

Calcestruzzo leggero strutturale autocompattante (LS-SCC) prodotto con argilla espansa senza l'impiego di sabbia naturale

di Cataldo Matteo Corcella, Salvatore Tavano

Cataldo Matteo Corcella – Responsabile assistenza tecnica e ricercatore nel settore degli additivi per calcestruzzo - Addiment Italia S.r.l, Medolago (BG).

Salvatore Tavano, Direttore generale di Addiment Italia, Medolago (BG).

INTRODUZIONE

Il calcestruzzo leggero strutturale è apparso sul mercato dei materiali per edilizia negli anni '70 seguendo lo sviluppo tecnologico e produttivo dell'argilla espansa che, come noto, è un materiale espanso ottenuto dalla cottura di argille naturali all'interno di grandi forni rotanti a temperature superiori a 1000°C.

Ciò che caratterizza questo materiale, impiegabile come aggregato nei calcestruzzi, è la buona costanza qualitativa frutto dell'attenta selezione delle materie prime e del rigido controllo del processo di produzione.

I vantaggi di produrre un calcestruzzo leggero strutturale a densità 1600-1900 kg/mc rispetto ad uno ordinario sono numerosi, sia dal punto di vista ingegneristico che ambientale (1, 2).

Assai più recente invece è la comparsa del calcestruzzo autocompattante. Tale prodotto è caratterizzato da prestazioni, in termini di lavorabilità, eccezionali per non dire assolute poiché non richiede lavoro o energia per la sua messa in opera, ma ha prerogative intrinseche di autocompattazione e capacità di riempimento dei casseri sfruttando il solo peso proprio. La qualità dell'SCC dipende principalmente da un corretto dosaggio delle polveri comprensive di cemento, aggiunte minerali e passante a 0.125 mm proveniente dalle sabbie. Di conseguenza, quando il contributo di queste ultime è quantitativamente rilevante (es. sabbie di frantumazione, ormai sempre più frequenti), una loro variazione granulometrica può compromettere profondamente la robustezza e la stabilità degli impasti allo stato fresco.

Recentemente sono stati fatti diversi studi inerenti la combinazione di queste due tecnologie (6,7). Caratteristica comune di tutte queste sperimentazioni, è la presenza nel mix-design di questi calcestruzzi di un quantitativo rilevante di sabbia fine naturale.

La sabbia naturale è tipicamente aggiunta nel calcestruzzo leggero strutturale per controllarne la densità, ottenere elevate resistenze meccaniche e per compensare la scarsità di parti fini che tipicamente caratterizza l'argilla espansa.

Lo scopo della ricerca sperimentale oggetto della presente pubblicazione, è analizzare la possibilità di produrre un calcestruzzo leggero strutturale autocompattante caratterizzato dalla totale assenza di aggregati naturali di peso normale.

Una miscela di calcestruzzo autocompattante leggero senza sabbia naturale ha tre vantaggi principali: riduzione della variabilità della lavorabilità dovuta alle inevitabili oscillazioni nel contenuto di finissimi nella sabbia, specialmente se di frantumazione; soluzione al problema della diminuzione di disponibilità di sabbia naturale; incremento del rapporto resistenza/densità.

Il principale problema di questo tipo particolare di miscela, è quello di conferire la giusta coesione e scorrevolezza all'impasto evitando nel contempo il fenomeno della segregazione inversa dell'argilla espansa.

Esiste infatti una intrinseca caratteristica negativa nel concetto di SCC, messa formalmente in evidenza dalla relazione di Stokes (in base alla quale la velocità finale V_s di una particella in un mezzo fluido è direttamente proporzionale alla differenza di densità tra particella e fluido, direttamente proporzionale alla dimensione della particella e inversamente proporzionale alla viscosità del fluido), che riguarda la sensibile differenza di densità tra la pasta (normalmente il suo valore è intorno a 1.90-2.10 kg/l) e gli aggregati grossi (di densità 2.60-2.75 kg/l nel caso questi siano comuni e 1.25-1.67 kg/l nel caso siano argille espanse strutturali). Ciò fa sì che, se la viscosità della pasta legante a basse velocità di deformazione non ha valori ottimali, l'aggregato può sedimentare o galleggiare tanto più velocemente quanto più grandi sono le sue dimensioni (segregazione statica).

Fondamentale per la realizzazione di tale prodotto è quindi l'impiego di una particolare tipologia di argilla strutturale caratterizzata da elevate prestazioni meccaniche e D_{max} di soli 8 mm, unitamente ad una speciale combinazione di additivi chimici. Quest'ultima è composta da un agente aerante, un viscosizzante e un superfluidificante acrilico in grado di produrre una modificazione delle caratteristiche fisiche della pasta legante consistenti in una riduzione della sua densità, attraverso l'introduzione di un sistema stabilizzato di microbolle d'aria e un aumento della sua viscosità.

MATERIALI E METODI

Durante la sperimentazione di laboratorio sono state confezionate diverse miscele di prova utilizzando i seguenti materiali:

- Due diversi cementi CEM II/A-LL 42.5R denominati Cem A e Cem B, entrambi con densità di 3.00 kg/l.
- Filler calcareo caratterizzato da un passante del 100% a 0.100 mm e una densità di 2.70 kg/l.
- Argilla espansa strutturale sinterizzata 0.25/8 mm le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 1 e Figura 1.
- Superfluidificante acrilico con una densità di 1.1 kg/l.
- Stabilizzante in polvere composto da una miscela di aerante e viscosizzante

Al fine di avere un maggior controllo sulle proprietà del calcestruzzo, l'argilla espansa è stata pre-bagnata per 24 ore prima del suo impiego (3).

Per la caratterizzazione delle proprietà allo stato fresco del calcestruzzo si sono utilizzate le prove di Slump flow, V-funnel e L-box. Le ultime due sono state impiegate per la valutazione della tendenza alla segregazione. Tutte queste prove sono state condotte oltre che a tempo 0' anche dopo 30' e 60' per la valutazione del mantenimento della lavorabilità.

Le prove di resistenza meccanica a compressione sono state eseguite su provini cubici lato 150 mm, stagionati a 20°C e U.R. > 95%, a 1, 7 e 28 giorni.

Le miscele sono state preparate impiegando una comune mescolatrice a bicchiere da laboratorio seguendo la seguente procedura: introduzione dell'argilla espansa saturata insieme al cemento, il filler e al 75% dell'acqua di impasto. Dopo 10 minuti di mescolazione introduzione degli additivi insieme alla restante acqua. Mescolazione finale della durata di 5 minuti.

Al fine di simulare le reali condizioni di trasporto in autobetoniera, dopo la prima valutazione della lavorabilità a tempo 0', la miscela di calcestruzzo è stata mantenuta in continua agitazione all'interno della mescolatrice a bicchiere, appositamente modificata per tale scopo, ad una velocità di 3 giri al minuto. Appena prima dell'esecuzione delle prove di lavorabilità a 30' e 60', la miscela è stata mescolata ad alta velocità per 2 minuti.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Una volta misurata la densità dell'argilla espansa in condizioni di S.S.A. (1.6-1.65 kg/l), la composizione dell'agente stabilizzante (aerante+viscosizzante) è stata ottimizzata al fine di conferire un'adeguata viscosità alla pasta legante e ottenere una densità della stessa il più simile possibile a quella dell'argilla saturata (minimizzazione della velocità terminale V_s). Dopo diverse prove di laboratorio, si è trovato che una densità della pasta legante compresa tra 1.74-1.83 kg/l è in grado di conferire buona stabilità alla miscela allo stato fresco senza causare un eccessivo calo delle resistenze meccaniche allo stato indurito.

In Tabella 2 sono mostrate le composizioni delle diverse miscele di calcestruzzo testate. La quantità di acqua e additivi è rimasta costante in tutte le prove. Dopo aver messo a punto la miscela utilizzando il Cem A (miscela A, B, C), si è proceduto ad una sua verifica utilizzando il Cem B (miscela D). Quest'ultima ricetta è stata infine utilizzata per eseguire una prova di riempimento di una piccola cassaforma di legno in presenza di armatura metallica (miscela E).

Lavorabilità

In Tabella 3 e nelle Figura 2, 3 e 4 sono riportati i risultati delle prove di filling ability (Slump flow, V-funnel), passing ability e resistenza alla segregazione dinamica (L-box).

Come si vede, la miscela A mostra un ottimo comportamento a tempo 0', come indicato dai valori di Slump flow (780 mm) e V-funnel (6 s) oltre che dalla totale assenza di segregazione, confermata dal valore di L-Box (0.89) e dall'osservazione diretta. Dopo 60' però, nonostante il buon valore di Slump flow (670 mm), la prova all'L-Box è stata negativa (0.70) indicando un peggioramento del passing ability. L'osservazione visiva ha confermato la comparsa di un fenomeno di segregazione inversa. Al fine di risolvere tale problema, il contenuto di cemento è stato aumentato da 420 kg/m³ nella miscela A fino a 490 kg/m³ nella miscela C. A seguito di tale modifica la lavorabilità è migliorata protrandosi per oltre 60' senza alcun segno di segregazione, come dimostrato dal superamento del test dell'L-Box ($H_2/H_1 = 0.8$). Tali risultati sono stati infine confermati impiegando un diverso cemento (miscela D e E).

Al fine di simulare il comportamento di questo calcestruzzo in una reale situazione di getto, con la miscela E è stata effettuata una prova di riempimento di una cassaforma in legno di 2.5 m di lunghezza, 1.1 m di altezza, 10 cm di profondità in presenza di una armatura di rinforzo. Come mostrato nella Figura 5, la prova ha avuto esito positivo non essendo visibile alcun segno di segregazione o nidi di ghiaia.

Sviluppo di calore

A causa dell'elevata quantità di cemento presente e della bassa conducibilità termica di questo tipo di calcestruzzo, lo sviluppo di calore all'interno della suddetta cassaforma in legno è stato monitorato con una termocoppia PT100 annegata all'interno del calcestruzzo (miscela E) ad una profondità di 20 cm dalla superficie.

Come si può vedere nel grafico in Figura 6, la massima temperatura interna raggiunta è stata di 44°C dopo 15 ore e 30 minuti dal getto. Il gradiente massimo allo scassero è stato di circa 20°C, nonostante ciò, né al momento dello scassero né successivamente, si sono rilevate fessurazioni di origine termica. Quest'ultimo comportamento è probabilmente dovuto al più basso modulo elastico di questo calcestruzzo rispetto ad un analogo calcestruzzo di peso normale (4, 7).

Resistenze meccaniche

In Tabella 4 e Figura 7 sono riassunti i risultati della resistenza meccanica a compressione.

Come previsto l'impiego dell'argilla espansa e l'introduzione di un elevato volume di microvuoti, ha comportato un abbassamento delle resistenze meccaniche rispetto ad un calcestruzzo di peso normale di pari rapporto a/c. E' noto infatti che la resistenza a compressione di un calcestruzzo normale dipende principalmente dal rapporto a/c, essendo la resistenza a compressione degli aggregati lapidei generalmente superiore a 100 MPa.

Ad ogni modo grazie al basso rapporto a/c (0.38) e alle ottime proprietà meccaniche dell'argilla espansa impiegata, avente $D_{max} = 8$ mm, si sono raggiunte resistenze meccaniche a compressione fino a 55 MPa a 28 gg.

Ritiro igrometrico

Il ritiro igrometrico è stato valutato a 60 giorni su provini 10 cm x 10 cm x 50 cm stagionati alle condizioni di 20°C e U.R. 50%, come indicato dalla normativa italiana UNI 6555. Così come per le resistenze meccaniche, il basso rapporto a/c e le ottime proprietà meccaniche dell'argilla, hanno permesso di ottenere un valore dello stesso di soli 550 $\mu\text{m}/\text{m}$, cioè comparabile al ritiro di un calcestruzzo autocompattante "ordinario" di analogo contenuto di polveri e pari resistenza meccanica.

Prova di pompabilità

Al fine di confermare i dati ottenuti nella sperimentazione di laboratorio e verificare la pompabilità di questo calcestruzzo, è stata eseguita una prova industriale presso un impianto di betonaggio. La prova è stata condotta su sei metri cubi di calcestruzzo miscelato a secco in autobetoniera. L'argilla è stata caricata in botte la sera precedente insieme a 1000 lt di acqua per la preventiva saturazione. Il giorno seguente, in fase di carico si è proceduto all'aggiunta del cemento, del filler e infine dell'additivo.

La prova in autobetoniera ha rivelato una certa difficoltà nella miscelazione come evidenziato dall'abbondante presenza di agglomerati sferici del diametro di circa 15-20 cm, costituiti in larga misura da materiale fine. Il prolungamento del tempo di miscelazione finale non ha comportato alcun miglioramento.

Il calcestruzzo ha mostrato elevata scorrevolezza (slump flow 760 mm) sebbene rispetto alle precedenti esperienze di laboratorio sia apparso un po' più "magro" e viscoso.

Nonostante tali differenze tra laboratorio e cantiere, la prova di pompabilità è stata positiva; il materiale è stato pompato senza interruzioni all'interno di un ampio scavo evidenziando le sue caratteristiche autolivellanti. Lo sforzo della pompa è stato il medesimo che per un "comune" calcestruzzo autocompattante.

CONCLUSIONI

In questo studio è stato dimostrato come sia possibile produrre un calcestruzzo leggero strutturale autocompattante, definito LS-SCC (lightweight structural self-consolidating concrete), altamente performante sia allo stato fresco che a quello indurito, facendo ricorso alla sola argilla espansa come aggregato, senza cioè alcuna aggiunta di sabbia naturale.

Le ottime proprietà meccaniche dell'argilla espansa utilizzata ($D_{max} = 8$ mm), unitamente al basso rapporto a/c, hanno permesso la produzione di miscele di calcestruzzo leggero con resistenze meccaniche fino a 55 MPa a 28 giorni e densità allo scassero di 1700 ± 50 kg/m³. Il ritiro igrometrico misurato a 60 giorni è stato modesto, 550 $\mu\text{m}/\text{m}$, cioè del tutto paragonabile al ritiro di un calcestruzzo autocompattante "ordinario" di analogo contenuto di polveri e pari resistenza meccanica.

Per assicurare l'ottima lavorabilità sia in termini di filling ability (Slump flow fino a 800 mm), che di passing ability ($H_2/H_1 \approx 1$ all'L-Box) è stato necessario l'impiego di un quantitativo di finissimi pari a 730 kg/m³ unitamente all'aggiunta di un sistema di additivi composto da una superfluidificante acrilico, un agente aerante ed un agente viscosizzante. Il mantenimento della lavorabilità è stato molto buono tanto che le proprietà autocompattanti sono perdurate per oltre 1 ora.

Prove industriali hanno indicato una certa difficoltà di omogeneizzazione della miscela allorché venga utilizzata la procedura di mescolazione a secco dei componenti descritta nell'articolo. A tal proposito si ritiene che tale problematica possa essere agevolmente risolta impiegando una produzione ad umido (premescolatore) o una miscelazione mediante il sistema brevettato "C.H.T.T." (premescolazione della pasta legante additivata e successiva miscelazione con gli aggregati) (8). In ogni caso è

intenzione degli autori verificare se, pur adottando una mescolazione a secco, l'utilizzo di una diversa procedura di carico (ordine di aggiunta dei componenti, tempi di mescolazione, ecc.) possa limitare al massimo tale problematica.

Con i dovuti accorgimenti di cui sopra, è ragionevole pensare che l'assenza della sabbia naturale, inevitabilmente soggetta a variazioni granulometriche specialmente nel suo contenuto di parti finissime, e l'utilizzo di soli prodotti "industriali" soggetti a rigidi controlli di produzione, contribuiscano a rendere la produzione di questo tipo di calcestruzzo più costante ed efficiente (5). Questo nuovo concetto di calcestruzzo leggero strutturale inoltre, seppur nella sua specificità, contribuisce ad uno sviluppo sostenibile in virtù delle sue caratteristiche termo-isolanti e del mancato sfruttamento delle sempre meno disponibili cave di sabbia naturale (6).

A tal riguardo sono in programma ulteriori studi per analizzare la possibilità di una riduzione dei costi di produzione sostituendo una significativa quantità di cemento con altri leganti come: loppa d'altoforno, cenere volante, ecc. Questo aspetto, insieme alla valutazione di altre proprietà meccaniche come modulo elastico, resistenze a flessione, creep, saranno oggetto di ulteriori indagini.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le aziende Laterlite s.p.a e Unical s.p.a per il loro contributo alla realizzazione delle prove su campo.

BIBLIOGRAFIA

1. Moira, A., "Structural lightweight aggregate concrete"; Concrete Construction, July 1995
2. NRMCA, "Structural lightweight concrete"; Concrete in Practice, 2003
3. Coppola, L., Monosi, S., Collepari, M., "Il calcestruzzo leggero"; Nuovo cantiere, October 1995
4. ACI Committee 213, "Guide for structural lightweight aggregate concrete"; American concrete institute, 1967
5. ACI Committee 304, "Batching, mixing and job control of lightweight concrete"; American Concrete Institute, 1991
6. Schuitemaker, E.J., van Breugel, K., den Uijl, J.A., "Design of self-compacting lightweight concrete with environment-friendly lightweight aggregate"; proceedings of the 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, August 2003
7. Collepari, M., Borsoi, A., Collepari, S., Troli, R., "Recent developments of special self-compacting concretes"; proceedings of the 7th International CANMET/ACI Conference on recent advances in concrete technology, Las Vegas, USA, May 2004
8. Cadore, R., Capecchi, C., Bianchin, G., Campinoti, C., "La premescolazione della pasta di cemento"; in Concreto 66, 2005.

Tabella 1 – Caratteristiche fisco-meccaniche dell'argilla espansa

	Unità	Valori
Densità in mucchio (UNI EN 1097-3)	kg/m ³	800±50
Densità specifica dell'argilla impermeabilizzata (UNI 7549-5)	g/cm ³	1.49
Resistenza alla frantumazione dei granuli (UNI EN 13055-1)	MPa	10
Assorbimento d'acqua dopo 24 ore (EN 1097-6)	%	8
Conducibilità termica, λ (UNI EN 12667)	W/m°K	0.125

Tabella 2 – Miscele di calcestruzzo testate

COMPOSITION	Densità	Massa (kg/m ³)				
	kg/l	A	B	C	D	E
CEM. II/A-L 42,5 R A	3,00	420	460	490	-	-
CEM. II/A-L 42,5 R B	3,00	-	-	-	490	490
Filler Calcareao	2.7	235	230	243	243	243
Argilla espansa saturata	1.61	830	827	798	798	798
Acqua libera	1.00	186	186	188	188	188
Superfluidificante	1.1	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Stabilizzante in polvere	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Peso teorica della miscela (kg/m ³)		1675	1707	1723	1723	1723
quantità totale di finissimi (kg/m ³)		655	690	733	733	733
a/c		0.44	0.40	0.38	0.38	0.38

Tabella 3 – Proprietà allo stato fresco

		A	B	C	D	E
Contenuto d'aria (%)		6,7	5,6	6,5	6,1	6,1
Densità allo stato fresco (kg/m ³)		1650	1710	1620	1655	1690
L-Box at 0'		0,89	0,90	0,91	1,00	1,00
L-Box at 60'		0,70	0,70	0,82	0,94	0,93
V.F. at 0' (s)		6	7	5	9	9
V.F. at 60' (s)		9	10	5	8	8
Slump Flow (mm)	0 min.	780	755	820	810	800
	30 min.	730	720	715	710	695
	60 min.	670	680	680	650	660
	80 min.	670	685	-	-	-

Tabella 4 – Proprietà allo stato indurito

		A	B	C	D	E
Resistenze a compressione (N/mm ²)	1 g	14,0	15,2	16,4	15,0	17,0
	3 gg	-	30,7	31,0	-	-
	7 gg	27,8	35,3	35,5	40,0	45,1
	28 gg	31,5	43,0	43,0	51,2	55,2
Densità (kg/m ³)	1 g	1640	1643	1655	1712	1749
	3 gg	-	1655	1688	-	-
	7 gg	1660	1648	1697	1741	1780
	28 gg	1665	1710	1685	1765	1818

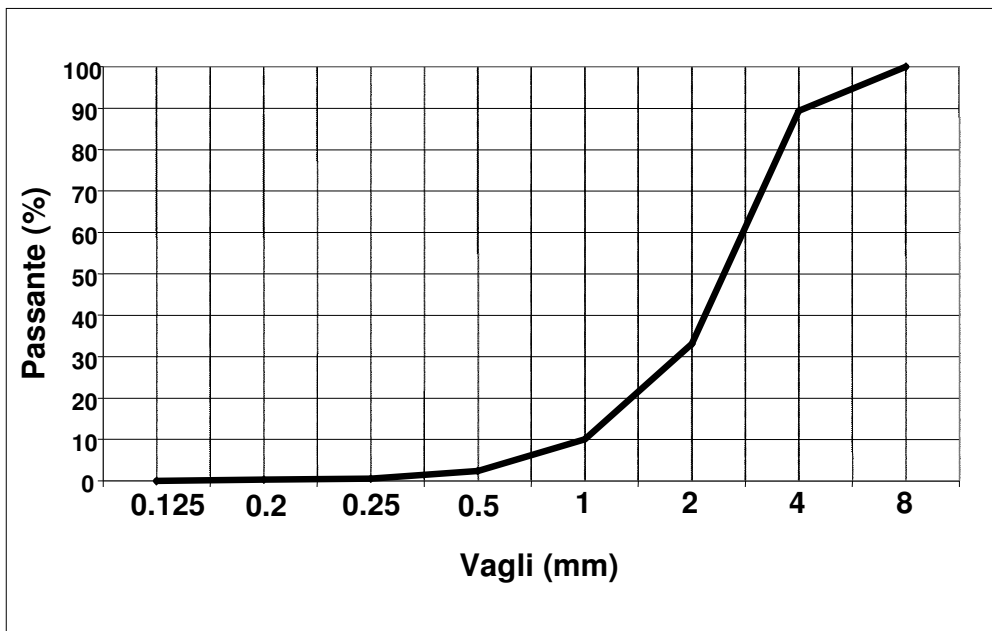


Fig. 1 – Analisi granulometrica dell'argilla

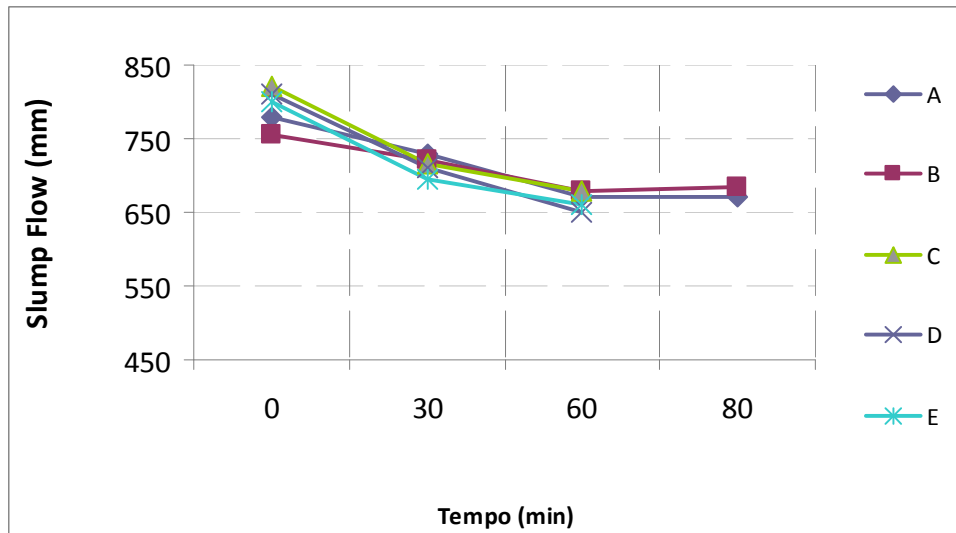


Fig. 2 – Mantenimento della lavorabilità

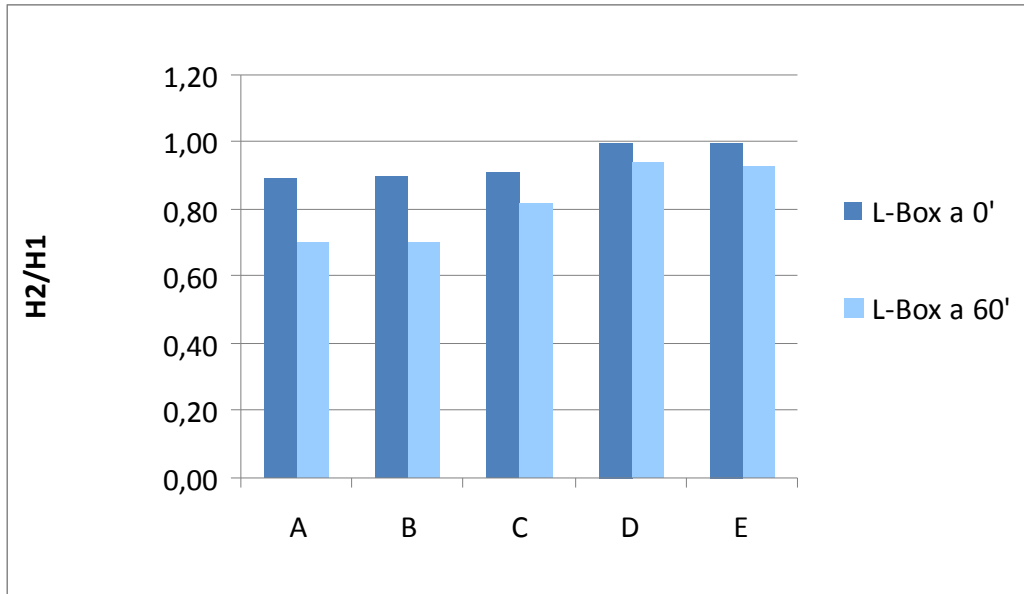


Fig. 3 – Evoluzione del valore H_2/H_1 alla prova dell'L-Box (una riduzione del suo valore nel tempo indica una perdita di passing ability)

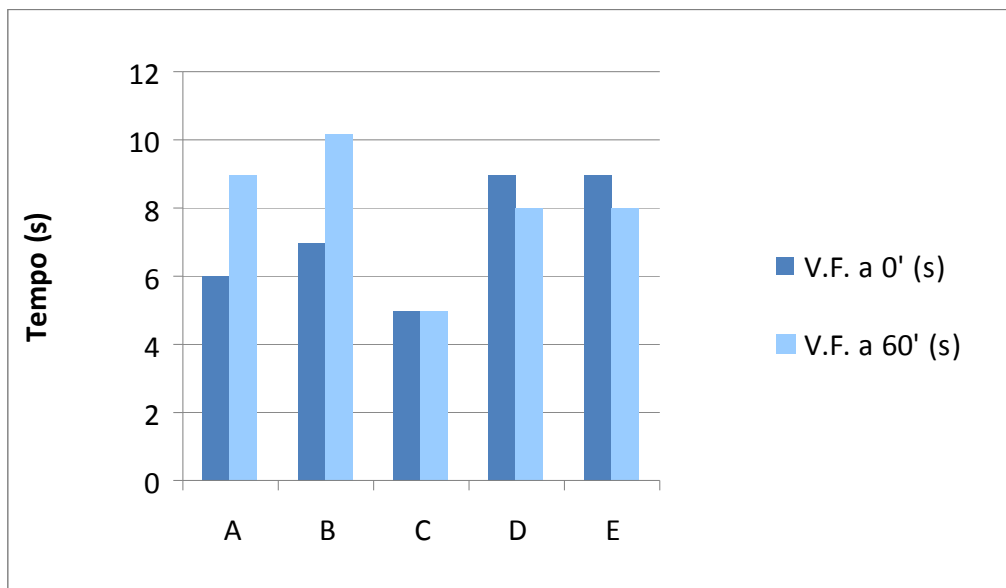


Fig. 4 - V-funnel

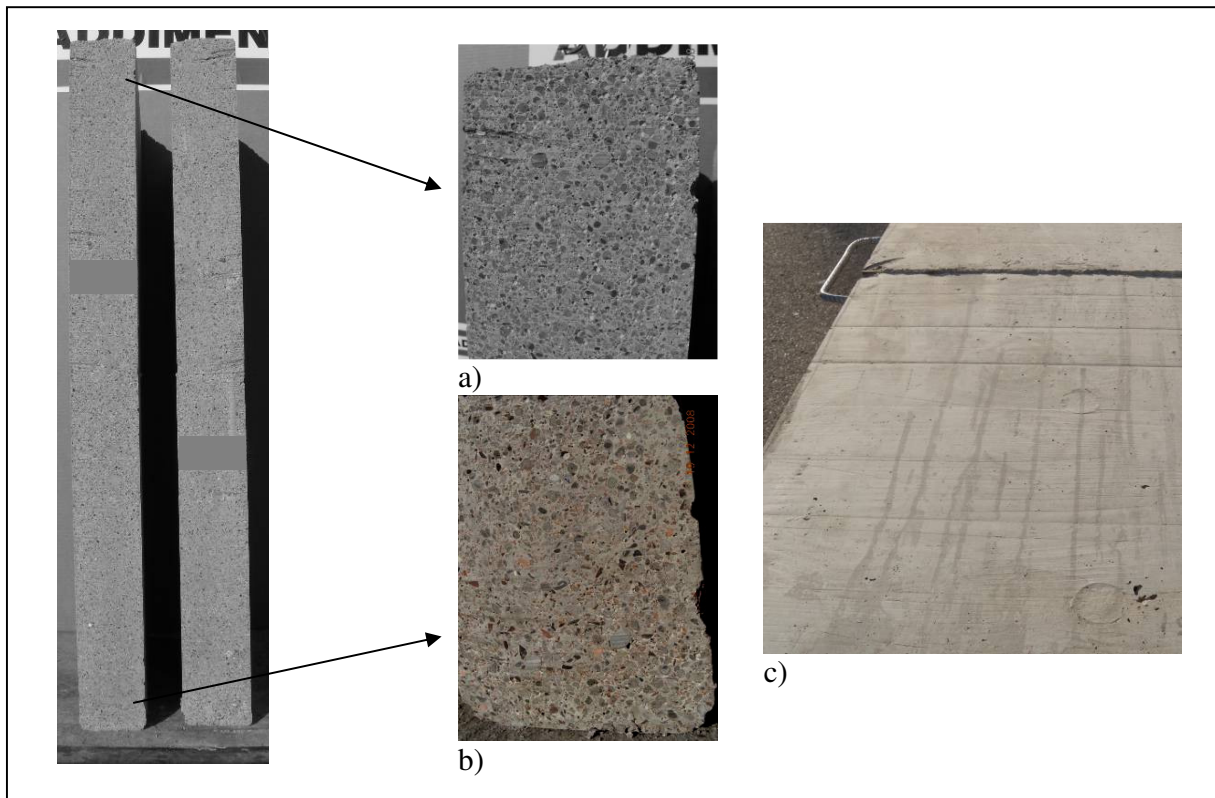


Fig. 5 – Vista in sezione del manufatto di prova gettato per la valutazione della capacità di riempimento e della stabilità: a) parte alta, b) parte bassa; e superficie (c)

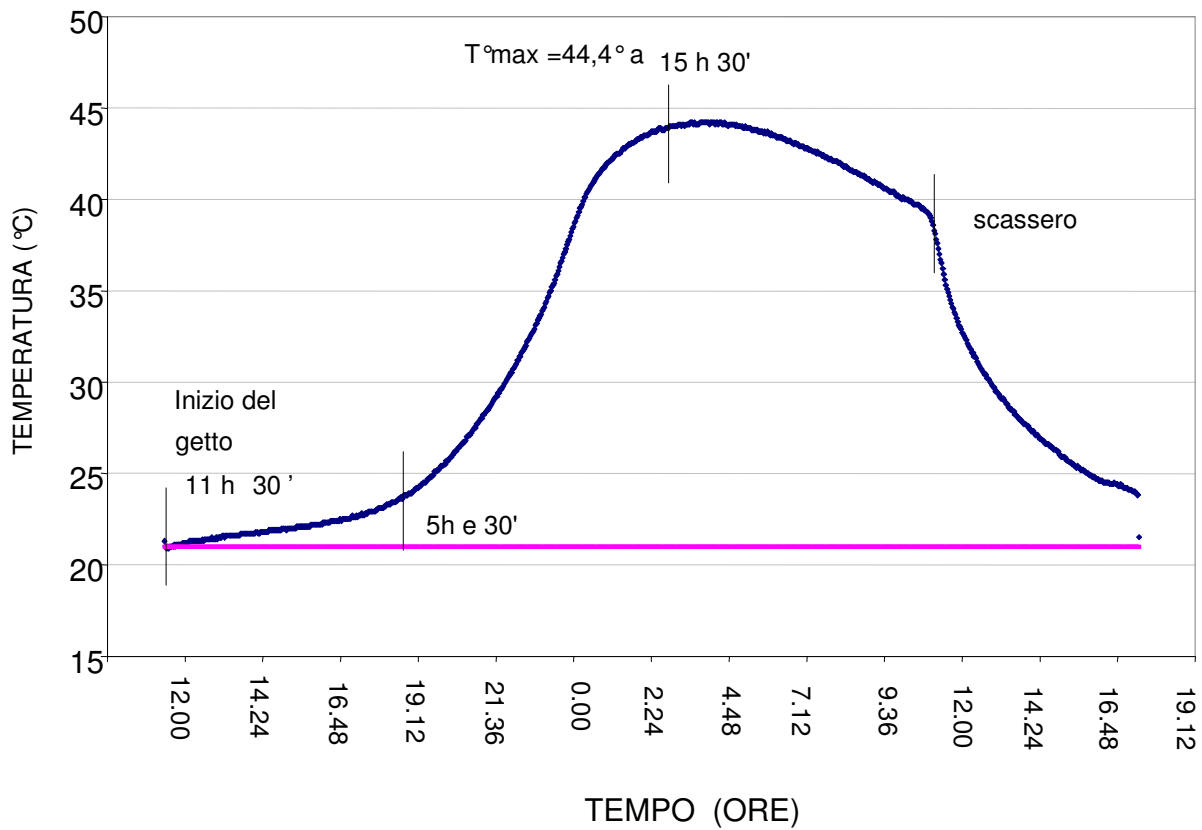


Fig. 6 –Evoluzione termica all'interno del manufatto 20 cm al di sotto della superficie

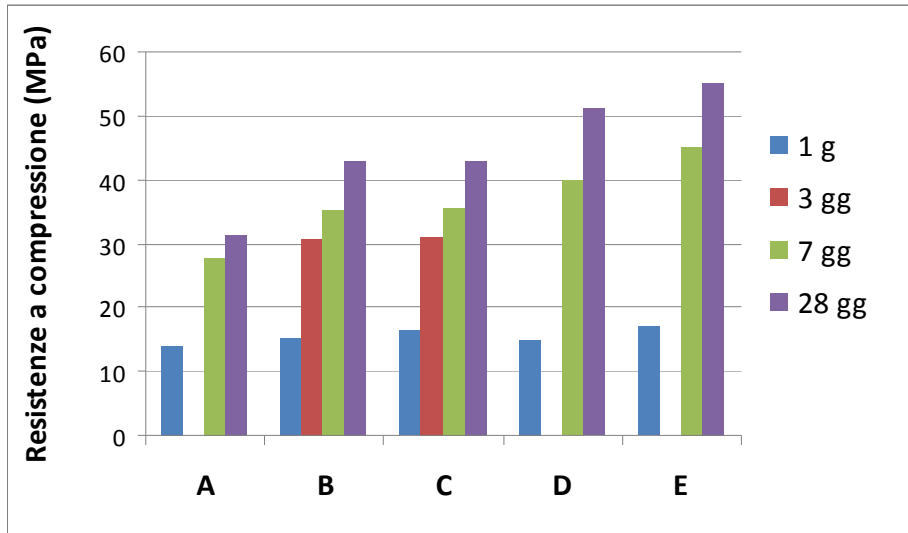


Fig. 7 – Resistenze meccaniche delle varie miscele di SCC a varie stagionature