

PARAMETRI UTILI ALLA VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÀ REOLOGICHE DEL CALCESTRUZZO SCC (SELF-COMPACTING CONCRETE) O CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE

SALVATORE TAVANO, *Addiment Italia*
ELISA ALBIERO, *Addiment Italia*

SUMMARY

Continuos improvements have been made in the construction techniques and in the materials used, particularly regarding concrete. This is due to the growth of structural and architectonic requirements, to the necessity to reduce execution times and construction costs, and to give durability to the manufacts. A Self-Compacting Concrete (SCC), if correctly designed and valued has got the appropriate rheological qualities to answer to these requirements.

To avoid the confusion between the SCC and superplasticized concrete (consistency S5 as UNI 9858), we would like to point out in this paper, the useful parameters for a correct comprehension and evaluation of the properties of Self-Compacting Concrete.

1. INTRODUZIONE

Come richiamato dalle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale emesse dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, il calcestruzzo ad alte prestazioni (HPC) deve possedere un'elevata resistenza meccanica a compressione ($C > 75$) e un rapporto $a/c \leq 0,35$. [01] In conseguenza sarà un calcestruzzo molto compatto, poco permeabile e contraddistinto da un'elevata durabilità. (fig. 1)

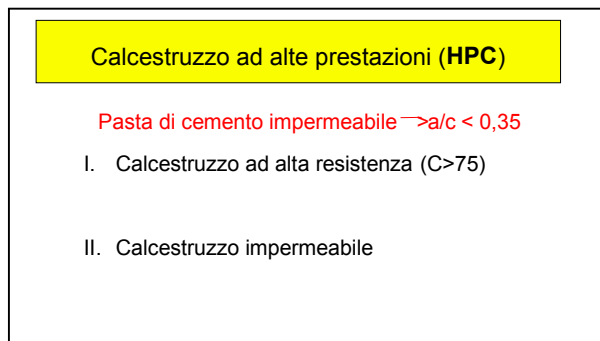


Figura 1. Calcestruzzo ad alte Prestazioni (HPC).

A questi indispensabili requisiti, negli ultimi anni se n'è aggiunto un altro di notevole importanza: l'estrema fluidità. (fig. 2)

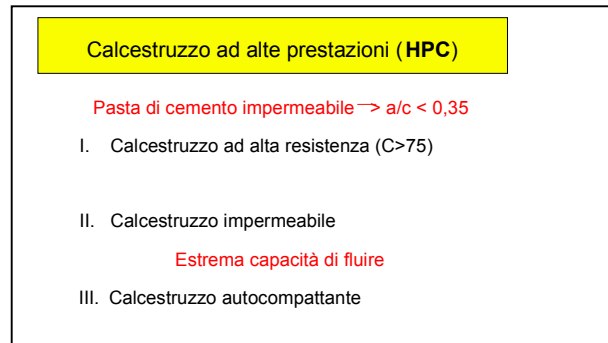


Figura 2. Calcestruzzo ad alte Prestazioni (HPC).

Il calcestruzzo che meglio risponde a tali caratteristiche e in particolare a quella dell'estrema capacità di fluire è il calcestruzzo autocompattante SCC.

Il Self Compacting Concrete (SCC) o calcestruzzo autocompattante è un nuovo conglomerato cementizio, originario del Giappone, molto interessante per le sue proprietà reologiche.

Esso è idoneo al riempimento delle casseforme anche in presenza di armature fitte, senza necessità di vibrazione e senza rischi di segregazione, né di essudazione d'acqua o formazione di boiaccia superficiale. (fig. 3)

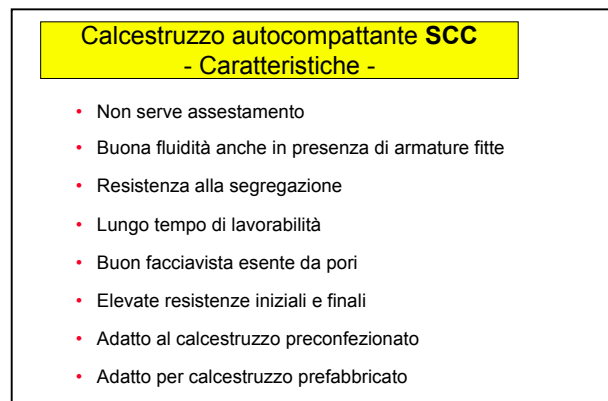


Figura 3. Caratteristiche di un calcestruzzo SCC.

Tali caratteristiche si raggiungono attraverso un'opportuna formulazione della miscela di calcestruzzo e con l'impiego di particolari superfluidificanti di ultima generazione della famiglia degli eteri policarbossilati.

L'impiego di questi additivi consente, se richiesta, una forte riduzione del rapporto acqua/cemento e allo stesso tempo lavorabilità elevatissime, (fig. 4) con buona resistenza alla segregazione. Il mantenimento di tali proprietà reologiche, inoltre, è garantito per un tempo

sufficientemente lungo, necessario al trasporto e alla posa anche in condizioni di temperature medio-alte (25°-27°).



Figura 4. Slump-flow di un calcestruzzo SCC, (elevato spandimento, assenza, sui bordi, di boiaccia e di acqua di essudazione).

Come già visto il calcestruzzo SCC, a fronte dei suoi costi elevati, è generalmente associato ai calcestruzzi HPC. Tuttavia, essendo la lavorabilità sua caratteristica peculiare, è adatto anche alla confezione di calcestruzzi di medie resistenze, con rapporto acqua/cemento comunque non superiore a 0,5.

2. APPARECCHIATURE E CRITERI DI VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÀ REOLOGICHE DEL CALCESTRUZZO SCC

Al fine di ottenere un calcestruzzo SCC è necessario, a fronte delle prestazioni richieste (sia allo stato fresco sia allo stato indurito) e delle caratteristiche delle materie prime disponibili, progettare in modo molto accurato il mix-design.

Una procedura di progetto per ottenere elevata fluidità e assenza di segregazione - due fra le più importanti proprietà del calcestruzzo SCC - è l'impiego combinato di additivi superfluidificanti ad alto potere disperdente (tipo gli eteri policarbossilati di nuova generazione) e di additivi stabilizzatori in grado di ridurre la tendenza alla segregazione (fig. 5 modo I). Un altro metodo (modo II) consiste nell'affiancare all'uso dei superfluidificanti l'incremento delle parti fini, intese sia come cemento, sia come aggiunte minerali idraulicamente attive (es. Cenere Volante) o inattive (es. farina di calcare).

In genere, per ottenere i migliori risultati, si adottano simultaneamente sia additivi chimici stabilizzatori, sia aggiunte contenute di parti fini (modo III).

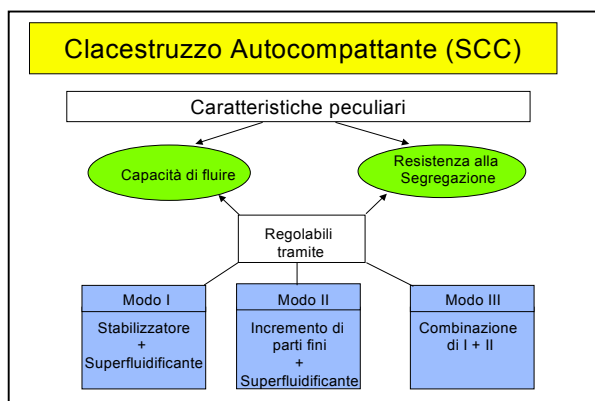


Figura 5. Modi per progettare il mix-design di un calcestruzzo SCC.

Secondo una procedura giapponese sviluppata dal Prof. H. Okamura [02] [03], per realizzare un mix-design corretto è necessario iniziare dallo studio della pasta di cemento, per poi passare a quello della malta, per giungere infine alla determinazione della composizione vera e propria del calcestruzzo. (fig. 6, 7)

In questo modo, dopo aver scelto il tipo di cemento e di filler, si determina il rapporto acqua/legante ottimale tramite prove di consistenza. Quindi si stabilisce il quantitativo di sabbia e di additivo superfluidificante, tramite prove di consistenza e del tempo di scorrimento. Infine si decidono il tipo e il diametro massimo degli aggregati (solitamente 16 mm) e il quantitativo necessario.

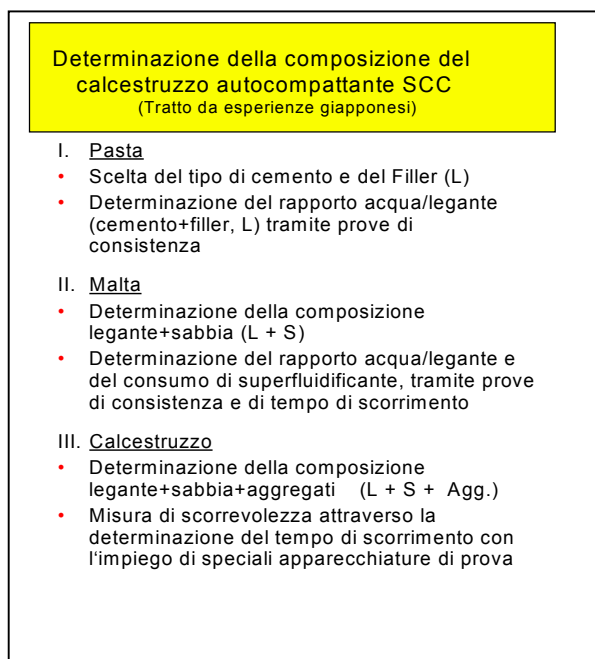


Figura 6. Studio della composizione di un calcestruzzo SCC.

Calcestruzzo autocompattante SCC - Esempio di mix-design (per 1 m ³) - modo II -		
Cemento:	350 kg	CEM II / B-S 42,5
Aggiunte:	210 kg	Cenere Volante
Aggregati:	660 kg	Ø 0 / 2 mm
	450 kg	Ø 2 / 8 mm
	450 kg	Ø 8 / 16 mm
Acqua:	180 kg	
Superfluidificante:	1,2 %	FM
Aria:	2 Vol.-%	
Resist. a Compres.:	9 N/mm ²	a 24 h
	64 N/mm ²	a 28 g

Figura 7. Esempio di mix-design (modo II).

Come già accennato le proprietà che maggiormente contraddistinguono il calcestruzzo SCC, sono quelle allo stato fresco quali fluidità, coesione, resistenza alla segregazione e al bleeding.

Per valutare tali caratteristiche reologiche in laboratorio e/o in cantiere e i parametri utili per identificare il calcestruzzo SCC, oltre alla consueta misura dello slump-flow con il cono di Abrams è necessario fare ulteriori prove con l'ausilio di alcune speciali apparecchiature di misura quali: il Box-Test [04] [05], il Kajima-Test e il V Funnel Test [02] [06] giapponesi, il Box Filling Test [06] e il Box-Test Svedese [07] [08].

In particolare vediamo i parametri richiesti per lo spandimento (slump-flow), l'autolivellamento (Box-Test) e la capacità di fluire (Kajima-Test).

Per valutare lo slump-flow, si appoggia il cono di Abrams su una piastra quadrata in acciaio inox, con lato non inferiore a 70 cm (preferibilmente 75 cm) e si riempie senza pestellare. (fig. 8, 9) Si alza, quindi, il cono e si misurano:

- il tempo necessario al calcestruzzo per raggiungere uno spandimento di 50 cm (T_{50})
- il diametro dello spandimento finale (Sf).

Il calcestruzzo SCC deve impiegare un tempo intorno ai 5 – 6 secondi per arrivare a 50 cm e avere un diametro finale pari a 70 ± 2 cm.

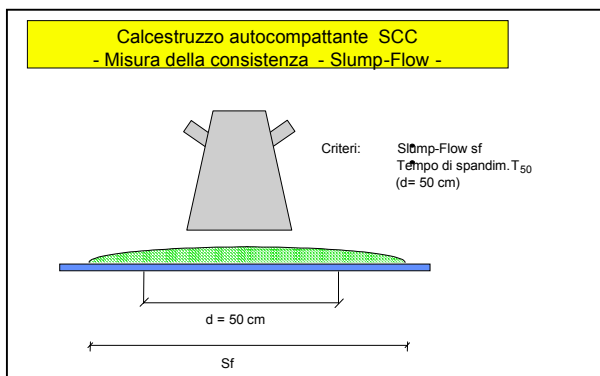


Figura 8. Schema dello slump-flow.

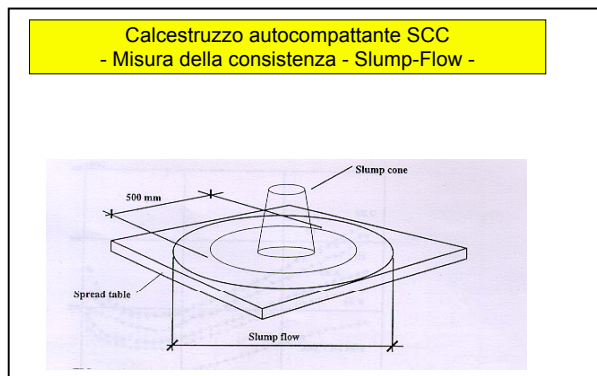


Figura 9. Piastra e cono per lo slump-flow.

La misura della tendenza all'autolivellamento del calcestruzzo può essere effettuata mediante un contenitore a L, denominato Box-Test. (fig. 10)

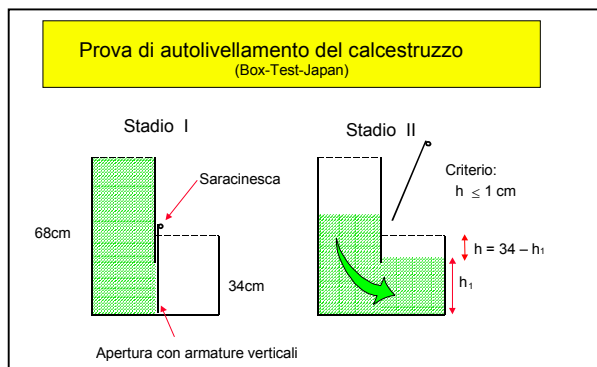


Figura 10. Schema del Box-Test giapponese.

La parte più alta del Box-Test è collegata a quella più bassa attraverso un'apertura regolata da una saracinesca e ingombrata da barre verticali, che simulano i ferri d'armatura. La prova consiste nel riempire completamente la parte più alta del contenitore con il calcestruzzo e nell'alzare successivamente la saracinesca. A fine prova si misura il tempo impiegato in secondi e l'altezza residua h, data dalla differenza fra l'altezza della parte bassa del contenitore (34 cm) e quella raggiunta dal calcestruzzo. Tale differenza deve essere ≤ 1 cm. (fig. 10)

Un altro strumento di prova utile per la valutazione della capacità di fluire del calcestruzzo, è il Kajima-Test. (fig. 11) Esso consiste in un parallelepipedo in plexiglass, contenente barre molto fitte. Il calcestruzzo è immesso nella parte sinistra dall'alto e scorre verso la parte opposta attraverso queste barre. A fine prova si misura l'altezza raggiunta nella parte destra e si calcola la media delle altezze rapportata all'altezza iniziale. Questo valore deve essere maggiore del 90%, corrispondente ad un delta fra le due altezze ≤ 6 cm. (fig. 12)

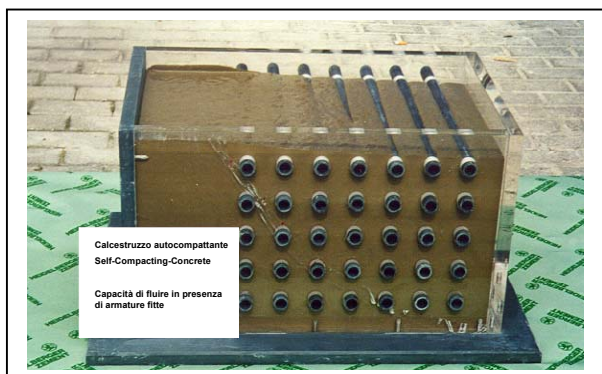


Figura 11. Kajima-Test.

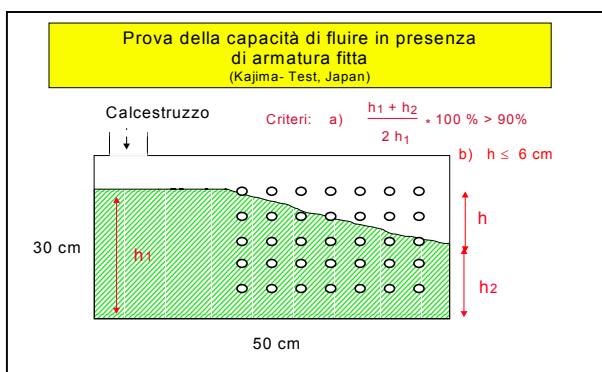


Figura 12. Schema del Kajima – Test

2.1 CONFRONTO FRA UN CALCESTRUZZO SCC E CALCESTRUZZI TRADIZIONALI

In riferimento a questi parametri è possibile distinguere il comportamento di un calcestruzzo autocompattante SCC rispetto a quello di un calcestruzzo superfluido (consistenza S5). (fig. 13)

Confronto fra le caratteristiche reologiche di: calcestruzzo superfluido, calcestruzzo autocompattante SCC e betoncino autolivellante per inghisaggi					
Prove	Cis superfluido (16 mm)		Cis autocompattante SCC (16 mm)		Betonc. autoliv. antiritiro (8 mm)
Spandimento in cm (DIN 1048)	statico	dinamico	statico	dinamico	-
	35	58	66	72	
Slump-Flow in cm	44		70		72
Autolivellamento	h= 19,5 cm		h= 0,3 cm		h= 0,3 cm
	t= 8 sec		t= 19 sec		t= 13 sec
Capacità di fluire	28 cm		4,5 cm		8 cm

Figura 13. Comportamento di un calcestruzzo SCC, di uno superfluido e di un betoncino autolivellante per inghisaggi.

La prova dello spandimento statico e dinamico (DIN 1048) indicata in fig. 13, prevede l'impiego di un cono metallico (altezza 200 ± 2 mm, diametro minore 130 ± 2 mm, diametro maggiore 200 ± 2 mm) e di una tavola piana quadrata (700 ± 2 mm di lato), rivestita con una lamiera in acciaio e ancorata ad un telaio rigido. Un lato della tavola è incernierato al telaio, mentre il lato opposto è munito, al centro, di una maniglia. In questo modo la tavola può essere alzata e abbassata liberamente.

La prova consiste nel posizionare il cono al centro della tavola e nell'introdurre e pestellare il calcestruzzo in due tempi consecutivi; dopodiché si solleva il cono e si misura il diametro raggiunto dal calcestruzzo (spandimento statico). In seguito a tale operazione si alza e si lascia cadere la tavola 15 volte misurando il diametro finale (spandimento dinamico). (DIN 1048, corrispondente alla norma UNI 8020, Metodo B).

Il calcestruzzo SCC in esempio, sottoposto a questa prova passa, con i 15 colpi, da un diametro di 66 cm (statico) ad uno di 72 cm (fig. 13), pari circa allo slump-flow ottenuto senza apporto di energia (70 cm). Ciò indica che l'energia impiegata nel caso del calcestruzzo SCC, non gioca un ruolo fondamentale, confermando che ogni operazione di vibrazione risulta superflua.

Il calcestruzzo superfluido viceversa, passa da uno spandimento di 35 cm (statico) ad uno di 58 cm dopo i 15 colpi, dimostrando la sua sensibilità all'energia di compattazione.

Il calcestruzzo SCC, inoltre, è in grado di mantenere i valori di slump-flow raggiunti, per un tempo decisamente maggiore (oltre 60 minuti) rispetto al calcestruzzo superfluido. (fig. 14)

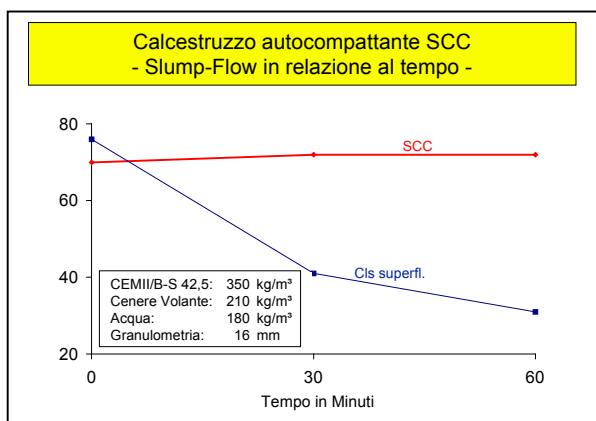


Figura 14. Perdita di lavorabilità nel tempo.

Nella prova del Box-Test, il valore (molto basso) dell'altezza residua h del calcestruzzo autocompattante, evidenzia l'elevata tendenza all'autolivellamento. (fig. 13)

Il tempo di scorrimento, doppio rispetto al calcestruzzo superfluido, dà un'idea del basso

valore della soglia di scorrimento del calcestruzzo SCC. Tale valore è legato al basso attrito fra le particelle, le quali sono in grado di scorrere senza apporto di energia.

Questa proprietà dimostra come il calcestruzzo SCC sia caratterizzato da uno scorrimento più lento, ma progressivo nel tempo (quindi maggiore) e da elevata deformabilità e viscosità. Ciò gli permette di diffondersi molto bene anche in presenza di armature fitte e gli conferisce una migliore resistenza alla segregazione e al bleeding.

Anche un betoncino autolivellante espansivo per inghisaggi, presenta qualità simili al calcestruzzo autocompattante, in particolare per quanto riguarda lo slump-flow e la capacità di autolivellamento. (fig. 13)

Nella prova del Kajima-Test però, il betoncino non soddisfa il criterio richiesto ($h \leq 6$ cm) e in quella del Box-Test impiega un tempo minore rispetto al calcestruzzo SCC. Il primo dato sta a significare che il betoncino autolivellante in presenza di armature fitte non è in grado di diffondersi quanto il calcestruzzo SCC e il secondo che ha un comportamento reologico tendenzialmente simile a quello di un calcestruzzo superfluido.

Il mix-design di un calcestruzzo SCC può contenere, in alternativa all'aggiunta minerale idraulicamente attiva come la cenere volante (fig. 7), anche farina di calcare. (fig. 15) Confrontando un calcestruzzo SCC di questo tipo con un calcestruzzo vibrato (fig. 16), a parità di rapporto acqua/cemento e di quantità di cemento impiegata al m^3 , si può verificare che la resistenza a compressione e a flessione a 28 giorni e il Modulo Elastico sono simili, ma con il vantaggio di una migliore omogeneità del getto.

Infine in relazione al maggiore ritiro plastico del calcestruzzo SCC (fig. 17), legato all'elevato contenuto di parti fini, le operazioni di curing devono essere più accurate rispetto al calcestruzzo vibrato. (fig. 16)

Confronto del mix-design in kg/m^3 : calcestruzzo autocompattante SCC e calcestruzzo vibrato		
Mix-design	Cls vibrato	SCC
Cemento CEM I-42,5	330	330
Farina di calcare	-	150
Acqua	182	175
Aggregati 0/2	545	822
Aggregati 2/8	725	413
Aggregati 8/16	545	413
Superfluidificante	-	8,5

Figura 15. Es. di mix-design per un calcestruzzo vibrato e un calcestruzzo SCC.

Confronto fra i risultati delle prove sul calcestruzzo indurito: calcestruzzo autocompattante SCC e calcestruzzo vibrato

Caratteristiche del calcestruzzo	Valori	Cls vibrato	SCC
Resistenza a compressione	2g	17,8	22,3
	7g	28,5	31,6
	28 g	39,0	39,5
Resistenza a flessione (28g)		4,6	4,4
Modulo elastico E		28150	28250
Ritiro igrometrico $\epsilon_s(90g)$	‰	-0,371	-0,414
Profond. di carbonatazione d_c (90g)	mm	6	5
Curing	-	Normale	Accurato

Figura 16. Prove sul calcestruzzo indurito.

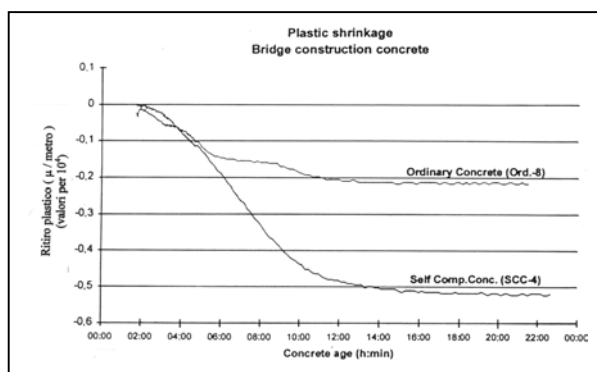


Figura 17. Ritiro plastico di un calcestruzzo tradizionale e di un calcestruzzo SCC confezionati con pari rapporto acqua/cemento ($RH = 50\%$, $T = 20$ °C). Grafico presentato dalla SCANCEM AB Annetorpsvägen S-Malmö, al convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.

3. CONCLUSIONI

In relazione a quanto finora detto, quindi, le qualità del calcestruzzo SCC si possono così riassumere:

- capacità di assestamento per peso proprio (assenza di vibrazione);
- elevata fluidità;
- maggiore omogeneità, che garantisce la perfetta corrispondenza fra provini cubici e calcestruzzo in opera;
- resistenze meccaniche inalterate anche a breve e dipendenti, come nei calcestruzzi tradizionali, dal rapporto acqua/cemento;
- tempi di presa non ritardati, nonostante il prolungato tempo di lavorabilità.

Tali caratteristiche comportano alcuni vantaggi nell'impiego del calcestruzzo SCC:

- qualità uniforme del calcestruzzo;
- messa in opera semplificata che non crea problemi anche laddove i casseri hanno forma complicata e la maglia d'armatura è molto fitta. [09] In questo modo eventuali rilievi o rientranze delle casseforme sono messe perfettamente in evidenza (effetto matrice);
- ottimo facciavista;
- migliore adesione e inglobamento dei ferri d'armatura;
- migliore rendimento della messa in opera giornaliera; [09]
- eliminazione del lavoro necessario alla compattazione (apparecchiature e personale);
- assenza di rumore;
- maggiore durabilità dell'opera nel suo complesso.

Accanto ai vantaggi si possono identificare anche degli svantaggi:

- elevati costi dei materiali (+20-25%); (es. calcestruzzo realizzato secondo il modo II) [10]
- ritiro plastico tendenzialmente maggiore;
- sensibilità maggiore del calcestruzzo alle variazioni delle materie prime e delle condizioni ambientali;
- maggiori controlli sia in stabilimento sia in cantiere;
- maggiore impegno nello studio del mix-design.

Il calcestruzzo SCC, grazie alla combinazione delle qualità e dei vantaggi visti, può essere impiegato in svariate applicazioni quali:

- calcestruzzi preconfezionati e prefabbricati;
- calcestruzzi facciavista e sagomati;
- opere di ripristino nell'edilizia;
- opere di ripristino nel genio civile;
- opere in zone sensibili ai rumori (es. ospedali);
- ponti, solette e pavimentazioni;
- costruzioni industriali;
- edifici alti;
- gallerie.

4. BIBLIOGRAFIA

- [01] **PRESIDENZA DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI, Servizio Tecnico Centrale:** "Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale", dicembre 1996.
- [02] **H. OKAMURA, M. OUCHI:** "Self-compacting concrete. Development, present use and future", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [03] **K. TAKADA, G. I. PELOVA, J. C. WALRAVEN:** "Influence of microfillers on proportioning of mortar in self-compacting concrete", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [04] **M. OUCHI, Y. EDAMATSU:** "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [05] **Y. EDAMATSU, N. NISHIDA, M. OUCHI:** "A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [06] **K. H. KHAYAT, Y. ROUSSEL:** "Testing and performance of fiber—reinforced self-consolidating concrete", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [07] **Ö. PETERSSON, P. BILLBERG:** "Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [08] **P. BILLBERG:** "Energy modified cement in SCC", dagli atti del convegno "Self-Compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium", Settembre 1999.
- [09] **F. JAKOB, K. HERMANN:** "Self-compacting concrete", TFB Bollettino del cemento, Gennaio 2000.
- [10] **J. AMBROISE, J. PÉRA:** "Proprietà del calcestruzzo autolivellante", iIC, n° 4/2000.