

IL CONTRIBUTO DEI MODERNI VISCOSIMETRI NELLA MESSA A PUNTO DEL MIX-DESIGN DEGLI SCC: UN ESEMPIO APPLICATIVO NELLA PREFABBRICAZIONE

SALVATORE TAVANO,
Addiment italia srl, Medolago (Bg)
CATALDO MATTEO CORCELLA,
Addiment Italia srl, Medolago (Bg)
ELISA ALBIERO,
Addiment Italia srl, Medolago (Bg)

SUMMARY

This paper describes a new approach to SCC mix design based on a preliminary phase during which the appropriate PCE-superplasticizer is chosen by means of rheological tests on self-compacting mortars by using a rotational viscosimeter (Viskomat NT). Different PCE-superplasticizers could produce SCC with different rheological behaviour. The choice of the correct superplasticizers is therefore very important to achieve the target workability in terms of plastic viscosity and yield stress when any other factor (water/powder ratio, cement type, nature and amount of filler and aggregate) is constant. By using the proposed approach, the mix design is optimized as a function of the raw material availability and user's demand. The applicability of the method has been successfully verified for the production of thin bent-tile elements. The rheological requirements for the SCC were high flowability (low yield stress) and a moderate plastic viscosity.

1. INTRODUZIONE

La principale caratteristica del calcestruzzo autocompattante è quella di compattarsi per effetto della sola forza di gravità, senza cioè l'ausilio di alcuna forza esterna.

I ben noti vantaggi derivanti dall'impiego del calcestruzzo autocompattante sono il risultato delle sue particolari proprietà di deformabilità e stabilità. Dal momento della sua prima comparsa a partire dal 1988 in Giappone e in Canada, molti sono stati i progressi nelle conoscenze delle proprietà dell'SCC sia allo stato fresco che a quello indurito. Nonostante i progressi tecnologici in questo campo però, la valutazione delle proprietà

di flusso del calcestruzzo autocompattante sono ancora affidate principalmente a prove empiriche. Le ragioni sono essenzialmente dovute al fatto che misurazioni più "accurate" su calcestruzzo, quali quelle reologiche tramite opportuni viscosimetri, sono piuttosto elaborate e richiedono costose strumentazioni in rapporto ai comuni strumenti per la valutazione quali la tavola per lo slump-flow e l'imbuto a V per il V-Funnel test. Per questo motivo negli ultimi anni si fa spesso ricorso a procedure che mettono in relazione le proprietà di flusso del calcestruzzo con quelle di malte autocompattanti equivalenti analizzate mediante viscosimetri. [01], [02], [03]. Con queste nuove strumentazioni, figura 1, è possibile evidenziare meglio il contributo dell'additivo sulle proprietà del calcestruzzo allo stato fresco, fattore spesso trascurato. Con l'avvento dei superfluidificanti di nuova generazione a base di polycarbossilati eteri (PCE, detti anche "acrilici") infatti, sono entrati sul mercato una grande varietà di prodotti strutturalmente e/o chimicamente anche molto diversi, in grado di conferire agli impasti differenti proprietà reologiche.



Figura 1. viscosimetro per paste/malte, viskomat NT

2. REOLOGIA DELL'SCC

La reologia è la scienza che studia il flusso e la deformazione di materiali e per questo è del tutto appropriata per descrivere la lavorabilità e mobilità dei sistemi cementizi allo stato fresco.

Per un fluido Newtoniano esiste una proporzionalità tra sforzo tangenziale applicato e velocità di deformazione (1), ne deriva che anche sotto uno sforzo bassissimo il materiale fluisce.

Per questo tipo di fluidi la costante η , detta viscosità (o coefficiente di viscosità), dipende solo dalle variabili termodinamiche temperatura, pressione e concentrazione. Essa è perciò una costante che caratterizza il materiale. Esempi di

sostanze newtoniane sono l'acqua, gli oli, sospensioni molto diluite, ecc.

$$\tau = \eta D \quad (1)$$

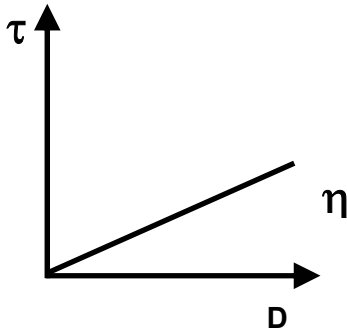


Figura 2. curva di flusso di un fluido Newtoniano.

In un diagramma sforzo applicato τ velocità di deformazione D , la rappresentazione grafica (definita curva di flusso) di un fluido Newtoniano è una retta passante per l'origine.

Il calcestruzzo autocompattante, così come tutti i sistemi cementizi allo stato fresco, è però un fluido non-Newtoniano. Per questo materiale la viscosità non è più una costante, ma una funzione della velocità di deformazione D (o dello sforzo applicato τ) e del tempo (tissotropia). Tra i modelli matematici proposti per descrivere il comportamento dei calcestruzzi e malte autocompattanti quello più utilizzato, per la sua semplicità e significato intuitivo dei parametri, è quello di Bingham (2).

$$\tau = \eta_{pl} D + \tau_0 \quad (2)$$

Dove τ_0 rappresenta la soglia (sforzo limite) che è necessario superare affinché il materiale inizi a scorrere (intercetta all'origine), e η_{pl} , detta viscosità plastica, rappresenta la resistenza opposta dal materiale all'aumento di velocità (pendenza della curva), figura 3.

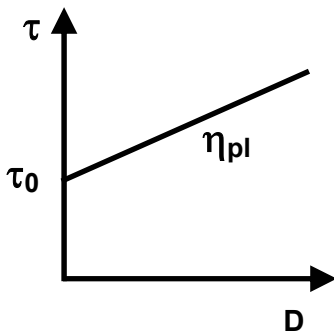


Figura 3. curva di flusso di un fluido di Bingham.

Con l'aiuto dei moderni viscosimetri è possibile costruire curve di flusso dalle quali estrapolare parametri relazionabili alla soglia di scorrimento e alla viscosità plastica, rispettivamente G e H .

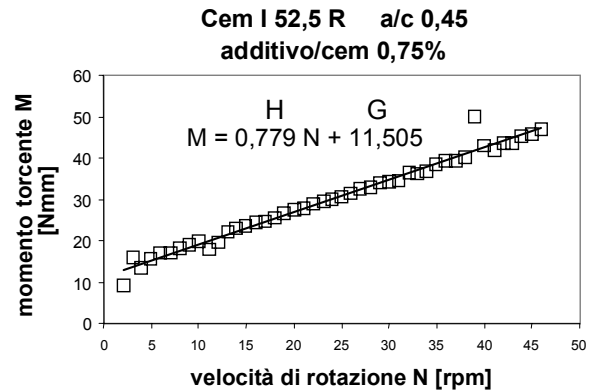


Figura 4. esempio di curva di flusso sperimentale di una malta SCC.

Attraverso questo tipo di rappresentazioni si possono evidenziare le modificazioni delle proprietà di flusso al variare delle componenti del sistema.

Da un punto di vista reologico il calcestruzzo SCC differisce da un calcestruzzo tradizionale super-fluido per i bassissimi valori di soglia di scorrimento, τ_0 e per i valori di viscosità plastica η_{pl} generalmente più alti, figura 5, [04]. In un SCC è la componente tangenziale della forza di gravità che permette al calcestruzzo di fluire, quindi l'SCC non fluirà fintanto che tale componente tangenziale non supererà il valore di soglia di scorrimento.

Un valore di τ_0 basso sarà quindi necessario per assicurare un'alta deformabilità del calcestruzzo e di conseguenza una buona autocompattazione anche con pendenze minime.

Di fondamentale importanza è anche un valore appropriato di η_{pl} : un valore troppo elevato comporterebbe una resistenza troppo elevata al movimento con il risultato di un flusso estremamente lento che non porta alcun vantaggio all'autocompattazione, di contro un valore troppo basso aumenterebbe il rischio di segregazione dinamica (separazione degli aggregati più grossi durante il flusso); la viscosità plastica inoltre fornisce una indicazione estremamente utile ai fini del pompaggio (bassi valori di viscosità plastica si traducono in minori pressioni esercitate dalla pompa).

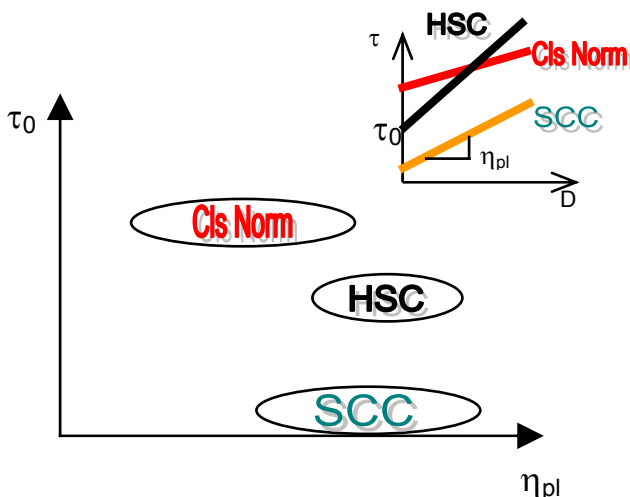


Figura 5. valori relativi di soglia di scorrimento viscosità plastica per un calcestruzzo superfluido (S5), un calcestruzzo ad alte resistenze e un SCC [4].

E' ormai noto quanto fondamentale sia per il confezionamento di un impasto SCC il proporzionamento dei componenti. Fattori quali il quantitativo totale di polveri, il rapporto volumetrico pasta/aggregato, la natura dell'aggregato, il tipo di filler impiegato, sono decisivi nel determinare le caratteristiche reologiche dell'impasto, figura 6, [5].

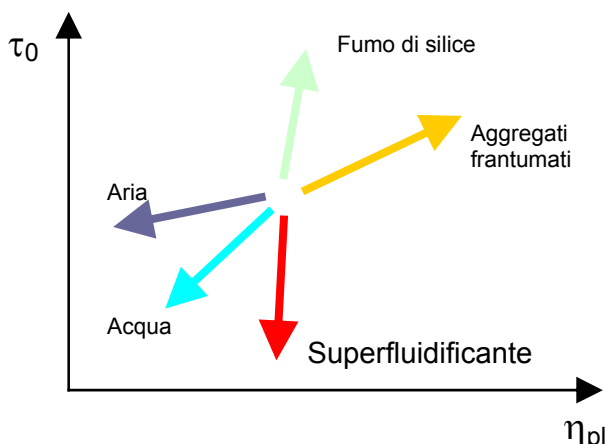


Figura 6. influenza dei diversi componenti sui valori di τ_0 e η_{pl} .

Nel calcestruzzo autocompattante quindi, così come nel calcestruzzo tradizionale, è possibile, agendo sulla scelta dei componenti e sul loro proporzionamento esaltare alcune proprietà di flusso in relazione al tipo di applicazione [06].

I valori di soglia di scorrimento e viscosità plastica possono essere correlati con i valori di slump flow e V-funnel. In base a lavori condotti da numerosi ricercatori sia in malta che direttamente in calcestruzzo, si può concludere che esiste una discreta correlazione tra viscosità plastica e V-

Funnel; la correlazione tra soglia e spandimento è invece più incerta. Questo sembra essere dovuto al fatto che nel determinare il valore di spandimento non è trascurabile il contributo della viscosità plastica [07], [08], [09], [02], [03].

Come si è già detto, la caratteristica fondamentale dell'SCC è l'elevata fluidità; è però opportuno sottolineare che sebbene un calcestruzzo possa essere definito SCC secondo la norma [UNI 11040], non è affatto detto che questo soddisfi a pieno le caratteristiche di scorrevolezza ed omogeneità in tutte le situazioni applicative (getti orizzontali piuttosto che verticali, pompaggio dal basso ecc.); la reologia dell'SCC deve per così dire essere progettata in funzione della geometria della cassaforma e della disposizione e densità dell'armatura.

3. IL RUOLO DELL'ADDITIVO

L'uso di sostanze organiche nel calcestruzzo per impartire una maggiore fluidità è conosciuto fin dagli anni '30. Polimeri di sintesi come il naftalen-solfonato e la melammina solfonata, prodotti a partire dagli anni settanta, hanno costituito un notevole passo avanti rispetto alle primitive sostanze di inizio secolo, potendo raggiungere una riduzione del rapporto a/c del 15-20%. Negli anni '90 la svolta alla fluidità del calcestruzzo viene impartita dai nuovi polimeri a base di policarbossilati eteri che oltre ad avere una maggiore capacità di riduzione d'acqua, conferiscono al calcestruzzo un più lungo periodo di mantenimento della lavorabilità senza effetti secondari di ritardo di presa.

L'interpretazione generale del funzionamento dei superfluidificanti risiede nella capacità di impedire la flocculazione dei granuli di cemento in corso di idratazione (che avviene per: forze VDW, legami tra gli idrati, elettrostatica tra particelle di carica opposta). Tra le ipotesi proposte per spiegare come questa deflocculazione avvenga le più citate in letteratura sono la repulsione di tipo elettrostatico e quella di tipo sterico; con un diverso peso tra gli additivi PCE e i tradizionali polisolfonati. Mentre per i primi infatti è più importante l'effetto sterico, grazie alla presenza delle catene laterali idrofile, per i secondi è più importante l'effetto elettrostatico. E' a questa differenza nel meccanismo di funzionamento che si deve il notevole passo avanti nella tecnologia degli additivi.

3.1 LA VARIABILITÀ CHIMICA DELL'ADDITIVO: UN AIUTO AL MIX-DESIGN

Una caratteristica molto importante degli additivi PCE risiede inoltre nella loro ampia

variabilità strutturale e/o chimica rispetto ai tradizionali additivi polisolfonati. I polimeri a base di PNS sul mercato sono tutti pressoché simili, mentre la struttura dei policarbossilati eteri è più che mai articolata, figura 7. La capacità di dispersione da parte degli additivi acrilici risiede nella loro attenta progettazione che garantisce una bilanciata distribuzione di cariche negative nella catena principale (gruppi carbossilici) e di catene laterali di natura idrofila (polieteri).

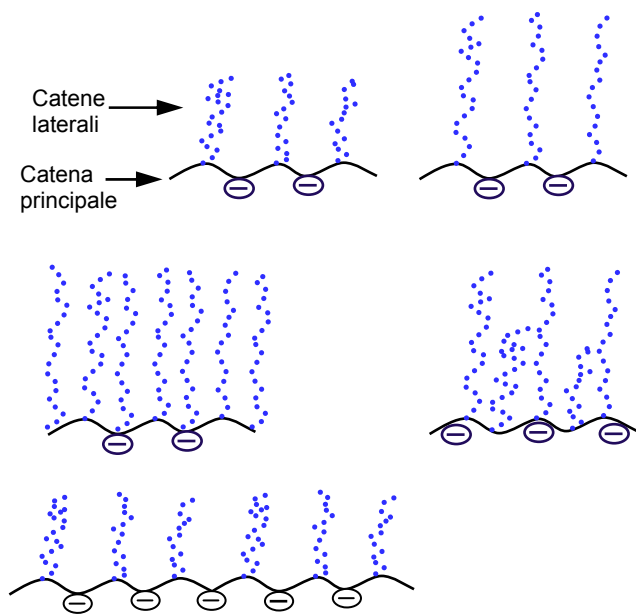


Figura 7. rappresentazione schematica della variabilità strutturale e chimica degli additivi a base di PCE.

Solo dopo l'avvento di questa nuova generazione di superfluidificanti è stato possibile progettare un buon calcestruzzo SCC. Infatti miscele con elevato contenuto in fini, per essere molto fluide e lavorabili nel tempo con bassi rapporti acqua/polveri necessitano di un sistema disperdente particolarmente efficace. I policarbossilati eteri, grazie all'elevato potere disperdente nei confronti dei granuli di cemento e delle particelle di materiali fini, rispondono perfettamente a tali requisiti.

L'ampia variabilità strutturale e chimica di questi polimeri, che si traduce nella presenza sul mercato di una vasta gamma di prodotti, può essere un valido aiuto nella messa a punto del mix-design dei calcestruzzi autocompattanti.

Nella figura 6 è messo in evidenza come il principale effetto dell'aggiunta di additivo superfluidificante sia quello di abbassare la soglia di scorrimento, altri sono i fattori che controllano la viscosità plastica il più importate dei quali è sicuramente il rapporto acqua/polveri. Nonostante

questo, il peso della scelta di un tipo particolare di additivo acrilico non è del tutto trascurabile.

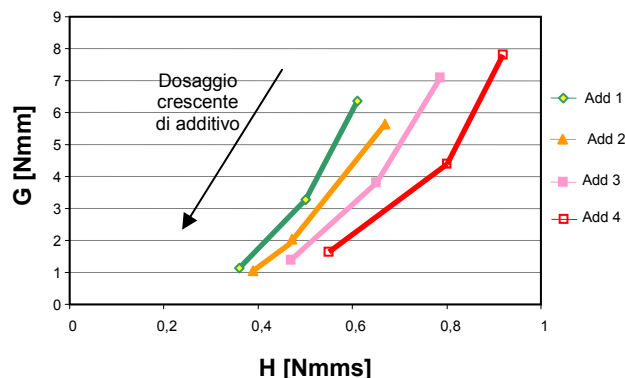


Figura 8. pattern reologico dei diversi additivi. Cemento I 52,5 R, rapporto di a/c costante, dosaggio di additivo variabile.

Nella figura sono riportati i dati ottenuti analizzando mediante il viscosimetro, una malta SCC prodotta con diversi additivi della linea Compactcrete caratterizzati da una differente struttura di base. Ciascun punto è ottenuto dai valori di G e H ricavati dalle curve di flusso per dosaggi crescenti di additivo. Il rapporto acqua cemento è costante per tutte le prove. La composizione della malta SCC è stata studiata in modo da avvicinarsi alla composizione della malta idealmente ottenuta eliminando la frazione superiore ai 2 mm da una comune ricetta SCC per prefabbricazione. Come è possibile osservare a parità di "soglia di scorrimento" G, conseguita attraverso variazioni del dosaggio di additivo, i diversi additivi conferiscono agli impasti differenti valori di "viscosità plastica" H. Cambiando tipo di cemento si è inoltre osservato che la posizione relativa delle curve rimane grossomodo invariata. Tali differenze quindi sono relazionabili alla struttura del polimero, in particolare alla lunghezza della catena principale nonché alla lunghezza delle catene laterali, come evidenziato da diversi autori [10] [11]. Di seguito sono riportati i risultati di prove condotte in calcestruzzo la cui composizione è indicata in tabella 1. Il dosaggio di additivo è stato aggiustato per avere uno stesso valore di spandimento. Come è possibile osservare nella tabella 2, la maggiore viscosità plastica conferita dal Add. 4 si esplica in valori di svuotamento del V-funnel più alti se comparati a quelli ottenuti con l'Add. 1, confermando, se pur attraverso prove empiriche, quanto osservato su malta con il viscosimetro.

Componenti	kg/m ³
Cem I 52,5 R	440
Filler CaCO ₃	90
Acqua	190
Sabbia	900
Ghiaino	820

Tabella 1. composizione calcestruzzo SCC

Additivo	Slump flow	V-funnel
Add. 4	690 mm	11 s
Add. 1	690 mm	8 s

Tabella 2. influenza del tipo di additivo sulla reologia del calcestruzzo.

Da quanto detto finora, risulta chiaro che considerare il superfluidificante come quell'ingrediente la cui unica funzione è quella di conferire all'impasto una determinata lavorabilità, normalmente valutata mediante lo spandimento su tavola, è quantomeno riduttivo. La sua influenza sulla reologia dell'impasto deve essere quindi opportunamente valutata.

4. ESEMPIO APPLICATIVO

Questo tipo di approccio è stato applicato con successo, nella messa a punto e l'ottimizzazione della ricetta di un calcestruzzo autocompattante per la realizzazione di tegoli di copertura prefabbricati.

Le caratteristiche di questi elementi sono (figure 9, 10, 11):

- forma alare;
- spessori molto sottili (pari a 11, 7 e 5 cm)
- elevata densità di armature
- intradosso a vista con una finitura liscia da controcassero metallico
- resistenza a compressione minima a 16 ore pari a 30 N/mm²
- Rck 50

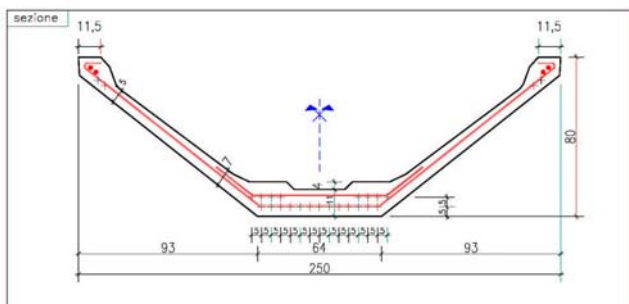


Figura 9. Sezione tipo del tegolo.



Figura 10. Disposizione delle armature.



Figura 11: Fase di apertura del controcassero.

Le difficoltà nella realizzazione di questa struttura sono principalmente legate alla modalità di messa in opera che prevede il getto da un'ala e il successivo riempimento del cassero per risalita. In conseguenza le caratteristiche reologiche del calcestruzzo autocompattante devono essere tali da consentire il riempimento completo ed omogeneo del cassero.

Esperienze Addiment hanno evidenziato che questo risultato è raggiungibile nel momento in cui il calcestruzzo è caratterizzato da modesti valori di viscosità plastica.

Nella pratica comune (figura 6) questo risultato può essere conseguito o con la scelta di un alto rapporto acqua/polveri (pari a circa 1), o con l'utilizzo di aggregati tondi in luogo dei frantumati o con l'introduzione di aria o infine riducendo quanto possibile il quantitativo di filler.

Nel caso specifico però i seguenti fattori:

- necessità del cliente di non eccedere con il quantitativo di cemento e quindi di acqua al metro cubo (Rck 55),
- disponibilità di soli aggregati frantumati,
- impossibilità di introdurre aria per non pregiudicare le resistenze meccaniche,
- impossibilità di ridurre il filler oltre i 145 kg al metro cubo per non generare segregazione statica,

avrebbero contribuito a produrre un calcestruzzo con elevata viscosità plastica. La valutazione dell'influenza dell'additivo sulla reologia dell'impasto è risultata, quindi, di grande importanza.

Facendo riferimento alla figura 8, tra gli additivi della linea Compactcrete i più indicati allo scopo erano quindi l'Add 1 o l'Add 2 i quali avrebbero contribuito a tenere bassi valori di viscosità plastica.

A seguito di prove di laboratorio volte a verificare la compatibilità cemento-additivo, l'additivo prescelto è stato l'Add2.

Di seguito è riportata la ricetta impiegata (tabella3) e i risultati di verifica ottenuti in cantiere (tabella 4). Come è possibile notare nonostante il basso valore del rapporto a/p, il valore di svuotamento al V-funnel è relativamente basso.

Componenti	
Cemento II/A-LL 42,5 R	360 kg/m ³
Filler calcareo	145 kg/m ³
Sabbia 0-5	930 kg/m ³
Pietrisco 6-16	810 kg/m ³
Acqua	173 kg/m ³
Additivo 2: Compactcrete 39/P	6,6 kg/m ³
A/P in vol.	0,86
A/C	0,48
Q.tà polveri	598 kg/m ³

Tabella 3. Mix-design del calcestruzzo impiegato.

Prove di verifica	
Slump flow	700 mm
T ₅₀	3 sec.
V-funnel	8 sec.
L-box	0,95

Tabella 4. caratteristiche allo stato fresco.

	N/mm ² con vapore	N/mm ² t=20°
16 ore	33	24
1 giorno	37	30
7 giorni	42	45
28 giorni	55	60

Tabella 5. resistenze meccaniche medie a compressione con stagionatura a vapore e a 20 °C



Figura 12. Elemento finito.



Figura 13. Vista della superficie inferiore dell'ala.

CONCLUSIONI

L'evoluzione del calcestruzzo ed il suo trasformarsi nel corso degli anni da materiale povero a materiale specialistico, tecnologicamente sempre più avanzato, comporta che anche il suo studio e la sua caratterizzazione siano più approfondite. La caratteristica fondamentale dell'SCC, l'elevata fluidità, deve essere definita con maggior rigore. Terminologie come fluido, rigido, scorrevole, viscoso, ecc. anche se comunemente utilizzate dagli operatori del settore, risultano essere inadeguate in quanto incomplete e del tutto soggettive. L'approccio più corretto quindi, risulta essere quello reologico mediante l'impiego di viscosimetri rotazionali. Per le particolari proprietà di flusso di questi calcestruzzi o degli equivalenti sistemi semplificati (malte autocompattanti), l'impiego dei moderni viscosimetri ha permesso di valutare le differenze sulle proprietà di flusso indotte da un componente

quantitativamente minore ma importante quale l'additivo.

L'influenza di questo componente sulla viscosità plastica dell'impasto, sebbene meno importante rispetto a parametri quali: rapporto acqua/polveri, tipo di cemento, natura di filler e di aggregato, gioca spesso un ruolo non trascurabile. La scelta del tipo di additivo dovrebbe in particolare essere presa in considerazione in quelle situazioni in cui è limitato l'intervento sui suddetti parametri. Nella realtà infatti il ruolo dell'additivo è ancora più importante di quanto possa apparire. Ciò perché i parametri quali il tipo di cemento, la natura del filler e dell'aggregato sono molto spesso, per ragioni tecnico-economiche, delle costanti che l'utente non desidera cambiare.

In questo viene in aiuto l'ampia variabilità chimica e strutturale dei PCE; la vasta gamma di prodotti, risolve anche un problema non troppo infrequente quando si lavora con gli additivi chimici: la compatibilità cemento/additivo [12]. Un'ampia gamma di prodotti garantisce la realizzazione di un SCC anche in situazioni, da un punto di vista chimico, particolarmente difficili.

E' stato mostrato un esempio nella prefabbricazione in cui l'ottenimento di valori moderati di viscosità plastica, particolarmente indicati per questo tipo di struttura, è stato possibile grazie ad una scelta oculata dell'additivo.

BIBLIOGRAFIA

- [01] **L. NACKBAUR, D. KAPLAN, G. MARCHESE:** "Extension of concrete equivalent mortar (CEM) method to Self-Compacting Concrete", Seventh CANMET/ACI, pp. 333-3346, Berlin 2003.
- [02] **A. F. GHEZAL, K. H. KHAYAT:** "Pseudoplastic and thixotropic properties of SCC equivalent mortar made with various admixtures", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 69-83.
- [03] **H.E. GRAM, P. PIIIPARINEM:** "Study of material properties of SCC by mortar test", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 305-310.
- [04] **O.H. WALLEVIK:** Course on rheology, The Iceland Building Research institute, 2000.
- [05] **J. CARLSWÄRD, M. EMBORG, S. UTSI, P. ÖBERG:** "Effect of constituents on the workability and rheology of SCC", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 143-153.
- [06] **J. WALRAVEN:** "Structural aspects of SCC", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 15-22.
- [07] **J. CARLSWÄRD, M. EMBORG, S. UTSI, P. ÖBERG:** "Relation between workability and rheological parameters", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 154-164.
- [08] **I. NIELSSON, O.H. WALLEVIK:** "Rheological evaluation of some empirical test methods –preliminary results–, 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 58-68.
- [09] **S.KAKUTA, T. BABA, Y. UEKI, T. NAGABUCHI:** "Rheological estimation of self-compacting grout mortar", Sixth CANMET/ACI, pp. 169-180, Nice 2000.
- [10] **S. GRZESZCYK, M. SUDOL:** "Effect of the chemical structure of superplasticizers upon the rheological properties of cement pastes", Seventh CANMET/ACI, pp. 363-377, Berlin 2003.
- [11] **E. SAKAI, D. ATARASHI, A. KAWAKAMI, M. DAIMON:** "Influence of molecular structure of comb-type superplasticizers and inorganic electrolytes on the dispersion mechanisms of limestone powder", Seventh CANMET/ACI, pp. 381-392, Berlin 2003.
- [12] **I. SHOBER, U. MÄDER:** "Compatibility of polycarboxylate superplasticizers with cements and cements blends", Seventh CANMET/ACI, pp. 453-468, Berlin 2003.

Contatti con gli autori:

Salvatore Tavano: stavano@addimentitalia.it
Cataldo Matteo Corcella: mcorcella@addimentitalia.it
Elisa Albiero: ealbiero@addimentitalia.it