

MICROSFERE CAVE IN PVC PER CALCESTRUZZI RESISTENTI AL GELO

Luigi COPPOLA[°], Tiziano CERULLI^{°°}, Pasquale ZAFFARONI^{°°},
Mario COLLEPARDI^{°°°}

[°]Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

^{°°}Mapei, Laboratorio Tecnologico, Milano.

^{°°°}Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona.

RIASSUNTO

La capacità di resistere alle azioni alternate di gelo-disgelo viene conferita al calcestruzzo creando nel conglomerato un sistema di microbolle d'aria mediante l'aggiunta di un additivo aerante. Tuttavia, il volume d'aria prodotto dall'additivo aerante dipende da una serie di fattori la maggior parte dei quali non controllabili: il risultato è che se il volume d'aria è minore di quello richiesto, il calcestruzzo risulta gelivo. Al contrario, volumi d'aria maggiori di quelli necessari per rendere il conglomerato resistente al gelo determinano per il calcestruzzo prestazioni meccaniche inferiori a quelle richieste. Per poter risolvere i problemi connessi con l'impiego degli aeranti possono essere utilmente impiegate delle microsfere in plastica flessibile capaci di attenuare le pressioni che insorgono a seguito della formazione del ghiaccio nel calcestruzzo.

Nel presente lavoro vengono riportati i risultati di lavorabilità, resistenza a compressione e resistenza al gelo di 112 impasti di conglomerato cementizio confezionati presso una centrale di calcestruzzo preconfezionato impiegando sia additivi aeranti che microsfere cave. Dall'indagine è emerso che più del 50% dei calcestruzzi realizzati con aerante risultano gelivi e con resistenze meccaniche sensibilmente diverse dal valore richiesto. Tutti i calcestruzzi realizzati con le microsfere di plastica, invece, sono risultati resistenti al gelo e con prestazioni meccaniche sostanzialmente coincidenti con il valore richiesto per il conglomerato.

1. INTRODUZIONE

Le alternanze termiche intorno a 0° C possono provocare gravi danni alle strutture in calcestruzzo. Infatti, quando l'acqua congela aumenta il suo volume di circa il 9% ed è in grado di innescare la nascita di pressioni idrauliche capaci di distruggere il conglomerato cementizio.

La durabilità delle strutture sottoposte ai cicli di gelo-disgelo può essere conseguita mediante l'impiego di additivi aeranti. L'aggiunta dell'additivo aerante al calcestruzzo, infatti, consente la creazione di un sistema di microbolle che, se opportunamente spaziate (distanza reciproca tra due bolle: $< 200 \mu\text{m}$), possono allentare la pressione dell'acqua conseguente all'abbassamento di temperatura al di sotto di 0° C.

Tuttavia, il volume d'aria da stabilizzare mediante l'aerante al fine di rendere il calcestruzzo resistente ai cicli di gelo-disgelo dipende da molteplici parametri che possono determinare nel conglomerato un quantitativo di microbolle sostanzialmente diverso da quello progettato.

Ad un volume di aria maggiore di quello richiesto consegue un calcestruzzo con resistenze meccaniche inferiori a quelle previste in progetto (mix-design); ogni punto percentuale di aria in più rispetto a quella prevista, infatti, determina una diminuzione della resistenza a compressione di circa il 5%. Viceversa un quantitativo d'aria minore non consente di ottenere un conglomerato resistente al gelo a causa della elevata distanza tra le microbolle.

In generale si può affermare che tutti i parametri che influenzano la viscosità della pasta di cemento, influenzano anche la stabilizzazione dell'aria nel calcestruzzo^{1, 2}.

La lavorabilità del conglomerato, ad esempio, influenza il processo di stabilizzazione dell'aria: più alto è lo *slump*, maggiore risulterà in generale il volume dell'aria nell'impasto. Risulta, invece, alquanto difficile, se non addirittura impossibile, promuovere lo sviluppo d'aria in calcestruzzi asciutti (consistenza *SI*). L'esigua quantità di acqua nell'impasto, infatti, non consente all'additivo aerante di stabilizzare il sistema di bolle desiderato.

Una maggiore quantità di sabbia nel calcestruzzo favorisce la formazione delle microbolle d'aria. Soprattutto le particelle di sabbia comprese tra 150 e 600 μm contribuiscono all'inglobamento d'aria, in quanto le dimensioni degli interstizi tra queste particelle di sabbia sono molto vicine a quelle delle microbolle che rimangono così più facilmente intrappolate. L'effetto è particolarmente evidente nei calcestruzzi magri e diminuisce negli impasti più ricchi di cemento.

Quando nel calcestruzzo è presente la cenere volante o il fumo di silice si registra una maggiore richiesta di additivo aerante ed una minore stabilità dell'aria inglobata.

In particolare, in presenza di cenere volante gli aumenti di dosaggio di additivo aerante possono arrivare fino a circa 5 volte il dosaggio richiesto per il calcestruzzo senza cenere. In linea di massima il dosaggio di additivo aerante aumenta con il contenuto di carbone incombusto presente nella cenere volante³.

In presenza di fumo di silice l'incremento di additivo aerante è più prevedibile e regolare (nel senso che non dipende molto dal tipo di fumo di silice). Esso dipende, inoltre, dalla presenza o meno di additivo superfluidificante, oltre che dal quantitativo dell'aggiunta minerale³.

Più elevata è la temperatura, minore risulta il volume di aria nel calcestruzzo. L'elevata temperatura, infatti, per la maggiore evaporazione oltre che per una più veloce idratazione del cemento, determina un minor quantitativo di acqua libera nell'impasto disponibile per la formazione del sistema di microbolle d'aria⁴.

Lo sviluppo d'aria, inoltre, è favorito dall'impiego di cementi ricchi di alcali; finezze spinte del cemento, invece, deprimono lo sviluppo d'aria nel calcestruzzo⁵.

Anche il tempo di mescolamento dell'impasto influisce sul volume d'aria: generalmente il volume d'aria aumenta con il numero di giri del miscelatore e con il tempo di miscelazione⁶.

I parametri che influenzano lo sviluppo e la stabilizzazione dell'aria nel conglomerato risultano, quindi, innumerevoli. Pertanto, è operazione alquanto impegnativa sviluppare il volume di aria progettato, mantenerlo costante per ogni fornitura di conglomerato che si confeziona e garantirlo nella struttura dopo aver messo in opera e compattato il calcestruzzo.

Al fine di risolvere i problemi connessi con l'impiego degli additivi aeranti, è stata proposta la possibilità di realizzare un sistema di bolle d'aria pre-formate attraverso l'impie-

go di microsfere cave di plastica (MSP), (Fig. 1 e 2). Le microsfere cave hanno generalmente un diametro compreso tra 20 e 40 μm ; esse sono costituite da una membrana flessibile, di spessore compreso tra qualche micron e qualche decina di micron, capace di deformarsi allentando la pressione dell'acqua non congelata prodottasi a seguito dell'abbassamento della temperatura al di sotto di 0° C.

Con l'impiego delle microsfere in plastica - a differenza degli aeranti - il volume d'aria nell'impasto dipenderebbe esclusivamente dal quantitativo di sfere introdotto nel calcestruzzo. L'aggiunta delle microsfere, quindi, può essere stabilita con esattezza all'atto del confezionamento del calcestruzzo sulla base del solo quantitativo di pasta di cemento, senza tener conto dei parametri che influenzano la stabilizzazione dell'aria in presenza degli additivi aeranti.

Generalmente le microsfere sono disponibili in commercio in forma di pasta costituita per il 90% di acqua e per il 10% di microsfere. Il quantitativo di pasta necessario a rendere il calcestruzzo resistente al gelo varia da 1 Kg (per calcestruzzi magri e asciutti) a circa 3.5 Kg (per calcestruzzi ricchi di cemento con elevata lavorabilità)⁸.

Nel presente lavoro vengono riportati e discussi i valori di lavorabilità, volume di aria, resistenza meccanica a compressione e resistenza al gelo di calcestruzzi confezionati presso una centrale di betonaggio impiegando sia i tradizionali additivi aeranti che le microsfere cave in plastica.

2. PROCEDURE DI PROVA, RISULTATI E DISCUSSIONE

Presso una centrale di produzione di calcestruzzo preconfezionato sono state analizzate le caratteristiche reologiche, meccaniche e di resistenza al gelo del calcestruzzo prodotto nell'arco di quattro mesi (da dicembre a marzo). In particolare, per due giorni al mese venivano controllati sette impasti di calcestruzzo confezionati con additivi aeranti e sette impasti di calcestruzzi confezionati con microsfere cave in plastica (MSP). Il valore nominale della resistenza meccanica a compressione media (R_{cm28}) di entrambe le tipologie di calcestruzzo - con aerante o con MSP - sottoposte al controllo era di 35 N/mm^2 corrispondente ad una resistenza caratteristica di 30 N/mm^2 con un controllo di tipo B ed uno scarto quadratico medio di 3.5 N/mm^2 . La scelta dell'impasto da sottoporre al controllo veniva effettuata anche sulla base della classe di consistenza del calcestruzzo. In particolare, dei sette controlli giornalieri 5 venivano effettuati per conglomerati con classe di consistenza S3, S4 oppure S5 ed i restanti due con classe di consistenza S1 oppure S2.

La pezzatura massima dell'aggregato naturale (20 mm) è rimasta invariata per tutti gli impasti così come è stato lasciato invariato il dosaggio di cemento Portland 425 (305 Kg/m^3) e quello dell'acqua d'impasto (165 Kg/m^3); le diverse lavorabilità venivano conseguite modulando l'aggiunta dell'additivo superfluidificante (da 0.3 a 1.2 Kg per ogni 100 Kg di cemento). Negli impasti con l'aerante il quantitativo di additivo è stato lasciato immutato; la quantità di aerante pari a 0.06 Kg per ogni 100 Kg di cemento è stata stabilita con una prova preliminare che aveva l'obiettivo di stabilizzare un volume d'aria del 6% che secondo le norme ACI rappresenta il valore ottimale per rendere il calcestruzzo (con aggregato avente pezzatura da 20 mm) resistente al gelo in condizioni di esposizione ambientale estremamente severe per la formazione di ghiaccio (*severe exposure*). Allo stesso modo è stato mantenuto costante il quantitativo di microsfere: è stato utilizzato un quantitativo di pasta di microsfere pari a 2.5 Kg/m^3 che aveva fornito in precedenti esperienze ampie garanzie per la resistenza al gelo del calcestruzzo.

In definitiva, quindi, sono stati controllati:

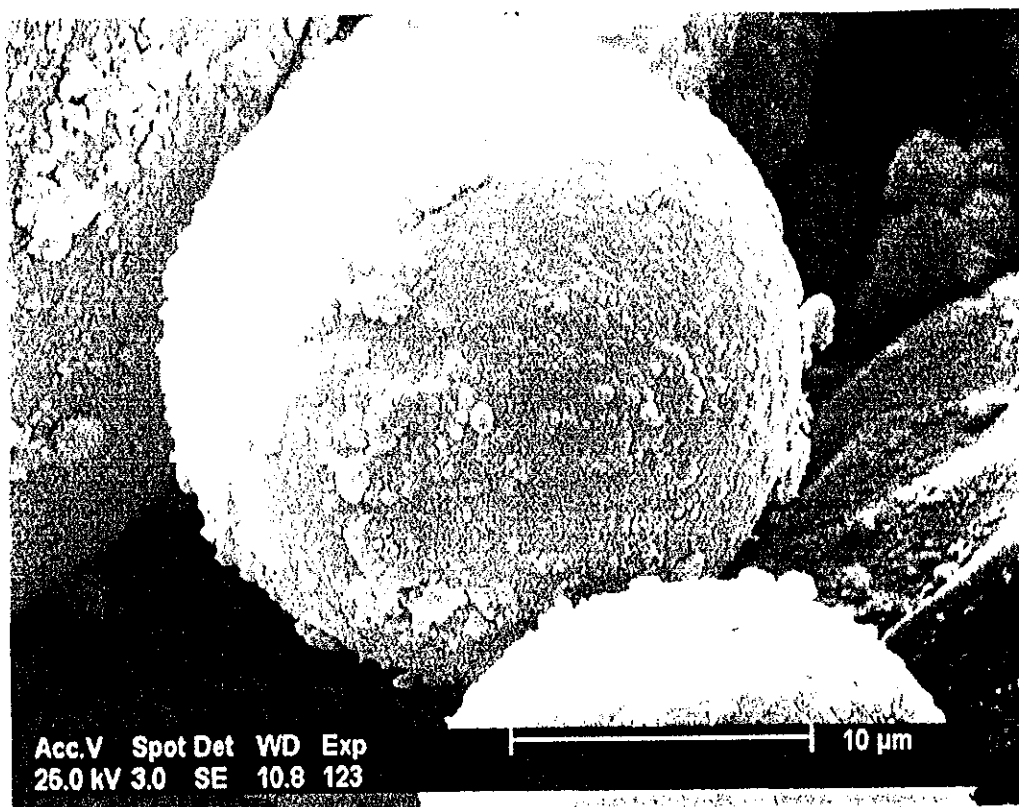


FIGURA 1

Fotografia al microscopio elettronico a scansione di una microsfera cava completamente integra

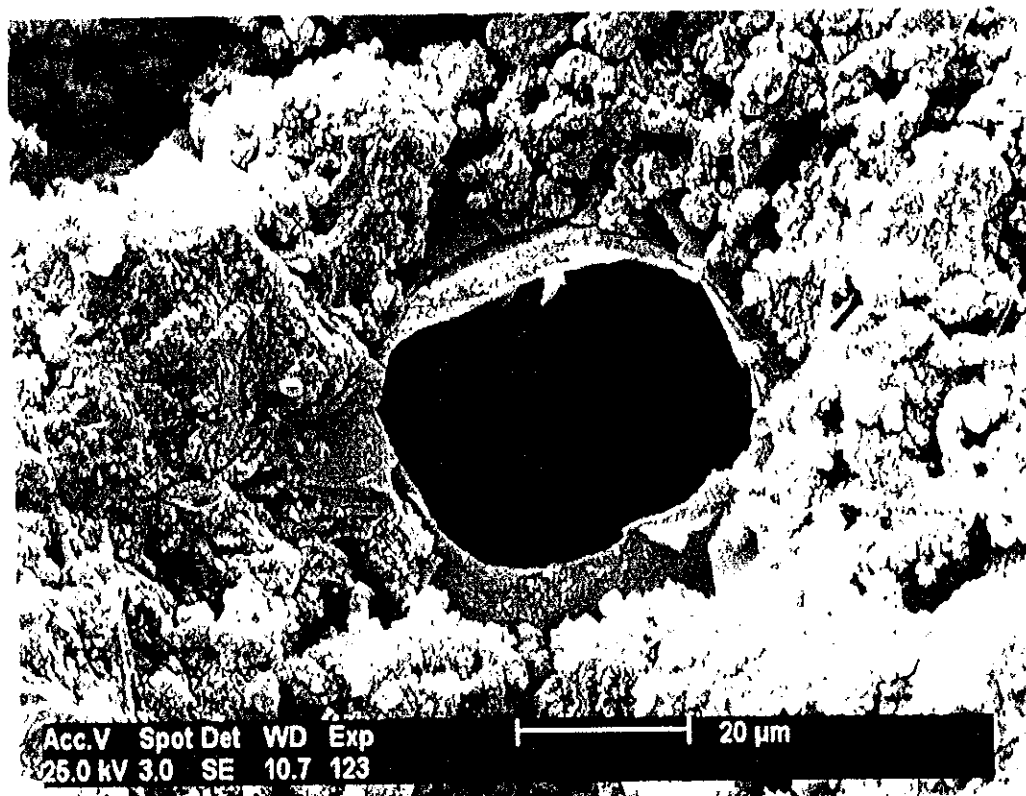


FIGURA 2

Fotografia al microscopio elettronico a scansione di una microsfera cava parzialmente lacerata

- 56 impasti di calcestruzzo con R_{ck} nominale di 30 N/mm^2 ed R_{cm28} di 35 N/mm^2 confezionati con additivo aerante (0.06%), di cui 16 aventi classe di consistenza $S1$ o $S2$ e 40 classe di consistenza $S3$, $S4$ o $S5$.
- 56 impasti di calcestruzzo con R_{ck} nominale di 30 N/mm^2 ed R_{cm28} di 35 N/mm^2 confezionati con MSP (2.5 Kg/m^3) di cui 16 con classe di consistenza $S1$ o $S2$ e 40 con classe di consistenza $S3$, $S4$ o $S5$.

Per ogni impasto sottoposto al controllo sono state effettuate le seguenti determinazioni:

- misura della consistenza del calcestruzzo fresco mediante abbassamento al cono di Abrams (*slump*);
- misura dell'aria stabilizzata nell'impasto mediante il porosimetro limitatamente ai calcestruzzi con aerante; questa determinazione, infatti, non ha alcun valore per i calcestruzzi con MSP, essendo il quantitativo di aria introdotto nell'impasto minore di quello registrabile con lo strumento;
- misura della resistenza meccanica a compressione media del calcestruzzo dopo 28 giorni di stagionatura alla temperatura di 20° C ed U.R. = 95% (R_{cm28}).
- valutazione della resistenza al gelo secondo la procedura descritta dalla norma ASTM C666. La prova consiste nel misurare il modulo elastico dinamico (E_d) del calcestruzzo prima (E_i) e dopo (E_f) averlo sottoposto ad un numero (n) di cicli di gelo-disgelo consistenti nel variare la temperatura da $+5$ a -18° C ad una velocità di 0.19° C/min . La resistenza al gelo viene quantificata attraverso il fattore di durabilità (*f.d.*): $f.d. = n \cdot e/300$ (e è la percentuale del modulo elastico dopo n cicli ed $n = 300$ oppure al numero di cicli in corrispondenza del quale $E_f = 0.6 E_i$).

In Fig. 3 sono riportati i dati di lavorabilità, aria, resistenza meccanica a compressione e fattore di durabilità per i 112 impasti di calcestruzzi confezionati nelle otto giornate prescelte nel periodo invernale da dicembre a marzo.

Come si può notare il volume di aria stabilizzata nel calcestruzzo mediante l'additivo aerante risulta estremamente variabile nell'arco delle otto giornate di prove. In particolare, l'aria nel calcestruzzo oscilla da un valore minimo dell'1.9% ad un massimo del 9%. È interessante notare, inoltre, che per tutte le giornate di prova non è stato possibile sviluppare un quantitativo di aria superiore al 3% nei calcestruzzi asciutti o plastici (classe di consistenza $S1$ o $S2$). Nei calcestruzzi con MSP, invece, il volume di aria oscilla in un intervallo compreso tra l'1.8% ed il 3%.

L'estrema variabilità dell'aria stabilizzata attraverso l'impiego degli aeranti determina valori di resistenza meccanica a compressione media sensibilmente diversi dal valore nominale previsto di 35 N/mm^2 . In particolare, i valori di resistenza meccanica oscillano da un minimo di 27 N/mm^2 ad un massimo di 45 N/mm^2 . I valori di resistenza meccanica più elevati sono stati registrati per i calcestruzzi di consistenza $S1$ ed $S2$ per i quali l'aria stabilizzata con l'aerante è risultata pressoché nulla.

Grazie all'impiego delle microsferi cave, invece, l'oscillazione dei valori di resistenza meccanica è risultata contenuta entro 5 N/mm^2 con un valore minimo di 32 N/mm^2 e massimo di 37 N/mm^2 .

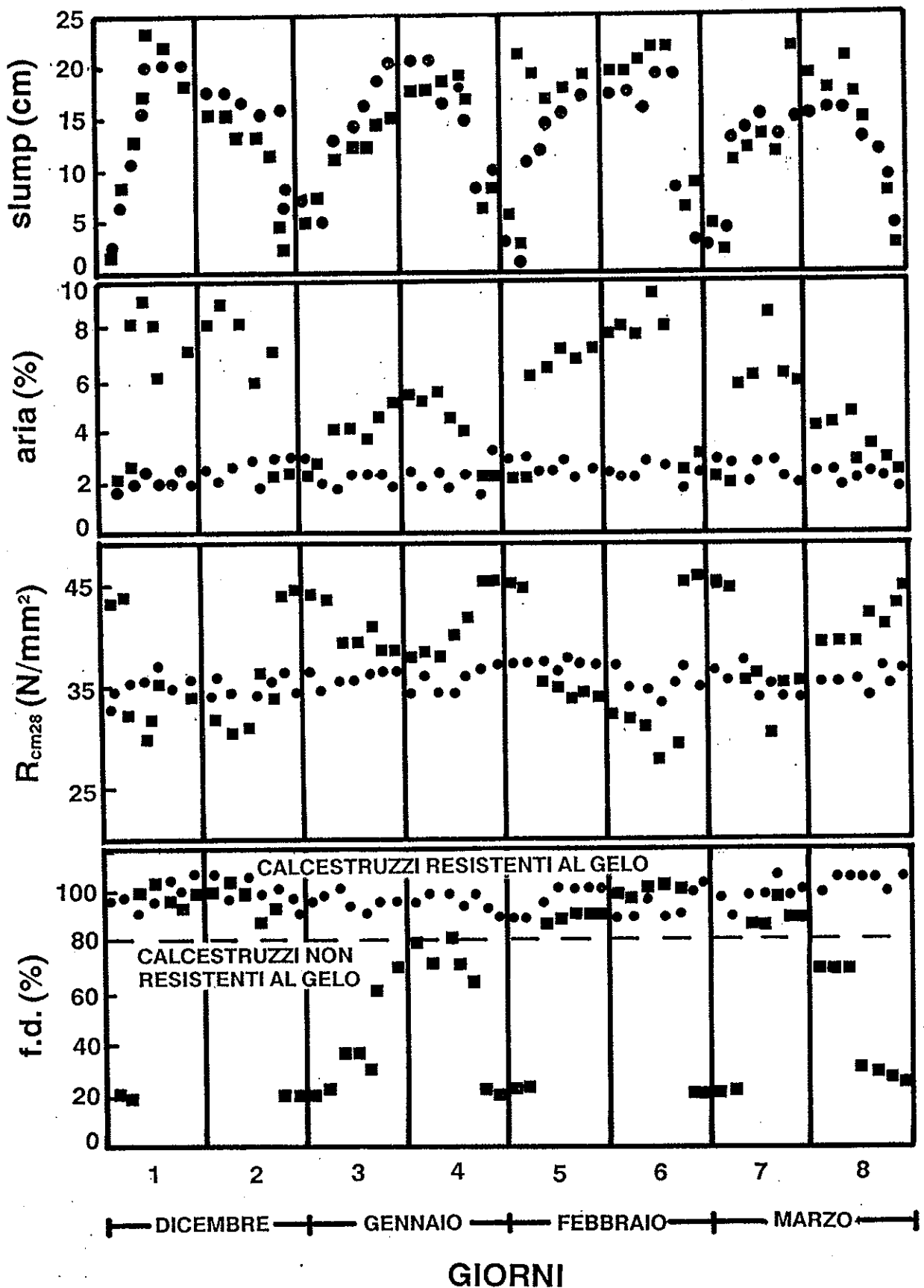


FIGURA 3

Lavorabilità, aria, resistenza a compressione e fattore di durabilità (f.d.) di 112 impasti di calcestruzzo con aerante (■) o con MSP (●) prodotti in 8 diversi giorni nel periodo invernale

Per quanto attiene alle prove di resistenza ai cicli di gelo-disgelo condotte con la procedura ASTM si deve rilevare che a seguito dell'estrema variabilità del volume di aria stabilizzato con gli additivi aeranti, anche il valore del fattore di durabilità è risultato estremamente variabile da un minimo del 19% ad un massimo del 103%.

In particolare, tenendo presente che il calcestruzzo viene definito resistente al gelo allorché il fattore di durabilità (*f.d.*) risulta maggiore di 80, si può notare che 30 impasti su 56 realizzati con l'aerante (più del 50% quindi) non sono resistenti al gelo. Inoltre, i calcestruzzi a consistenza asciutta con aerante risultano nella totalità non resistenti al gelo. Al contrario, i conglomerati confezionati con MSP, indipendentemente dalla lavorabilità e dai giorni in cui sono stati prodotti, risultano tutti resistenti al gelo.

Dalle prove effettuate emerge, quindi, che i risultati ottenuti con l'additivo aerante sono deludenti. Occorre, però, precisare che nelle prove non è stato fatto intenzionalmente alcun tentativo di modulare il dosaggio di additivo aerante (come del resto è stato fatto anche con le microsfere cave) per mantenere il volume dell'aria entro i limiti richiesti per produrre calcestruzzi resistenti al gelo.

3. CONCLUSIONI

Dall'analisi delle caratteristiche reologiche, meccaniche e fisiche di 112 impasti di calcestruzzo confezionati in centrale di betonaggio nell'arco di 4 mesi impiegando additivo aerante o microsfere cave in plastica è emerso che:

- l'impiego dell'additivo aerante determina un volume d'aria nell'impasto che si discosta notevolmente dal valore nominale desiderato del 6%: il volume d'aria oscilla da un minimo dell'1.9% ad un massimo del 9%;
- a seguito dell'estrema variabilità del volume d'aria stabilizzato dall'additivo aerante anche il valore della resistenza meccanica a compressione media risulta significativamente diverso dal valore nominale di 35 N/mm². In particolare sono stati registrati valori minimi di 27 N/mm² e massimi di 45 N/mm²;
- l'impiego delle microsfere cave consente di confezionare conglomerati di prestazioni meccaniche medie sostanzialmente rispondenti al valore nominale prefissato di 35 N/mm²: sono stati registrati valori minimi di 32 N/mm² e massimi di 37 N/mm²;
- l'impiego dell'additivo aerante non garantisce la resistenza al gelo: più del 50% degli impasti analizzati sono risultati gelivi con un fattore di durabilità inferiore ad 80. In particolare, tutti i calcestruzzi di consistenza S1 ed S2 sono risultati non resistenti al gelo;
- tutti i calcestruzzi confezionati con MSP sono risultati non gelivi con un fattore di durabilità maggiore di 80.

Ovviamente con gli additivi aeranti un risultato decisamente migliore sarebbe stato ottenuto se, anziché tenere fisso il dosaggio di additivo, se ne fosse modulata l'aggiunta in vista dell'ottenimento di un determinato volume d'aria necessario per rendere il calcestruzzo resistente al gelo. D'altra parte, però, questa operazione richiede in pratica un notevole dispendio di risorse e di tempo per il controllo che, invece, non è richiesto se si impiegano le microsfere cave.

RIFERIMENTI

- (1) D. Whiting, D. Stark, "*Control of air content in concrete*", Appendix F, State of the Art, Rep. nat. n. Coop. High. Res. Prog. Rep. N° 258 (1983).
- (2) J.E. Backstrom, R.W. Burrows, R.C. Mielenz, V.E. Wolkodoff, "*Origin, evolution and effects of the air void system in concrete. Part 3 - Influence of water cement ratio and compaction*", J. ACI, Pro. 55, 359-375 (1958).
- (3) M. Collepardi, L. Coppola, "*Materiali innovativi per malte e calcestruzzi speciali*", pg 2.16-2.18, Enco, Spresiano (1991).
- (4) T.C. Powers, "*The properties of fresh concrete*", John Wiley e Sons Ltd, New York (1968).
- (5) N.R. Greening, "*Some causes for variation in required amount of air entraining agent in portland cement mortars*", J.P.C.A. Res. Dev. Labs. 9, N° 2, 22 (1967).
- (6) E.W. Scripture, F.J. Litwinowicz, "*Effect of mixing Time, Size of batch and brand of cement on air entrainment*", Proc. ACI 45, 653 (1949).
- (7) H. Sommer, "*Ein neues verfahren zur erzielung der frost. tansalz - Bestandigkeit des betons. Zement und beton*", 4, 124 (1977).
- (8) M. Collepardi, L. Coppola, "*Additivi per calcestruzzo*", Cap. VII, Ed. Enco (1994).