l'impiego di **MICRO-POZZ PFA** (b)

La **coesione** è legata principalmente al contenuto di materiale fine presente in una miscela.

Grazie alla ridotta dimensione, le particelle di Ceneri Volanti **MICRO-POZZ PFA** sono in grado di incrementare la coesione dell'impasto, favorendo lo sviluppo di tensioni capillari interne al materiale che evitano appunto la separazione delle fasi che lo compongono (Figura 14).

Un conglomerato cementizio poco coesivo può essere soggetto al fenomeno della **segregazione**, cioè alla separazione delle due fasi costituenti principali.

In particolare essa è la conseguenza di due fenomeni, la **sedimentazione** ed il **bleeding**.

Il primo consiste nella tendenza dei costituenti più pesanti (aggregati) a depositarsi sul fondo del getto di calcestruzzo assoggettato a forte vibrazione, il secondo nell'affioramento d'acqua alla sua superficie. La segregazione determina una notevole eterogeneità del calcestruzzo in opera e quindi delle sue prestazioni meccaniche.

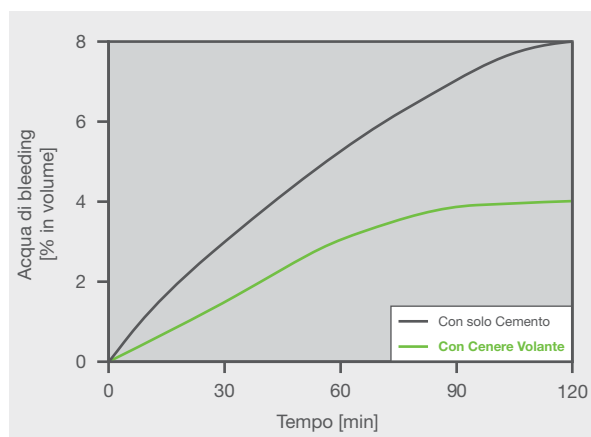
Inoltre, in sua presenza, è molto probabile la formazione di nidi di ghiaia o vespai (Figura 15a) che, oltre a produrre uno sgradevole risultato estetico, riducono drasticamente la durabilità delle strutture.

Attraverso i vespai infatti, gli agenti aggressivi ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), possono con più facilità arrivare sulla superficie delle barre di armatura e corroderle.

Il **bleeding**, in particolare, comporta come conseguenze fondamentali:

- ✓ Formazione di sacche d'acqua sotto l'aggregato (interfaccia aggregato – matrice cementizia).
- ✓ Riduzione di aderenza tra le barre di armatura ed il calcestruzzo;
- ✓ Formazione di craterini da bleeding;
- ✓ Scartellamenti dei pavimenti;
- ✓ Difetti superficiali all'interfaccia calcestruzzo/cassero;
- ✓ Formazione di bolle sotto piastra (basi di macchine e colonne meccaniche) e casseri chiusi (tetrapodi);

L'impiego di Ceneri Volanti **MICRO-POZZ PFA**, in aggiunta al cemento ma anche in sua parziale sostituzione, costituisce il sistema più semplice per evitare tale indesiderato fenomeno (Figura 16).



**FIGURA 16** Acqua di bleeding raccolta in superficie in calcestruzzi confezionati con e senza MICRO-POZZ PFA [9]

Direttamente correlata alla coesione vi è la **robustezza** della miscela di calcestruzzo, intesa come la capacità di “assorbire” eventuali variazioni nelle caratteristiche dei suoi componenti (soprattutto cemento e sabbia) o modifiche composizionali successive al suo confezionamento (in particolare le imprudenti ri-aggiunte di acqua) mantenendo prestazioni costanti, sia allo stato fresco che allo stato indurito.

Maggiori dettagli ed approfondimenti sulla robustezza e sulla notevole influenza che su di essa ha la cenere MICRO-POZZ PFA si possono trovare in [10].

Coesione e Robustezza di una miscela ne migliorano la **pompabilità**.

La posa in opera del calcestruzzo mediante la tecnica del pompaggio è attualmente la più frequente in quanto permette elevate produttività anche in condizioni particolarmente difficili.

In particolare, essa consente di:

- ✓ Risolvere il problema dell'accesso dei mezzi in luoghi difficilmente raggiungibili;
- ✓ Mettere in opera il calcestruzzo a diverse centinaia di metri di distanza dal punto di scarico;
- ✓ Eseguire getti anche a notevole altezza.

Affinchè una miscela sia idonea ad essere pompata, è necessario che presenti importanti requisiti quali:

- ✓ Contenuto sufficiente di materiali fini (diametro dei granuli inferiore a 0.125 mm);
- ✓ Sabbie con opportune distribuzioni granulometriche e, di conseguenza, idonei moduli di finezza;
- ✓ Classe di consistenza almeno pari a S4;
- ✓ Ridotta percentuale della frazione intermedia (4-8 mm);

Tuttavia, requisito essenziale della miscela deve essere la sua resistenza alla segregazione. L'operazione di pompaggio, infatti, tende ad esasperare la tendenza alla segregazione di un calcestruzzo poco coeso.

Qualora questo dovesse avvenire, la pasta di cemento tenderebbe a precedere l'aggregato grosso che, non più adeguatamente lubrificato e trasportato dalla pasta, formerebbe un tappo all'interno della tubazione interrompendo il flusso del materiale.

Problemi di pompaggio sorgono principalmente quando si utilizzano miscele “magre” ossia povere di cemento (Figura 10.a), oppure quando le sabbie non hanno adeguati contenuti di parti fini (modulo di finezza >3). L'impiego di Ceneri Volanti MICRO-POZZ PFA assicura un notevole apporto di materiale finissimo (le particelle di cenere hanno dimensioni mediamente inferiori a quelle del cemento) e nel contempo non determina alcun problema tecnologico che invece potrebbe presentarsi incrementando i dosaggi di cemento (calore di idratazione, reazione alcali-aggregati, ritiro, creep,...) o di sabbia (gradazione granulometrica inadeguata). La forma sferica delle sue particelle contribuisce inoltre a ridurre l'attrito tra il calcestruzzo e le pareti interne delle tubazioni impiegate per il pompaggio.

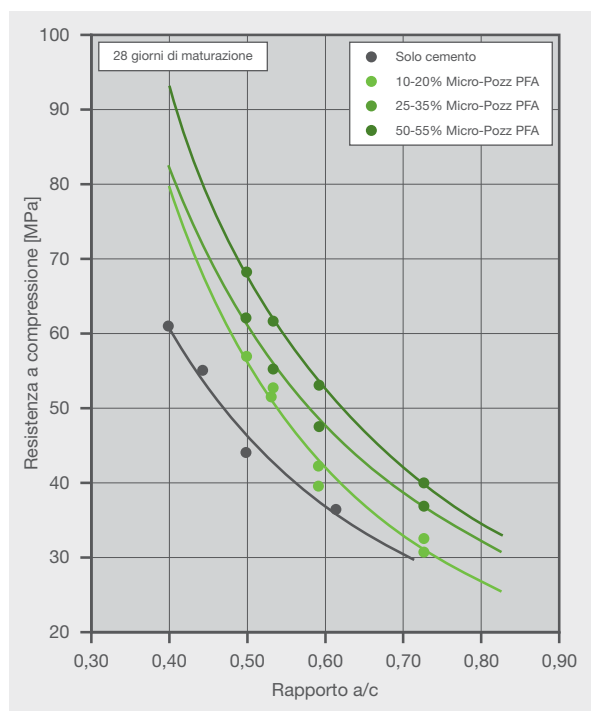
PROPRIETÀ ALLO STATO INDURITO

Resistenze meccaniche

La spiccata pozzolanicità che caratterizza la Genere Volante **MICRO-POZZ PFA** le consente di contribuire in maniera significativa allo sviluppo delle resistenze meccaniche del calcestruzzo indurito.

La reazione pozzolanica che avviene tra le particelle di cenere e l'idrossido di calcio  $Ca(OH)_2$ , determina la formazione di fibre di Silicati di Calcio Idrati (C-S-H) che si aggiungono a quelle derivanti dall'idratazione del cemento (Figure 11 e 12).

Questo determina una sensibile riduzione della porosità generale della matrice cementizia con conseguente incremento delle sue prestazioni in termini di resistenza meccanica.

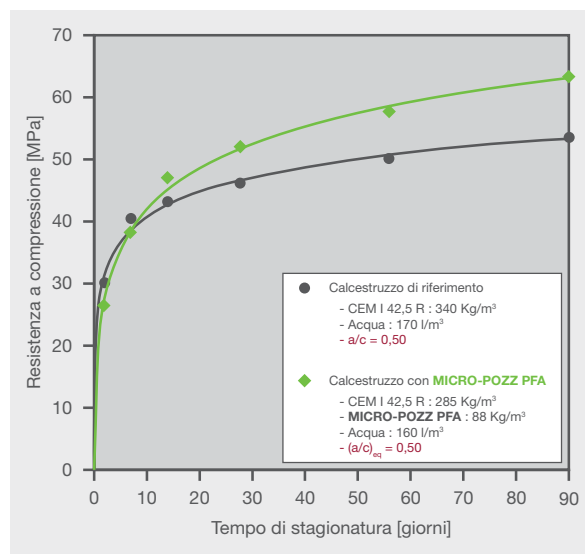


**FIGURA 17** Effetto dell'impiego della Genere Volante **MICRO-POZZ PFA** in aggiunta al cemento [11]

Quando **MICRO-POZZ PFA** viene impiegata in aggiunta al cemento si ottengono incrementi di resistenza meccanica a compressione sia alle brevi che alle lunghe stagionature. In Figura 17 è evidente come, a parità di rapporto a/c, la resistenza a compressione aumenta all'aumentare del tenore di Genere Volante **MICRO-POZZ PFA** impiegato.

Inoltre le caratteristiche di **MICRO-POZZ PFA** consentono di realizzare efficaci ottimizzazioni dei contenuti di cemento.

Le fibre di Silicato di Calcio idrato (C-S-H) derivanti dalla reazione pozzolanica della **MICRO-POZZ PFA** compensano ampiamente i minori quantitativi di fibre C-S-H che sarebbero derivate dal cemento sostituito (Figura 18).



**FIGURA 18** Impiego della Genere Volante **MICRO-POZZ PFA** in parziale sostituzione del cemento

Alle brevissime stagionature, essendo il grado di idratazione del cemento ancora basso, la limitata quantità di  $Ca(OH)_2$  consente piccoli contributi da parte della Genere Volante alle resistenze meccaniche. Appena dopo 3-7 giorni di stagionatura, miscele ottimizzate con Genere Volante **MICRO-POZZ PFA** mostrano resistenze a compressione del tutto comparabili a quelle delle miscele di riferimento.

In corrispondenza dei 28 giorni di stagionatura il comportamento pozzolanico della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** assicura importanti contributi alla resistenza meccanica a compressione, tanto che le miscele ottimizzate presentano resistenze superiori a quelle di miscele con solo cemento.

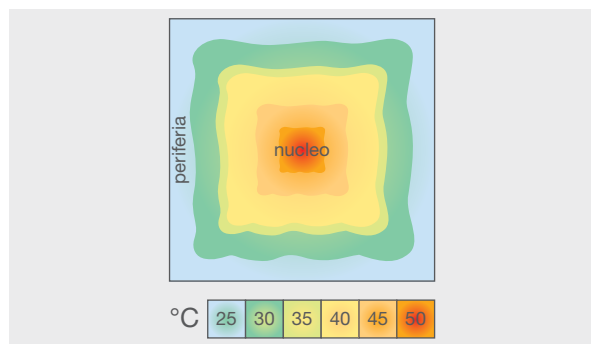
Per tempi di stagionatura maggiori, come ad esempio 60 o 90 giorni, le miscele contenenti **MICRO-POZZ PFA** vedono incrementare notevolmente le loro prestazioni meccaniche, con incrementi di resistenza a compressione superiori a quelli caratteristici delle miscele con solo cemento. A queste stagionature, infatti, la reazione pozzolanica manifesta il suo massimo rendimento, potendo contare sugli elevati quantitativi di idrossido di calcio che il cemento ha rilasciato nella matrice.

L'utilizzo della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** in parziale sostituzione del cemento, contemplato dalle normative europee (UNI EN 206-1) e da quelle nazionali (UNI 11104) consente di produrre calcestruzzi che, anche a parità di resistenza meccanica, sono caratterizzati da:

- ✓ Minore sviluppo di calore di idratazione;
- ✓ Minore sensibilità alla potenziale reazione alcali-aggregato;
- ✓ Maggiore durabilità negli ambienti con presenza di cloruri e solfati.

### Calore di idratazione

L'idratazione del cemento, necessaria allo sviluppo delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo, è una reazione chimica esotermica, che determina aumenti di temperatura all'interno dei getti. Tali variazioni di temperatura sono diverse da sezione a sezione della struttura. Si generano quindi gradienti termici e stati tensionali interni: quando viene superata la resistenza a trazione del calcestruzzo si innesca la fessurazione.



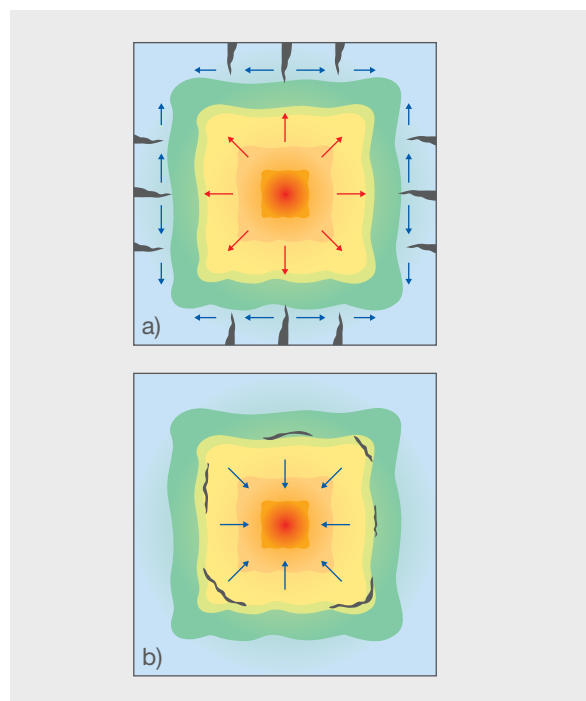
**FIGURA 19** Distribuzione di temperatura in un elemento in calcestruzzo di grosse dimensioni (es. pila di un ponte) a 1-3 gg di maturazione

In Figura 19 viene rappresentata la distribuzione della temperatura nella sezione di una grossa pila in calcestruzzo armato dopo 1-3 gg di maturazione.

A causa della modesta conducibilità termica del calcestruzzo ( $5.5 \div 8 \text{ kJ/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ), la parte più interna del getto (*nucleo*) risulta termicamente isolata e non riesce a dissipare il calore che si genera progredendo l'idratazione del cemento. La parte corticale invece, essendo a diretto contatto con l'ambiente (*periferia*), dissipa quasi istantaneamente il calore prodotto, tanto che la sua temperatura è di poco superiore a quella ambientale.

Il nucleo e la periferia dell'elemento subiscono quindi deformazioni termiche differenti e questo, data la monoliticità del getto, comporta la nascita di tensioni interne.

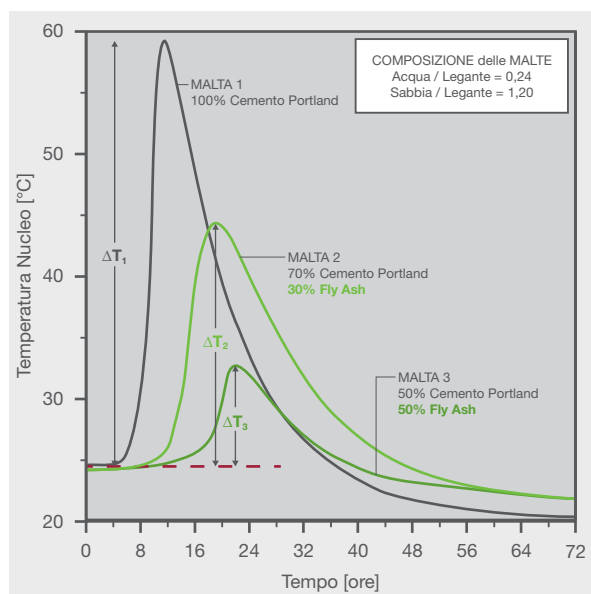
Nelle prime ore successive al getto, quando si realizza la situazione rappresentata in (Figura 20.a) e cioè con nucleo caldo e periferia a temperatura inferiore (ambiente), il primo tenderà a dilatarsi rispetto al secondo con conseguenti sollecitazioni di trazione (e quindi potenziali fessurazioni) nella zona corticale.



**FIGURA 20** Fessurazioni termiche all'esterno (a) ed all'interno (b) di un getto massivo

Dopo la fase di riscaldamento, anche il nucleo inizia a raffreddarsi, tendendo a contrarsi (Figura 20.b). Quando avviene ciò, la periferia si trova a temperatura ambiente ed è dimensionalmente stabile. Nascono quindi tensioni di trazione tra il nucleo e la periferia che possono sfociare in fessurazioni interne, particolarmente pericolose in quanto non visibili.

La parziale sostituzione di cemento con Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** consente di realizzare calcestruzzi che, a parità di resistenze, raggiungono temperature meno elevate. La reazione pozzolanica infatti avviene in modo graduale e soprattutto in una fase successiva a quella dell'inizio dell'idratazione del cemento. In Figura 21 viene mostrato il confronto, in termini di sviluppo di calore, tra una malta confezionata con solo cemento Portland e due malte confezionate con l'impiego di Cenere Volante in parziale sostituzione del cemento [12].



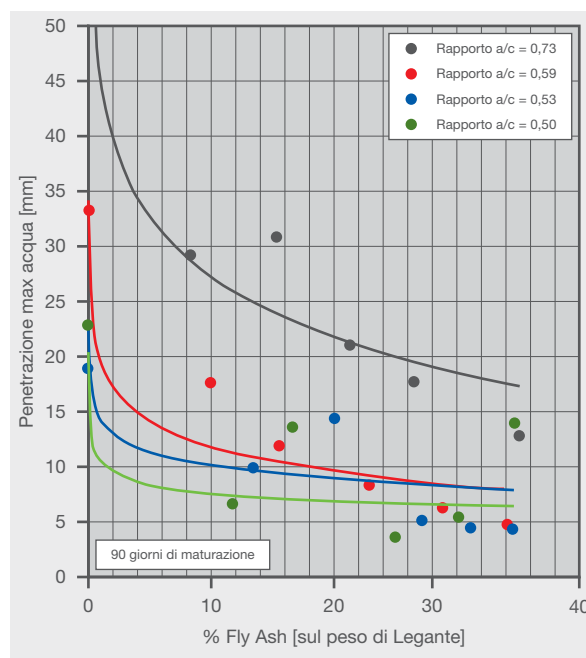
**FIGURA 21** Misure sperimentali di incrementi di temperatura dovuti al calore di idratazione di malte cementizie [12]

Il rischio di fessurazioni nei getti di massa diviene trascurabile quando, attraverso una ottimizzazione dei contenuti di cemento e di **MICRO-POZZ PFA** nella miscela, si ottiene un gradiente di temperatura nucleo-periferia non superiore ai 20 °C ed una temperatura massima nel nucleo inferiore ai 60°C.

### Permeabilità all'acqua

La riduzione della porosità della matrice cementizia a seguito della trasformazione del  $\text{Ca(OH)}_2$  in fibre C-S-H operata dalla Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** comporta notevoli benefici in termini di riduzione della permeabilità all'acqua del calcestruzzo.

Con riferimento alla penetrazione dell'acqua in pressione (UNI EN 12390-8), si riportano in Figura 22 le massime penetrazioni dell'acqua in pressione in funzione del rapporto acqua/cemento e del contenuto percentuale di **MICRO-POZZ PFA**.



**FIGURA 22** Permeabilità all'acqua in pressione dopo 90 giorni di stagionatura in funzione del rapporto a/c e del contenuto percentuale di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** [11] UNI EN 12390-8

Appare evidente come il valore della penetrazione massima si riduca sensibilmente già con bassi contenuti di Cenere Volante. All'aumentare del suo dosaggio (20-30% sul legante) e con rapporti acqua/cemento ordinari (0,5 – 0,6) si ottengono valori di penetrazione all'acqua, estremamente ridotti.

Le strutture realizzate con calcestruzzi contenenti **MICRO-POZZ PFA** risultano quindi meno permeabili all'acqua.

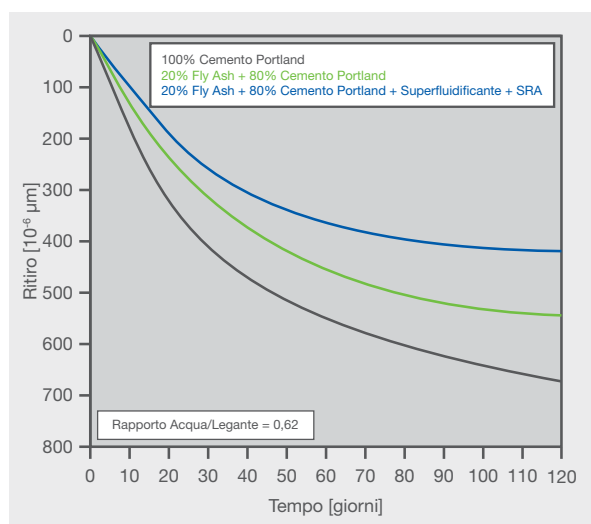
Di conseguenza il tempo di inizio della corrosione aumenta e la sua propagazione rallenta, ciò porta la vita di esercizio della struttura ad allungarsi considerevolmente.

### Ritiro igrometrico

Il calcestruzzo, se esposto ad ambienti insaturi di umidità, tende a contrarsi.

Se questa contrazione viene impedita da vincoli esterni si creano tensioni interne di trazione che, se superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo, portano allo sviluppo di quadri fessurativi più o meno diffusi.

È stato verificato [13] che la sostituzione del 20% di cemento Portland con Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** comporta, a parità di contenuto di acqua, una riduzione del ritiro igrometrico (dopo 4 mesi di esposizione in ambiente a 20°C e U.R. del 50%) di circa il 20% (Figura 23).



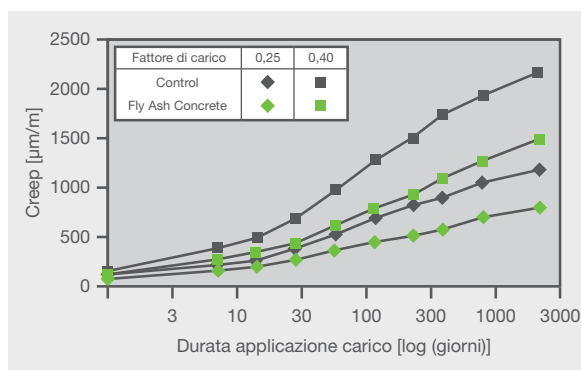
**FIGURA 23** Influenza della Cenere Volante sul ritiro igrometrico del calcestruzzo (semplificato da [13])

Volendo ridurre ulteriormente il ritiro sarà opportuno abbassare il valore del rapporto a/c sia utilizzando la notevole capacità della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** nel ridurre l'acqua di impasto sia impiegando additivi acrilici super-riduttori di acqua della serie **PRIMIUM**.

Ulteriori riduzioni di ritiro (Fig. 23) possono ottenersi impiegando, in alternativa ai prodotti superfluidificanti della serie **PRIMIUM** quelli della serie **GiNIUS**, contenenti al loro interno anche un particolare agente antiritiro (**SRA**, **Shrinkage Reducing Admixtures**).

### Deformazione viscosa - creep

Il creep rappresenta la deformazione unitaria che il calcestruzzo subisce quando è sottoposto ad una sollecitazione di compressione o di trazione per un prolungato periodo di tempo. Prove sperimentali [14] hanno evidenziato che, a parità di resistenza a compressione a 28 giorni, calcestruzzi contenenti Cenere Volante sono caratterizzati da minori deformazioni viscosive (Figura 24). Ciò dipende dal fatto che la loro resistenza aumenta nel tempo mentre il carico si mantiene costante.



**FIGURA 24** Influenza della Cenere Volante sulla deformazione viscosa del calcestruzzo [14]

### DURABILITÀ DELLE STRUTTURE

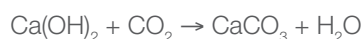
La durabilità strutturale rappresenta un aspetto essenziale di tutte le opere in calcestruzzo armato. A seconda della tipologia di aggressione e della vita nominale richiesta è necessario progettare il calcestruzzo seguendo le indicazioni delle normative, sia nazionali che europee. Il D.M. 17 Gennaio 2018, in linea con quanto stabilito dalla UNI EN 206-1 e dal relativo documento di applicazione nazionale (NAD) UNI 11104, nonché dalle Linee Guida per il Calcestruzzo Strutturale edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP., classifica gli ambienti aggressivi in cinque Classi di Esposizione (Tabella 7). La Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** contribuisce a migliorare la durabilità in ciascuno di questi ambienti.

**TABELLA 7** Classi di esposizione ambientale

Classe di esposizione	Descrizione
XC	Corrosione delle armature promossa da carbonatazione
XS	Corrosione delle armature promossa da cloruri di origine marina
XD	Corrosione delle armature promossa da cloruri non marini
XF	Degrado del calcestruzzo a causa di cicli gelo-disgelo, con e senza cloruri
XA	Degrado del calcestruzzo per attacco solfatico

#### Corrosione delle armature promossa da carbonatazione

Il fenomeno della carbonatazione consiste nella reazione tra l'anidride carbonica CO<sub>2</sub> presente nell'aria e l'idrossido di calcio Ca(OH)<sub>2</sub> formatosi all'interno del calcestruzzo a seguito della reazione di idratazione del cemento:



Attraverso le porosità della matrice cementizia, la CO<sub>2</sub> penetra all'interno del calcestruzzo e si combina con Ca(OH)<sub>2</sub> per formare CaCO<sub>3</sub>. Ciò porta ad una riduzione del contenuto di Ca(OH)<sub>2</sub> e ad una riduzione del valore del pH nel calcestruzzo. In ambiente basico, quale quello presente nel calcestruzzo non carbonatato (pH>9), l'armatura risulta protetta da uno strato passivante che ne impedisce l'ossidazione. Quando però il "fronte" di carbonatazione raggiunge le armature, la diminuzione del pH al di sotto di 9 comporta la disgregazione dello strato passivante. Da questo momento le barre d'armatura risultano esposte alla potenziale corrosione, che si attiverà quando acqua ed ossigeno arriveranno a ridosso della loro superficie.

L'avanzamento del "fronte" di carbonatazione nel calcestruzzo viene descritto in maniera soddisfacente dalla seguente espressione:

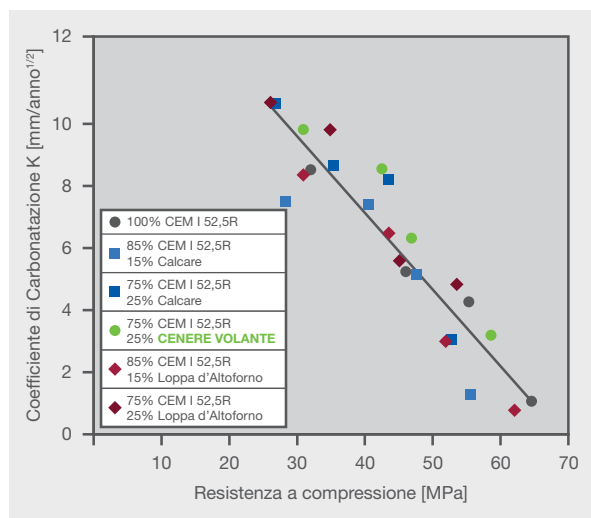
$$x = K \cdot \sqrt{t}$$

dove x è la profondità raggiunta dalla CO<sub>2</sub> nel tempo t. La costante **K**, nota anche come **costante di carbonatazione**, rappresenta la maggiore o minore capacità del calcestruzzo di opporsi all'ingresso della CO<sub>2</sub>. Elevati valori di K sono caratteristici di calcestruzzi molto porosi e permeabili all'anidride carbonica. Viceversa, valori di K molto bassi sono tipici di calcestruzzi compatti e quindi meno permeabili.

Il valore di K dipende da numerosi fattori ma principalmente, come per tutte le prestazioni del calcestruzzo indurito, dal rapporto acqua/cemento. Bassi valori di tale rapporto determinano matrici cementizie più compatte e meno permeabili alla CO<sub>2</sub> (bassi valori di K). Esperienze sperimentali [15,16] hanno dimostrato che il valore K di un calcestruzzo è legato alla sua resistenza meccanica. Differenti calcestruzzi, confezionati con leganti diversi, ma caratterizzati da analoghe resistenze meccaniche, esibiscono medesimo comportamento nei confronti della penetrazione della CO<sub>2</sub> (Figura 25). Come visto in precedenza, l'impiego di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** in aggiunta al cemento determina, a tutti i gradi di stagionatura, incrementi della resistenza a compressione. Ciò comporta, di conseguenza, un incremento della resistenza alla penetrazione della CO<sub>2</sub>.

In maniera del tutto analoga, l'impiego della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** in parziale sostituzione del cemento, può assicurare resistenze alla penetrazione dell'anidride carbonica uguali o superiori a quella caratteristica della miscela di riferimento.

Ottimizzare la miscela rispetto a quella di riferimento contenente solo cemento, in modo da ottenere la medesima resistenza a compressione a 28 giorni, assicura la realizzazione di una matrice cementizia avente la stessa microporosità e stessa capacità di opporsi all'ingresso della CO<sub>2</sub>.



**FIGURA 25** La permeabilità di un calcestruzzo all'anidride carbonica dipende dalla porosità della matrice cementizia ed è quindi correlabile con la resistenza a compressione [16]

**Corrosione delle armature promossa dai cloruri**

La penetrazione del cloruro all'interno del calcestruzzo può avvenire per assorbimento capillare, per effetto di un battente idraulico e per diffusione.

Nei primi due casi gli ioni sono trasportati dall'acqua, attraverso i pori, sotto la spinta rispettivamente di forze capillari e pressioni idrauliche. Nel terzo gli ioni si spostano all'interno dei pori saturi di acqua sotto la spinta di una differenza di concentrazione.

La presenza di una sorgente di cloruri, esterna all'opera, innesca questi processi ed il cloruro tende a penetrare all'interno dello spessore del copriferro, fino a raggiungere le armature.

Quando la quantità di cloruri a ridosso delle armature metalliche supera un determinato valore limite (**concentrazione critica**), il film passivante che le riveste si sfalda lasciando l'acciaio vulnerabile nei confronti della corrosione.

L'ingresso dei cloruri per diffusione, descritto matematicamente dalla seconda legge di Fick, è regolato da un parametro, caratteristico di ogni calcestruzzo, che prende il nome di **Coefficiente di diffusione D**.

Valori elevati di D sono relativi a conglomerati molto permeabili ai cloruri.

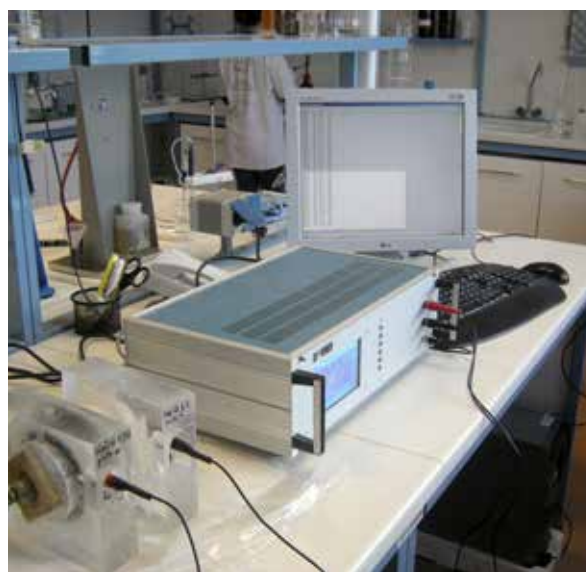
In presenza di aggiunte minerali pozzolaniche quali la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**, l'ingresso dei cloruri nel calcestruzzo viene fortemente rallentato grazie a due meccanismi principali:

- ✓ La reazione pozzolanica determina un aumento delle fibre C-S-H e quindi una forte riduzione della porosità della matrice cementizia;
- ✓ In presenza di componenti pozzolaniche la superficie dei pori capillari è maggiormente capace di adsorbire parte dei cloruri che si sta diffondendo.

Il risultato di questo è una sostanziale riduzione del **Coefficiente di Diffusione D** con conseguente notevole incremento della durabilità delle strutture. La valutazione della permeabilità di un calcestruzzo ai cloruri può essere fatta in modo agevole mediante la tecnica del **Rapid Chloride Penetration Test** (ASTM C-1202).

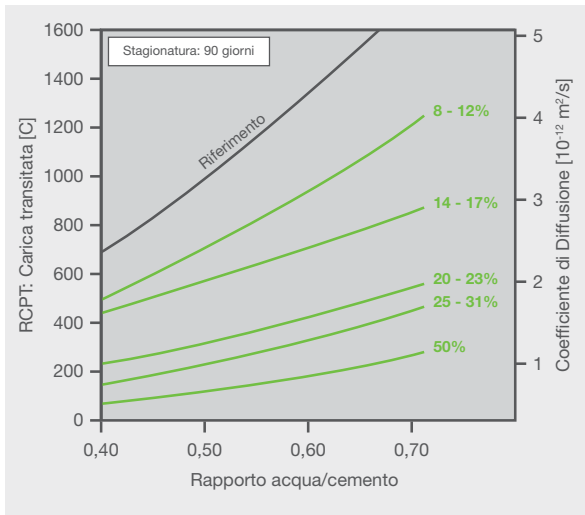
Tramite la strumentazione riportata in Figura 26 viene misurata la quantità di carica elettrica (in Coulomb) che in un determinato intervallo di tempo (6 ore) transita attraverso un provino di calcestruzzo.

Il quantitativo di carica elettrica passante attraverso il campione è correlabile alla permeabilità del calcestruzzo allo ione cloruro: maggiore è la carica elettrica transitata, maggiore sarà la tendenza dei cloruri a penetrare nel calcestruzzo.



**FIGURA 26** Strumentazione per la prova RCPT

In Figura 27 si riporta un confronto tra le cariche elettriche, misurate a 90 giorni di stagionatura su calcestruzzi caratterizzati da diversi rapporti acqua/cemento e da vari quantitativi percentuali di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**.



**FIGURA 27** Influenza del dosaggio di **MICRO-POZZ PFA** sul Coefficiente di Diffusione dei Cloruri [17]

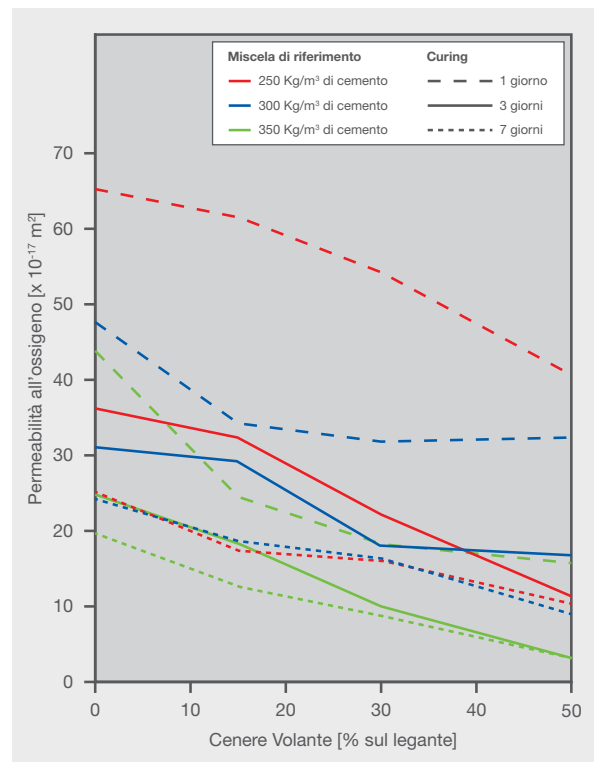
È evidente come, a parità di rapporto acqua/cemento, la permeabilità ai cloruri subisce una notevole riduzione all'aumentare del contenuto di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**.

#### Concentrazione critica dei cloruri

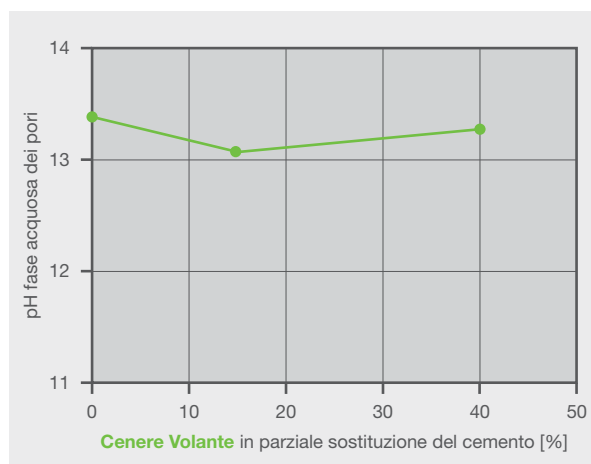
Il film passivante che protegge le armature dalla corrosione rimane stabile fino a quando la concentrazione dei cloruri sulla loro superficie rimane inferiore alla concentrazione critica. Tale valore non è univoco ma dipende da diversi fattori [18]:

- ✓ Contenuto di ossigeno in prossimità delle armature (all'aumentare dell'ossigeno, la concentrazione critica diminuisce e quindi le armature sono più vulnerabili). **MICRO-POZZ PFA** determina una forte riduzione della permeabilità dell'ossigeno nella matrice cementizia (Figura 28);
- ✓ pH del calcestruzzo: al diminuire del pH, la concentrazione critica diminuisce (nei calcestruzzi carbonatati le armature sono più esposte all'attacco dei cloruri). **MICRO-POZZ PFA** non determina rilevanti riduzioni del pH del calcestruzzo (Figura 29);

- ✓ Contenuto di aggiunte minerali pozzolaniche quali la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**. In un calcestruzzo confezionato con solo cemento la concentrazione critica dei cloruri viene usualmente assunta pari allo 0,4% sul peso di cemento. In presenza di aggiunte pozzolaniche tale percentuale può arrivare anche all'1% [20]. Ciò significa che nelle miscele contenenti Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** la quantità di cloruro necessaria per innescare la corrosione delle armature è 2.5 volte maggiore. O se si vuole, le armature risultano 2.5 volte più protette, con conseguenti allungamenti della vita utile della struttura.



**FIGURA 28** Effetto della Cenere Volante utilizzata in parziale sostituzione del cemento sulla permeabilità all'ossigeno del calcestruzzo [19]



**FIGURA 29** pH della fase acquosa dei pori capillari di paste di cemento in funzione della percentuale di Cenera Volante utilizzata in parziale sostituzione del cemento [18]

### Cicli gelo - disgelo

Nelle strutture esposte ad escursioni termiche intorno alla temperatura di 0° C, il fenomeno del gelo-disgelo può comportare forti riduzioni di durabilità. L'acqua viene dapprima assorbita dal calcestruzzo andando a riempire i pori presenti nella matrice cementizia e negli aggregati.

Quando la temperatura esterna scende al di sotto di 0°C (circa) l'acqua solidifica all'interno dei citati pori aumentando di volume (circa il 9%).

Qualora il grado di saturazione dei pori sia superiore ad un determinato valore ( **saturazione critica** ), l'aumento di volume in fase di solidificazione determina l'insorgenza di forti tensioni interne al materiale. A lungo andare e dopo ripetuti cicli di gelo-disgelo dell'acqua contenuta nei pori, il fenomeno porta al distacco di parti più o meno estese di materiale. Siccome il fenomeno interessa principalmente la parte corticale delle strutture, è chiaro che un tale danno comporta anche la maggiore possibilità di corrosione delle armature a seguito della parziale espulsione o comunque fessurazione del copriferro. La presenza di Cenera Volante **MICRO-POZZ PFA** nel calcestruzzo contribuisce positivamente ad incrementare la resistenza ai cicli di gelo-disgelo per i seguenti motivi:

- ✓ La riduzione dei quantitativi di  $\text{Ca(OH)}_2$  ad opera della reazione pozzolanica ne limita notevolmente il dilavamento da parte dell'acqua. Questo evita la formazione di ulteriore porosità all'interno del calcestruzzo;

- ✓ L'effetto fillerizzante caratteristico delle piccole particelle di cenere garantisce l'ottenimento di una matrice cementizia più compatta e meno porosa;
- ✓ L'addensamento della matrice cementizia ad opera delle fibre C-S-H secondarie, ne riduce notevolmente la permeabilità all'acqua;
- ✓ Il miglioramento delle prestazioni meccaniche, soprattutto a lungo termine, consente al calcestruzzo di opporre maggiore resistenza alle eventuali tensioni interne esercitate dall'acqua.

In ogni caso è sempre necessario prevedere l'utilizzo di additivo aerante nelle miscele di calcestruzzo destinate alle classi di esposizione XF.

### Attacco solfatico

L'aggressione da parte dei solfati, che possono essere presenti nelle acque o nei terreni a contatto con le strutture in calcestruzzo, può produrre danni rilevanti in funzione della loro concentrazione, che, a seconda dei casi, si manifestano come perdita di materiale, fessurazioni, rigonfiamenti o disassamenti.

I fenomeni sono causati dagli ioni solfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ) presenti nei terreni, nel mare e nei fiumi e derivanti dalla dissoluzione di sali come ad esempio  $\text{CaSO}_4$  o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  o  $\text{MgSO}_4$  idrati.

Tali ioni possono permeare attraverso la porosità capillare della pasta di cemento indurita e combinarsi con gli alluminati idrati di calcio (C-A-H) formati a seguito dell'idratazione del  $\text{C}_3\text{A}$  presente nel cemento (Figura 11); a seguito della reazione si verifica la formazione di **ettringite** ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Poiché l'**ettringite** ha un volume maggiore degli alluminati a cui si sostituisce, la trasformazione comporta un'espansione che non può essere accomodata nella matrice cementizia indurita. Nascono pertanto coazioni e sollecitazioni troppo elevate per la pasta cementizia e in definitiva effetti distruttivi più o meno intensi. In particolari condizioni termo-igrometriche (temperatura inferiore a 10 °C ed U.R.>95%), in presenza di solfati, carbonato di calcio e acqua, vengono attaccati i silicati di calcio idrati, per formare la **thaumasite** ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ), che porta alla loro distruzione, con conseguenze devastanti sulla struttura resistente del calcestruzzo.



**FIGURA 30** L'acqua di mare contiene elevate concentrazioni di solfati e produce perdita di materiale dalla superficie del calcestruzzo

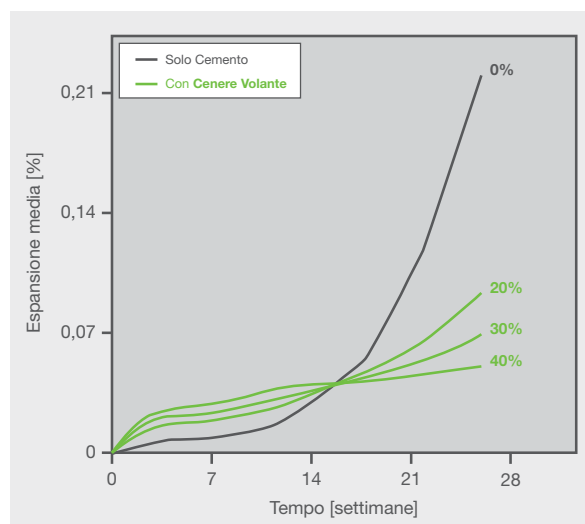
La presenza di idrossido di calcio in entrambe le reazioni è determinante, in quanto capace di favorire il fenomeno espansivo [21].

In questo contesto, la presenza della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** gioca un ruolo fondamentale nella riduzione dei quantitativi di  $\text{Ca(OH)}_2$  presente nella matrice cementizia.

Quantitativi minori di  $\text{Ca(OH)}_2$  disponibile per la reazione con i solfati rallentano drasticamente il fenomeno di espansione e di degrado.

In Figura 31 si può osservare l'effetto della presenza di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** sulla riduzione delle espansioni causate da attacco solfatico.

All'aumentare del tenore di Cenere Volante, l'espansione causata dai solfati diminuisce notevolmente.



**FIGURA 31** Espansione media dovuta al contatto del calcestruzzo con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (modificata da [22])

L'effetto benefico della **MICRO-POZZ PFA** è anche dovuto alla struttura più densa e meno porosa che essa permette di conseguire nel calcestruzzo, il che aumenta la resistenza alla penetrazione dei solfati, ed alla riduzione del contenuto di  $C_3A$  nel cemento per la parziale sostituzione con **MICRO-POZZ PFA**.

### Reazione Alcali – Aggregato (ASR)

La presenza di silice amorfa negli aggregati rappresenta, in alcune zone del Paese, un reale problema di durabilità strutturale.

Qualora infatti tali aggregati dovessero essere impiegati per il confezionamento di calcestruzzo, la silice amorfa che contengono reagirebbe con gli alcali presenti nella massa del calcestruzzo (apportati principalmente dal cemento).

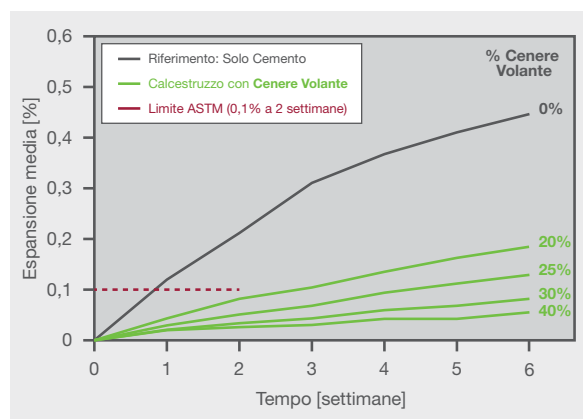


**FIGURA 32** Quadro fessurativo di una struttura colpita da reazione ASR

La reazione, che avviene generalmente dopo alcuni mesi dalla messa in opera del calcestruzzo e comunque quando esso si trova nella fase indurita, è accompagnata da notevoli fenomeni espansivi. Questi possono causare distacchi di porzioni di materiale (per es. il **pop out** che si verifica nelle pavimentazioni industriali) con conseguenti problemi di funzionalità dell'opera, oppure rilevanti fenomeni fessurativi, con ben più gravi conseguenze di ordine statico (Figura 32).

La presenza di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** riduce fortemente tali fenomeni espansivi (Figura 33). L'effetto è dovuto essenzialmente al fatto di essere costituita principalmente da silice reattiva, in questo caso non concentrata nelle singole particelle di aggregato ma distribuita in modo omogeneo nella matrice legante del calcestruzzo. In tal modo l'effetto espansivo risulta ridotto e distribuito e gli effetti distruttivi fortemente attenuati. Inoltre la Cenere Volante, legandosi agli alcali presenti nel sistema, evita che essi siano disponibili per la reazione con la eventuale silice presente negli aggregati.

La reazione alcali – aggregato si può prevenire o almeno limitare fortemente aggiungendo nel calcestruzzo una quantità di **MICRO-POZZ PFA** pari a circa 20-40 % in massa sul legante (Cemento + Cenere Volante).



**FIGURA 33** Espansione media dovuta alla reazione ASR, misurata in accordo alla ASTM C1260 (modificata da [22]) in funzione del contenuto di Cenere Volante

# APPLICAZIONI

## CALCESTRUZZI ORDINARI

Si intendono con tale termine quei conglomerati cementizi che vengono usualmente impiegati nella pratica costruttiva.

Le Norme Tecniche sulle Costruzioni, DM 17-01-2018, ed i relativi rimandi alle norme UNI EN ed alle Linee Guida del Consiglio Superiore dei LL.PP. danno precise indicazioni sulle caratteristiche richieste a questi calcestruzzi in termini sia di prestazioni meccaniche, sia di durabilità nelle varie classi di esposizione ambientale cui saranno sottoposti, e sia di controlli dei materiali e dei processi produttivi.

Le stesse norme prevedono l'impiego delle aggiunte minerali, quali la cenere volante **MICRO-POZZ PFA**, per migliorare tutte le prestazioni del calcestruzzo.

Particolarmente importante risulta l'utilizzo della **MICRO-POZZ PFA** nelle classi di esposizione che presentano fenomeni di degrado legati alla corrosione delle armature.

Le strutture che ricadono in questi ambienti sono maggiormente vulnerabili da un punto di vista statico, in quanto il degrado ambientale comporta non solo problematiche estetiche ma soprattutto riduzioni delle sezioni resistenti delle armature.

Tant'è vero che il tempo di innesco della corrosione viene generalmente assunto come il tempo limite per la vita utile di una struttura.

Migliorare la durabilità del calcestruzzo attraverso l'uso della **MICRO-POZZ PFA** significa quindi allungare la vita utile di una struttura.

In definitiva con la **MICRO-POZZ PFA** si migliorano le prestazioni del calcestruzzo, riducendone i costi e se ne aumenta la vita utile, riducendo ulteriormente il costo dell'opera.

Si riportano alcuni esempi di ottimizzazione di miscele in calcestruzzo relative alle classi di esposizione XC4 (Corrosione delle armature indotta dalla Carbonatazione) ed XD3 (Corrosione delle armature indotta da cloruri), che sono le classi di esposizione più severe nell'ambito del fenomeno della corrosione delle armature.

## Strutture in calcestruzzo armato potenzialmente soggette alla corrosione delle armature per carbonatazione

Con riferimento alla classe di esposizione XC4, in Tabella 8 si riporta il confronto tra una miscela di calcestruzzo con solo cemento (prevista dalla UNI 11104 per la classe di esposizione XC4) e miscele ottimizzate con Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** secondo le modalità di impiego previste dalla UNI EN 206-1 al punto 5.2.5.

**TABELLA 8** CARBONATAZIONE: Miscele di calcestruzzo per la classe di esposizione XC4

Componente	11104	XC4-1	XC4-2	XC4-3
Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	340	320	300	285
<b>MICRO-POZZ PFA</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	-	40	80	90
Acqua [l/m <sup>3</sup> ]	170	168	165	160
(a/c) <sub>eq</sub> (1)	0.50	0.50	0.50	0.50
R <sub>C,28</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	46.23	51.80	53.12	52.11
K [mm/anno <sup>1/2</sup> ]	4.7	3.5	3.3	3.5
P <sub>MAX</sub> [mm] (2)	32	14	14	14
V <sub>U</sub> (Innesco) [anni] (3)	49	89	99	89

(1) (a/c)<sub>eq</sub>: Il rapporto è inteso come rapporto a/(cem+k·PFA), dove k è pari a 0.4, secondo quanto previsto dalla UNI 11104 per un cemento CEM I 42.5R. La riduzione dell'acqua rispetto alla miscela standard è facilitata dalla presenza di **MICRO-POZZ PFA** (vedi pag. 10).

(2)  $P_{MAX}$ : Penetrazione massima dell'acqua in pressione a 28 giorni di stagionatura secondo UNI EN 12390-8;

(3)  $V_U$  (Innesco) vita utile: Il calcolo è stato eseguito ricavando il tempo  $t$  dalla relazione  $x=k \cdot t^{1/2}$  (vedi pag. 21) e ponendo al posto di  $x$  il valore di 30 mm (copriferro minimo previsto dalla UNI EN 1992-1-1 per strutture in classe di esposizione XC4 e vita nominale di 50 anni). Il valore del copriferro non è stato incrementato per tener conto delle tolleranze di esecuzione in opera. I valori di  $K$  sono stati ricavati dalla Figura 25 in base alla resistenza a compressione a 28 giorni della singola miscela. Sono stati considerati 60 giorni piovosi per anno (durante il giorno piovoso il processo di carbonatazione è stato considerato interrotto). I valori del tempo di innesco sono relativi a calcestruzzi posti in opera con lavorabilità e metodi di costipazione tali da assicurare la completa compattazione del calcestruzzo.

#### Strutture in calcestruzzo armato potenzialmente soggette alla corrosione delle armature per penetrazione dei cloruri

La benefica riduzione della penetrazione dei cloruri ad opera della Cenere Volante MICRO-POZZ PFA può essere utilmente sfruttata per confezionare conglomerati cementizi destinati alla realizzazione di strutture che, durante la loro vita, saranno a contatto con cloruri.

Rientrano in tali casistiche le strutture di cui alle classi di esposizione XD (cloruri non provenienti dal mare), XS (cloruri provenienti dal mare) ed XF (strutture esposte ai cicli di gelo-disgelo, con e senza la presenza di cloruri). Nella seguente Tabella 9 si fa riferimento alla classe di Esposizione XD3 e, come per la classe di esposizione XC4, si propone un confronto tra la miscela standard individuata dalla UNI 11104 e alcune possibili ottimizzazioni con MICRO-POZZ PFA secondo la UNI EN 206-1.

**TABELLA 9** ATTACCO CLORURI: Miscele di calcestruzzo per la classe di esposizione XD3

Componente	11104	XD3-1	XD3-2	XD3-3
Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	360	340	320	300
MICRO-POZZ PFA [kg/m <sup>3</sup> ]	0	50	65	85
Acqua [l/m <sup>3</sup> ]	160	160	155	150
$(a/c)_{eq}$ (1)	0.44	0.44	0.44	0.44
$R_{C,28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	52.62	61.33	60.98	60.15
$D_{28}$ [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	4.10	1.95	2.38	2.19
$P_{MAX}$ [mm] (2)	23	10	10	10
$V_U$ (Innesco) [anni] (3)	49	114	98	112

(1)  $(a/c)_{eq}$ : Il rapporto è inteso come rapporto  $a/(cem+k \cdot PFA)$ , dove  $k$  è pari a 0.4, secondo quanto previsto dalla UNI 11104 per un cemento CEM I 42.5R. La riduzione dell'acqua rispetto alla miscela standard è facilitata dalla presenza di MICRO-POZZ PFA (vedi pag. 10).

(2)  $P_{MAX}$ : Penetrazione massima dell'acqua in pressione a 28 giorni di stagionatura secondo UNI EN 12390-8;

(3)  $V_U$  (Innesco) vita utile: Il calcolo è stato eseguito facendo riferimento alla modellazione della penetrazione dei cloruri secondo la seconda legge di Fick. In particolare è stato considerato costante nel tempo il coefficiente di diffusione  $D$  (risultati conservativi) ed è stato considerato un copriferro pari a 45 mm (copriferro minimo previsto dalla UNI EN 1992-1-1 per strutture in classe di esposizione XD3 e vita nominale di 50 anni). Sono state considerate una concentrazione superficiale di cloruri e una concentrazione critica rispettivamente pari al 2.5% e 0.4% sul peso di legante. Il valore del copriferro non è stato incrementato per tener conto delle tolleranze di esecuzione in opera. I valori del tempo di innesco sono relativi a calcestruzzi posti in opera con lavorabilità e metodi di costipazione tali da assicurare la completa compattazione del calcestruzzo.

Il progetto delle miscele con **MICRO-POZZ PFA** secondo le indicazioni della UNI EN 206-1 consente di ottenere, per tutte le classi di esposizione:

- ✓ Migliori prestazioni reologiche (vedi pag. 13);
- ✓ Prestazioni meccaniche a 28 giorni uguali o superiori a quelle della miscela di riferimento (vedi pag. 16);
- ✓ Prestazioni meccaniche a lungo termine (60 o 90 giorni) superiori a quelle della miscela di riferimento;
- ✓ Ridotti valori di permeabilità all'anidride carbonica (classi di esposizione XC);
- ✓ Ridotti valori di permeabilità ai cloruri (classi di esposizione XD e XS);
- ✓ Riduzione della porosità della matrice con conseguente minore vulnerabilità ai cicli gelo-disgelo (classi di esposizione XF);
- ✓ Maggiore resistenza agli attacchi solfatici (classi di esposizione XA);
- ✓ Ridotti valori di permeabilità all'acqua in pressione;
- ✓ Aumento della vita utile di esercizio grazie a:
  - Incremento del tempo di innesco della corrosione;
  - Incremento, grazie alla riduzione della permeabilità all'acqua, del tempo di propagazione della corrosione.

L'ottimizzazione dei contenuti di legante (cemento+cenere) comporta poi importanti benefici tecnici quali la riduzione del calore di idratazione, del ritiro igrometrico, della potenziale reattività ASR, nonché notevoli vantaggi economici.

### **CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI (SCC)**

Si intendono con tale termine quei conglomerati cementizi caratterizzati da una elevata **fluidità**, ovvero una notevole capacità di scorrimento all'interno di casseri, anche di elevata lunghezza, ma anche e soprattutto in presenza di una elevata densità di armature metalliche senza richiedere vibrazione.

Tali peculiari caratteristiche fanno dell'SCC una tecnologia particolarmente adatta alla realizzazione di elementi strutturali dove, per le ridotte dimensioni e/o la forte congestione delle armature, si è impossibilitati a compattare il calcestruzzo con le usuali tecniche disponibili.

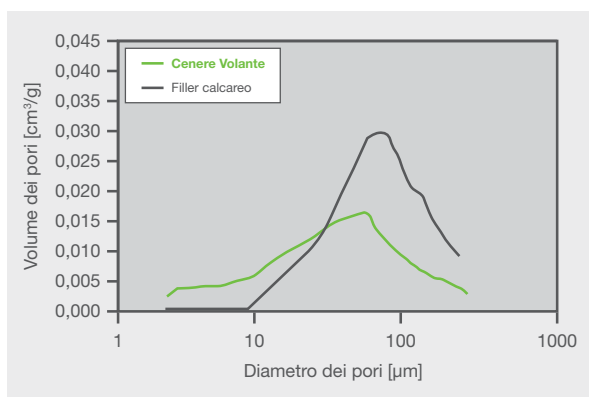
La elevata fluidità non rappresenta, comunque, l'unica proprietà che deve caratterizzare questo materiale. Ben più importante risulta essere la sua **resistenza alla segregazione**. È necessario infatti che, durante le fasi di miscelazione, trasporto e messa in opera il materiale non abbia a segregarsi proprio a causa della sua estrema fluidità.

Al fine di poter assicurare contemporaneamente, scorrevolezza e coesione, risulta estremamente importante aumentare il volume (tra i 170 ed i 200 l/m<sup>3</sup>) di materiale finissimo (dimensioni minori di 0.075 mm) il quale costituirà, assieme al cemento, la pasta del conglomerato. La pasta rappresenta il "fluido trasportatore" che trascina lo "scheletro solido" costituito dagli aggregati. Non essendo conveniente, allo scopo, utilizzare il solo cemento per motivi tecnici (elevato calore di idratazione, elevato ritiro) ed economici (elevato costo unitario del cemento) è necessario impiegare delle aggiunte minerali quali la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**. Con l'uso di **MICRO-POZZ PFA** si ottengono calcestruzzi autocompattanti molto robusti (cioè stabili) e coesivi, anche in assenza di additivi modificatori di viscosità.

Un recente lavoro sperimentale [23] ha messo in evidenza alcune differenze di prestazione tra SCC confezionati utilizzando Cenere Volante piuttosto che filler calcareo.

È emerso che l'impiego dell'aggiunta pozzolanica, rispetto a quella calcarea, assicura:

- ✓ Maggiore fluidità dell'impasto, sia in termini di flow che di tempo  $t_{500}$  (tempo impiegato dal calcestruzzo a raggiungere un flow di 500 mm) (UNI EN 11041);
- ✓ Maggiore mantenimento di lavorabilità;
- ✓ Minore sviluppo di aria;
- ✓ Minore viscosità;
- ✓ Maggiore resistenza alla penetrazione d'acqua sotto pressione (UNI EN 12390-8);
- ✓ Minore dimensione dei mesopori (diametri compresi tra 20 e 200 nm) della matrice cementizia (Figura 34);
- ✓ Maggiore resistenza ai cicli gelo-digelo;
- ✓ Maggiore incremento delle prestazioni a lungo termine.

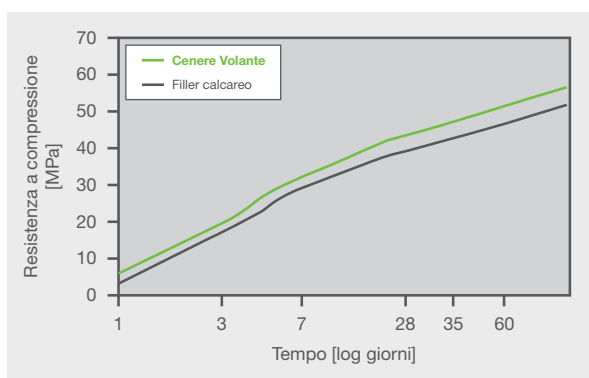


**FIGURA 34** Distribuzione dei mesopori nelle matrici cementizie di calcestruzzi SCC confezionati con Ceneri Volante e con filler calcareo [23]

La presenza della Ceneri Volante **MICRO-POZZ PFA**, grazie alla reazione pozzolanica, apporta un significativo contributo allo sviluppo delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo. A titolo di esempio si riporta di seguito (Tabella 10 e Figura 35) un confronto tra due SCC confezionati con lo stesso contenuto di cemento e stesso rapporto a/c ma con diversi tipi di filler [24].

**TABELLA 10** SCC confezionati con Ceneri Volante (PFA) e con filler calcareo (CALC)

Miscela	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Filler (kg/m <sup>3</sup> )	Acqua (kg/m <sup>3</sup> )	Slump flow (mm)	
				0'	30'
PFA	307	128	178	790	750
CALC	306	157	178	790	720

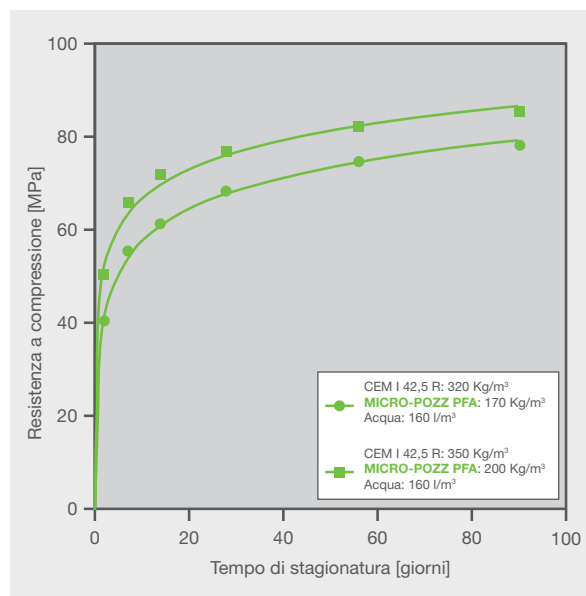


**FIGURA 35** Resistenze a compressione delle miscele riportate in Tabella 10 [24]

## CALCESTRUZZI AD ELEVATA RESISTENZA

Il D.M. 17 Gennaio 2018 consente l'impiego di conglomerati cementizi aventi classe di resistenza fino a C90/105. Tuttavia, per classi comprese tra C45/55 e C70/85 è necessario che tutte le grandezze meccaniche e fisiche di interesse per la staticità e la durabilità della struttura siano determinate preventivamente mediante una adeguata sperimentazione.

Inoltre, la successiva produzione deve essere accompagnata da specifiche procedure per il controllo di qualità.



**FIGURA 36** Calcestruzzi ad alta resistenza confezionati con **MICRO-POZZ PFA**

L'impiego di Ceneri Volante **MICRO-POZZ PFA** e dei moderni additivi superfluidificanti acrilici riduttori di acqua della serie **PRiMIUM**, consente di pervenire facilmente a valori di resistenza caratteristica di circa 70÷80 N/mm<sup>2</sup> (Figura 36) senza esuberanti dosaggi di cemento, evitando così una serie di inconvenienti tecnici ed economici. Per resistenze maggiori è consigliabile associare a **MICRO-POZZ PFA** il fumo di silice **MICRO-POZZ DSF**.

### CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI (FRC)

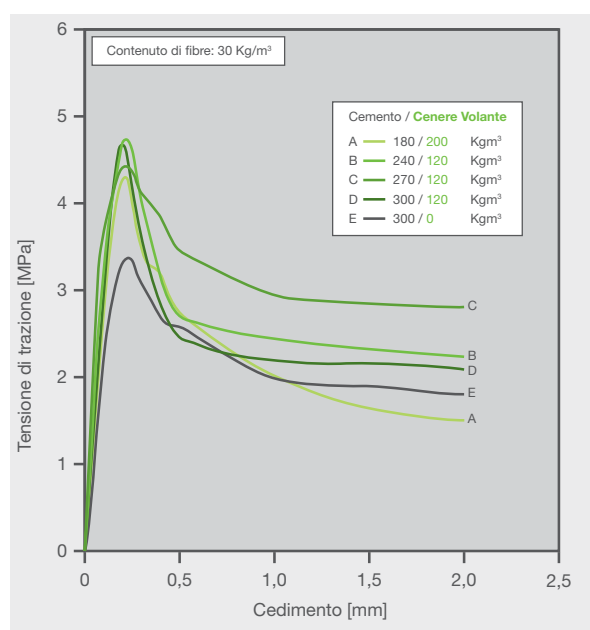
L'aggiunta di fibre, metalliche o di sintesi, nel calcestruzzo influenza negativamente le proprietà reologiche del materiale, provocando difficoltà di mescolamento e riduzione della lavorabilità e della pompabilità con segregazione, formazione di "ricci" e disomogeneità nelle prestazioni.

Questi inconvenienti vengono normalmente affrontati aumentando il contenuto di acqua nella miscela aggravando così ulteriormente la situazione.

L'impiego di **MICRO-POZZ PFA** nei calcestruzzi fibrorinforzati aumenta il contenuto di pasta legante nella miscela migliorando così sostanzialmente la reologia del materiale, facilitando la dispersione omogenea delle fibre ed eliminando la segregazione ed il bleeding (essudazione d'acqua).

L'aumento della coesione e della fluidità assicurano la facilità di mescolamento ed evitano il blocco del calcestruzzo in movimento all'interno della cassaforma e ne incrementano la pompabilità.

Inoltre la riduzione del bleeding evita l'accumulo di acqua in corrispondenza dell'interfaccia fibra-matrice cementizia, favorendo una migliore aderenza fibra-calcestruzzo con un conseguente incremento della duttilità degli elementi strutturali (Figura 37).



**FIGURA 37** Influenza del contenuto di Cenere Volante sulle prestazioni di calcestruzzi fibrorinforzati con fibre in acciaio [25]

### CALCESTRUZZI A RITIRO RIDOTTO

Si tratta di speciali calcestruzzi che presentano valori del ritiro molto ridotti rispetto ad un calcestruzzo tradizionale.

La parziale sostituzione del cemento con Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** determina già una riduzione del ritiro di circa il 20% rispetto al calcestruzzo con solo cemento (Figura 23). Ulteriori riduzioni possono facilmente ottenersi mediante l'impiego degli additivi riduttori di ritiro della linea **GiNIUS (SRA, Shrinkage Reducing Admixtures)**.

Applicazioni più frequenti di questa tipologia di calcestruzzo sono quelle della realizzazione di pavimentazioni industriali, dove il fenomeno del ritiro è rilevante (si rinvia a [26] per una più approfondita trattazione sull'argomento), dei ponti e viadotti, dei muri di sostegno di grandi dimensioni, degli edifici alti e di tutte quelle strutture nelle quali si debbano ridurre le variazioni di volume causate dal ritiro.

### CALCESTRUZZI A BASSO CALORE DI IDRATAZIONE

L'impiego di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** in parziale sostituzione del cemento consente di confezionare miscele di calcestruzzo con minor contenuto di cemento ma con maggior contenuto di legante (cemento + cenere volante **MICRO-POZZ PFA**).

Questo, associato ai tempi in cui avviene la reazione pozzolanica, determina una riduzione del calore sviluppato durante l'idratazione del cemento.

Si possono quindi soddisfare le prescrizioni di capitolato relative ai getti di massa che prevedono limiti del picco massimo di temperatura raggiunto nell'elemento strutturale ( $T_{max}$ ) e della differenza di temperatura fra il nucleo e la superficie esterna del calcestruzzo ( $\Delta T_{max}$ ):

$$T_{max} < 60^{\circ}\text{C}$$
$$\Delta T_{max} < 20^{\circ}\text{C}.$$

Questo viene ottenuto senza penalizzare le prestazioni del calcestruzzo che anzi risultano migliorate sia a medio che a lungo termine per il più alto contenuto di legante (cemento+ **MICRO-POZZ PFA**).

È da notare che la parziale sostituzione del cemento con Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** consente di non intervenire sul diametro massimo dell'aggregato, ma addirittura diminuirlo se occorre. La presenza di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** infatti, assicura sempre un adeguato quantitativo di pasta legante necessaria a rivestire anche aggregati di piccolo diametro.

#### ELEMENTI VIBROCOMPRESSI E TUBAZIONI

Si sta diffondendo sempre più l'impiego di Ceneri Volanti per il confezionamento di calcestruzzi messi in opera con bassa lavorabilità (terra umida) mediante operazioni meccaniche di vibro-compressione. L'utilizzo di **MICRO-POZZ PFA** consente di ottenere, oltre che un vantaggio economico, anche un notevole miglioramento dell'aspetto estetico dei manufatti, spesso soggetti alla formazione di sgradevoli efflorescenze. La presenza della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** riduce il quantitativo di  $\text{Ca(OH)}_2$  presente nella miscela e, quindi, la possibilità che questo venga dilavato e portato in superficie a formare efflorescenze. Nelle tubazioni in calcestruzzo, la presenza di **MICRO-POZZ PFA** è particolarmente apprezzata per la capacità di conferire ai manufatti, fra l'altro, caratteristiche di impermeabilità e resistenza ai solfati. Nei calcestruzzi vibro-compresi, oltre all'impiego della **MICRO-POZZ PFA**, è consigliato l'utilizzo degli additivi plastificanti/riduttori di acqua **PRiMIUM T.U.** o **PLAST T.U.** al fine di ottimizzare il contenuto del materiale legante presente nella miscela e per ridurre la porosità dei manufatti.

# APPLICAZIONI SPECIALI

## MISTI CEMENTATI

Per misto cementato si intende un materiale costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego (misto granulare), trattata con un legante idraulico (cemento o cemento + cenere volante). L'esigenza di migliorare le prestazioni tecniche e contemporaneamente la sostenibilità del settore delle costruzioni, ha portato ad impiegare aggiunte minerali pozzolaniche quali la Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** in aggiunta o parziale sostituzione del cemento (Figura 38 e Tabella 11).

**TABELLA 11** Misti cementati realizzati con un mix-design standard e con l'utilizzo di **MICRO-POZZ PFA**. Le prestazioni sono equivalenti o migliorative con l'aumento del contenuto di **MICRO-POZZ PFA**

Mix	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	Aggregati (kg/m <sup>3</sup> )	Acqua (kg/m <sup>3</sup> )
1	70	0	2240	90
2	50	20	2240	90
3	50	80	2180	90

L'efficacia di detta aggiunta, il cui utilizzo è disciplinato in tutti i più importanti capitolati nazionali di realizzazioni stradali, è stata verificata in una serie di sperimentazioni che hanno evidenziato i benefici conseguiti grazie al suo impiego:

- ✓ **Migliore rispondenza delle curve granulometriche** ai fusi prescritti nei capitolati, grazie alla notevole presenza di materiale finissimo della Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**;
- ✓ **Migliore compattabilità in situ delle miscele**, grazie al notevole effetto fillerizzante delle particelle di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**: potendo compattare meglio il materiale in situ, risulta più facile e meno dispendioso ottenere masse volumiche elevate e comunque prossime a quelle ottenute in laboratorio;
- ✓ **Prestazioni meccaniche** (in termini di resistenza a compressione e trazione indiretta) rispondenti agli intervalli prescritti nei Capitolati;

- ✓ Aumento della resistenza flessionale grazie all'incremento del contenuto di fini;
- ✓ Incremento dei valori di portanza;
- ✓ Notevole miglioramento della resistenza a fatica e conseguentemente incremento della vita utile delle pavimentazioni;
- ✓ Notevoli benefici economici, sia immediati (legati al minor costo del materiale) che futuri (legati ai minori lavori di manutenzione conseguenti alle ridotte deformazioni nel tempo dello strato finito).



**FIGURA 38** Stese di misto cementato realizzate con l'impiego di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA**

**CALCESTRUZZI CONTENENTI ELEVATI VOLUMI DI CENERE VOLANTE**

Il termine **HVFA (High Volume Fly Ash) Concrete, (Calcestruzzo ad alto contenuto di cenere volante)**, introdotto per la prima volta dal Prof. Malhotra nel 1980, designa quei conglomerati cementizi caratterizzati da rilevanti quantitativi di Cenere Volante (>40÷50 % sul legante complessivo).

Proprio per questa caratteristica, molti dei benefici normalmente apportati al calcestruzzo dall'aggiunta di Cenere Volante, in questa tipologia di conglomerato, risultano notevolmente amplificati.

Ricerche e studi approfonditi hanno infatti dimostrato che, in presenza di elevati volumi di Cenere Volante, tutte le prestazioni del calcestruzzo sia allo stato fresco che a quello indurito risultano migliorate.

Rinviano a [17] per maggiori dettagli, si riportano di seguito le principali caratteristiche dei conglomerati realizzati con l'utilizzo combinato di elevati volumi di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** e di additivi superfluidificanti acrilici riduttori di acqua della serie **PRIMIUM** di G.A.:

- ✓ Ridotta richiesta di acqua di impasto;
- ✓ Eccellente reologia: elevata lavorabilità, pompabilità, coesione e robustezza;
- ✓ Adeguate resistenze meccaniche alle brevi stagionature con successivi notevoli incrementi a lungo termine (anche dopo 1 o più anni);
- ✓ Ridotto calore di idratazione;
- ✓ Ridotta permeabilità all'acqua, ai cloruri ed all'anidride carbonica;
- ✓ Alta resistenza agli attacchi solfatici;
- ✓ Notevole effetto mitigante della reazione ASR (Reazione Alkali – Silice).

Di seguito vengono riportate (Tabella 12) alcune miscele HVFA ed una miscela ordinaria con solo cemento.

**TABELLA 12** Calcestruzzi HVFA e calcestruzzo ordinario

Mix	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	Aggregati (kg/m <sup>3</sup> )	Acqua (kg/m <sup>3</sup> )
1	180	180	1880	160
2	220	220	1800	160
3	250	250	1730	160
4	280	280	1650	160
5	400	0	1920	160

Nella Tabella 13 si evidenzia come il calcestruzzo ordinario presenti valori di resistenza a compressione molto elevati nel breve periodo e modesti suoi incrementi nel tempo. Le Miscele **HVFA** presentano, invece, uno sviluppo della resistenza a compressione più graduale e costante che porta, nel medio periodo, a prestazioni del tutto confrontabili con quelle del calcestruzzo ordinario, come nel caso delle miscele 3 e 4 (dosaggio di cenere di 250-280 kg/m<sup>3</sup> e cemento 250-280 kg/m<sup>3</sup>) rispetto alla 5 (dosaggio di solo cemento di 400 kg/m<sup>3</sup>).

**TABELLA 13** Confronto in termini di sviluppo nel tempo delle resistenze meccaniche a compressione tra calcestruzzi HVFA e calcestruzzo ordinario [17]

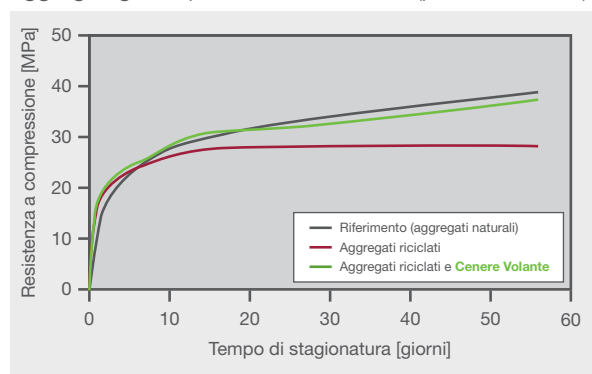
Mix	Resistenze meccaniche di compressione (MPa)		
	7 giorni	28 giorni	90 giorni
1	18,20	29,94	39,78
2	28,44	42,37	53,73
3	37,32	56,93	65,97
4	42,69	58,96	69,01
5	54,48	60,81	69,23

**CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI**

La crescente sensibilità verso lo sviluppo sostenibile del settore delle costruzioni ha aumentato l'interesse verso l'impiego di aggregati derivati da demolizioni, in parziale sostituzione di quelli derivanti dalla normale attività estrattiva.

Diverse attività sperimentali [27,28] hanno studiato le prestazioni di calcestruzzi realizzati con tali tipologie di aggregato, evidenziando le potenzialità di questa attività di recupero.

Il recente D.M. 17 Gennaio 2018, recependo l'esigenza di sostenibilità del settore delle costruzioni, ha introdotto la possibilità di utilizzare, con opportuni limiti, aggregati grossi provenienti da riciclo (punto 11.2.9.2).



**FIGURA 39** In presenza di Ceneri Volante **MICRO-POZZ PFA** è possibile confezionare calcestruzzi con aggregati riciclati senza penalizzazioni di resistenza meccanica (semplificato da [27])

L'impiego di Ceneri Volante **MICRO-POZZ PFA** in conglomerati cementizi confezionati con aggregati riciclati contribuisce notevolmente a migliorarne le prestazioni meccaniche. In particolare, l'introduzione della Ceneri Volante **MICRO-POZZ PFA** in aggiunta al cemento ha evidenziato notevoli miglioramenti in termini di resistenza meccanica (Figura 39) e permeabilità all'acqua, con importanti riduzioni della porosità globale della matrice cementizia.

Nella pratica, l'aggiunta di Ceneri Volante alle miscele con aggregati di riciclo consente di ottenere, a 60 giorni di maturazione, prestazioni confrontabili con quelle ottenibili con inerti naturali a 28 giorni di maturazione e comunque superiori a quelle di miscele realizzate con il solo utilizzo di inerti riciclati (Tabelle 14 e 15, Figura 39).

**TABELLA 14** Calcestruzzi con inerti naturali e calcestruzzi realizzati con inerte riciclato da calcestruzzo demolito e ceneri volanti [28]

Mix	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Fly Ash (kg/m <sup>3</sup> )	Inerti Nat. (%)	Inerti Ric. (%)	Acqua (kg/m <sup>3</sup> )
<b>1</b>	310	0	100	0	157
<b>2</b>	310	60	70	30	157
<b>3</b>	310	120	40	60	157

**TABELLA 15** Confronto in termini di progressione delle resistenze meccaniche a compressione tra un calcestruzzo con inerti naturali e calcestruzzi con inerti riciclati e ceneri volante [28]

Mix	Resistenze meccaniche di compressione (MPa)			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni	60 giorni
<b>1</b>	29,34	35,20	41,36	-
<b>2</b>	24,82	30,61	37,54	40,89
<b>3</b>	17,00	19,84	34,12	38,01

# RIFERIMENTI NORMATIVI PER L'USO NEL CALCESTRUZZO

L'utilizzo delle Ceneri Volanti per la produzione di cementi ed il confezionamento di conglomerati cementizi è disciplinato dalle norme:

- ✓ D.M. 17/01/18 "Norme Tecniche per le Costruzioni" (par. 11.2.9.3);
- ✓ UNI EN 197-1 "Cemento – Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni";
- ✓ UNI EN 450-1/2 – "Ceneri Volanti per calcestruzzo. Definizioni, requisiti e controllo di qualità";
- ✓ UNI EN 206-1 e UNI 11104 "Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità";

Il primo riferimento consente, al punto 11.2.9.3, l'impiego di aggiunte minerali, quali le Ceneri Volanti, nel confezionamento del calcestruzzo, secondo i criteri stabiliti dalla norma europea UNI EN 206-1 e dal recepimento nazionale UNI 11104.

La norma UNI EN 197-1 classifica, invece, i diversi tipi di cemento e stabilisce i requisiti dei vari costituenti. Tra questi sono comprese le Ceneri Volanti che possono essere utilizzate nella produzione di cementi Portland composti (CEM II), di cementi pozzolanici (CEM IV) e di cementi composti (CEM V).

La norma UNI EN 450-1 definisce i requisiti di conformità che devono caratterizzare le Ceneri Volanti utilizzate nel confezionamento di calcestruzzi. I limiti di accettazione riportati fanno riferimento a valori caratteristici e sono quindi determinati sulla base di criteri statistici. I controlli di accettazione sulle ceneri vengono fatti con frequenze periodiche (stabilite al Prospetto 2 della UNI EN 450-1).

La UNI EN 206-1 specifica, fra l'altro, quali devono essere i requisiti per i materiali utilizzati nel confezionamento del calcestruzzo. In particolare, al punto 5 prevede che possano essere utilizzate le cosiddette Aggiunte di tipo II: fumi di silice e Ceneri Volanti. Sempre la UNI EN 206-1 consente di tener conto di parte della cenere introdotta nella miscela per la valutazione del rapporto acqua/cemento e del dosaggio minimo di cemento per ciascuna classe di esposizione.

A tale scopo viene introdotto il concetto del valore **k**.

Quando per una determinata classe di esposizione ambientale nel mix-design di un calcestruzzo si utilizza la Cenere Volante, caratterizzata da un definito valore di **k** (fornito dalla normativa), si devono verificare le seguenti condizioni:

- ✓ la quantità (cemento +  $k \cdot$  Cenere Volante) non deve essere inferiore al dosaggio minimo di cemento previsto per la specifica classe di esposizione in cui si sta operando;
- ✓ il rapporto **a/c** può essere sostituito con il rapporto **a/(c+k·Cenere)**;
- ✓ la quantità massima di Ceneri Volanti che può essere considerata nelle relazioni precedenti deve soddisfare i requisiti:  
**cenere  $\leq 0,33 \cdot$  cemento** per il CEM I  
**cenere  $\leq 0,25 \cdot$  cemento** per tutti gli altri cementi

Quantità di Cenere Volante **MICRO-POZZ PFA** superiori a quest'ultimo limite, pur non potendo essere computate nel calcolo del rapporto a/c e del dosaggio minimo di cemento, possono comunque essere utilizzate impiegate al fine di massimizzare le prestazioni del calcestruzzo.

Per quanto riguarda il coefficiente **k**, la norma italiana UNI 11104 consente, nel caso di Ceneri Volanti rispondenti ai requisiti della UNI EN 450-1/2, l'utilizzo dei seguenti valori:

- ✓ **0,2** per: CEM III/A, CEM IV/A, CEM V/A
- ✓ **0,4** per: CEM I/A, CEM II/A

La norma UNI EN 206-1 permette anche di derogare ai requisiti precedenti in merito a dosaggio minimo di cemento e rapporto acqua/cemento quando si ricorre al concetto di “*calcestruzzo a prestazione equivalente*” (paragrafo 5.2.5.3).

In sostanza, si dovrà accertare che il calcestruzzo confezionato utilizzando Ceneri Volanti in parziale sostituzione del cemento, sviluppi una prestazione equivalente, specialmente con riferimento alla sua resistenza alle azioni ambientali e alla sua durabilità, a quella di un calcestruzzo confezionato con solo cemento, secondo le prescrizioni normative per la corrispondente classe di esposizione.

Qualora applicando questo secondo metodo venissero utilizzati valori di  $k$  superiori a quelli definiti in precedenza, bisognerà stabilire l'idoneità di tali valori.



*Applicazione in calcestruzzo estruso*



*Calcestruzzo superfluido per impalcato autostradale*

# BIBLIOGRAFIA

- [1] American Coal Ash Association, *Report No. FHWA-IF-03-019 Fly Ash Facts for Highway Engineers*
- [2] V. Alunno Rossetti, *Il calcestruzzo, Materiali e Tecnologie* – McGraw-Hill
- [3] M. Puccio, *Le Ceneri di carbone* – ITEC Editrice
- [4] *Handbook on fly ash in concrete* – Ed. Lutze / vom Berg
- [5] I. HOHBERG, P. SCHIESSL – Influence of concrete technology parameters on the leaching behaviour of mortars and concretes.
- [6] P. SCHIESSL, I. HOHBERG, *Radiazioni naturali dai materiali da costruzione, ed in particolare dal calcestruzzo con sottoprodotti industriali*, Institute for Building Materials Research, research report No. F433, (1995)
- [7] V.M. Malhotra, P. K. Mehta, *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete*, Second Edition
- [8] P. L. Owen, Fly Ash and its usage in concrete”, Journal, Concrete Society, U.K., Vol. 13, No. 7, pp. 21-26, 1979
- [9] M.Colleparidi, L.Coppola – Materiali innovativi per calcestruzzi speciali
- [10] M. Valente, M.Bressan, G.Sforza, A.Sechi, A.Allasia, Aumento dell'affidabilità strutturale dovuto alla maggiore omogeneità del conglomerato in opera, ottenuta mediante l'impiego di componenti pozzolanici fillerizzanti, quali le Ceneri Volanti (Micro-Pozz PFA), nelle miscele di calcestruzzo – Giornate AICAP 2007, 24° Convegno Nazionale, Salerno 4 – 6 Ottobre 2007.
- [11] M. Valente, M.Bressan, A.Pasqualini, F.M.Liberatore, La Cenere Volante come aggiunta minerale nel calcestruzzo – Incremento delle prestazioni meccaniche, della durabilità e della sostenibilità economico-ambientale delle strutture in c.a. – 18° Congresso C.T.E., Brescia 11, 12 e 13 Novembre 2010.
- [12] L. Janzhong, S. Wei, M.Changwen, L.Japing, Effect of Mineral Admixtures on the Hydration heat of mortar in super high strength concrete, 1<sup>st</sup> International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, 13 – 15 Ottobre 2008, Nanjing - China
- [13] A. Borsoi, M. Colleparidi, S.Colleparidi, R.Troli, *Influenza della Cenere Volante in presenza di additivi chimici sul ritiro di calcestruzzo*, Enco Journal n° 46 del 2009.
- [14] K.M. Alexander, J.Wardlaw, I.Ivanusec, Fly Ash: *The manner of its Contribution to Strength and the Magnitude of its Effect on Creep and Related Properties of High Quality Concrete*, Civil Engineering Transactions 26 (1984) No. 4, pp. 295-304
- [15] Burden, D., 2006. *The durability of concrete containing high levels of fly ash*. Portland Cement Association, Research & Development Information, PCA R&D Serial No. 2989.
- [16] S. Colleparidi, M. Colleparidi, S. Ogoumah Olagot J.J., F. Simonelli, *The influence of slag and fly ash on the carbonation of concretes*. Proceedings of Eithth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, USA, 23-29 May, pp. 483-494.
- [17] M.Valente, M.Bressan, A.Pasqualini, F.M.Liberatore, E.Strazzer, *Calcestruzzi HVFA (High Volume Fly Ash) Concrete ad elevati volumi di fly ash per la durabilità e la sostenibilità delle strutture in c.a. nel terzo millennio*, Giornate AICAP 2011, 26° Convegno Nazionale, Padova 19 – 21 Maggio 2011.
- [18] L. Coppola, (2007), *Concretum*, Ed. McGraw-Hill.
- [19] M.D.A. Thomas, J.D. Matthews – (1992), *The permeability of fly ash concrete*, Materials and Structures, pp. 388-396.
- [20] P.Pedefferri, L. Bertolini, *La durabilità del calcestruzzo armato*, Ed. McGraw-Hill.
- [21] V. Alunno Rossetti, G. Chiochio, A. Paolini, *“Expansive properties of the mixture C4ASH12 - 2CS II. Effects of lime, porosity and liquid/solid ratio”*, *Cement and Concrete Res.* 12, 577 (1982)
- [22] Sudheen Anartharaman, *Sulfate and Alkali Silica Resistance of Class C & F fly ash replaced blended cements*, Arizona State University.
- [23] S. Grzeszczyk and P. Podkowa, *The Effect of Limestone Filler on the Properties of Self Compacting Concrete*, Annual Transactions of the nordic rheology society, Vol. 17, 2009
- [24] M. Colleparidi, Self-Compacting Concrete: What is New?, Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures In Concrete, Berlin, Germany, 20-24 October, pp. 1-16 (2003)
- [25] C.Fritz, Sifcon, a special fiber-reinforced concrete for special applications, DarmStädter Massivbau-Seminar – Faserbeton, Band 3, 1990.
- [26] General Admixtures SpA, Pavimentazioni in calcestruzzo – Nuove tecnologie e Sistemi.
- [27] G. Moriconi, Il riutilizzo dei rifiuti solidi nei materiali da costruzione nel quadro generale della sostenibilità ambientale, Settimana senza frontiere 2008, 28 Maggio 2008 – Ancona.
- [28] A.Caggiano, C.Faella, C.Lima, E.Martinelli, M.Mele, A.Pasqualini, R.Realfonzo, M.Valente, Mechanical Behaviour of Concrete with Recycled Aggregate, 2nd Workshop on The new boundaries of structural concrete, ACI Italy Chapter Ancona 2011.



# LA NOSTRA MISSIONE

FORNIRE TECNOLOGIA E VALORE ALL'INDUSTRIA DELLE COSTRUZIONI,  
ATTRAVERSO L'INNOVAZIONE ED UN APPROCCIO DI SISTEMA.

## INNOVAZIONE

Puntare sulla qualità e innovazione dei propri prodotti, tecnologie e servizi per distinguersi e consolidare la propria immagine.

Garantire attraverso comportamenti consapevoli la sostenibilità ambientale dei propri prodotti.

## SISTEMA

Comprendere e soddisfare le esigenze del cliente attraverso l'ottimizzazione dei propri processi elevando così il livello di competitività ed espandendo le opportunità.

Adottare la cultura della prevenzione riducendo qualunque forma di rischio riferita alla qualità del prodotto o dell'inquinamento dell'ambiente.



Created by: Marketing - General Admixtures S.p.A. | Graphic design: Paolo Celotto | Photo: Archivio General Admixtures S.p.A.

REV.05 02.03.2026



Azienda certificata per la Gestione dei Sistemi Qualità e Ambiente conformi alle norme UNI EN ISO 9001 e 14001

Certified company for Quality and Environmental System Management according to standards UNI EN ISO 9001 and 14001



## **General Admixtures S.p.A.**

Via delle Industrie n. 14/16  
31050 Ponzano Veneto (TV) | ITALY  
T. + 39 0422 966911 | [info@gageneral.com](mailto:info@gageneral.com)

Unità produttiva: Via dell'Industria n. 33  
26016 Spino d'Adda (CR) | ITALY  
T. + 39 0373 980391 | [antebiago@gageneral.com](mailto:antebiago@gageneral.com)

[www.gageneral.com](http://www.gageneral.com) | [www.antebiago.it](http://www.antebiago.it)

