

CARATTERIZZAZIONE FISICO-MECCANICA DI CALCESTRUZZI DI CEMENTO BIANCO FOTOCATALITICO, AUTOCOMPATTANTI E AD ALTE PRESTAZIONI, ALLE ALTE TEMPERATURE

MAURIZIO ACITO, GIANPAOLO ROSATI
Politecnico di Milano
MASSIMO BORSA, STEFANO CANGIANO
Italcementi Group SpA, Bergamo

SUMMARY

This paper presents some first results of several recent studies jointly carried out at Bergamo and Brindisi CTG Laboratories and at Milan Politechnic on white self compacting concrete (WSCC) behaviour at high temperature. More specifically, some experimental results concerning micro structural and spalling aspects are presented, with reference to different thermally-treated of self compacting concrete mixes containing crushed limestone aggregates and synthetic fibers. The results show that the behaviour of WSCC after being exposed to high temperature depends of geometric characteristics of fibers.

1. INTRODUZIONE

È noto che i calcestruzzi hanno un buon comportamento nei riguardi della esposizione alle alte temperature. La formulazione di nuovi calcestruzzi con caratteristiche reologiche di SCC richiede, però, un approfondimento volto alla comprensione del comportamento nei riguardi di tutti gli aspetti strutturali e microstrutturali tra i quali anche quelli relativi alla esposizione alle alte temperature. Questo è tanto più necessario quanto più le caratteristiche di resistenza meccanica degli SCC si avvicinano a quelle propri dei calcestruzzi ad alta resistenza (HSC). Infatti, mentre in letteratura si ritrovano numerosi studi sperimentali [1-6] che indicano come ad esempio per i calcestruzzi di resistenza normale, approssimativamente, la resistenza residua a compressione si abbatta di circa il 25% e 70-75%, quando si espone il materiale a trattamenti termici con temperatura massima di 250 °C e 600°C, rispettivamente, nel caso di calcestruzzi tipo SCC ad alte resistenza non sono disponibili analoghi studi sperimentali.

Così pure, sono limitati gli studi sperimentali che evidenziano se il ruolo fondamentale che assumono le caratteristiche chimico-fisiche degli aggregati e della matrice, nel determinare il comportamento allo spalling dei calcestruzzi ordinari e ad alta resistenza [07] [08] venga, o meno, confermato anche per i calcestruzzi SCC [09].

Peraltro, nel caso di SCC ad alta resistenza come quelli in studio, la presenza di una limitata porosità della matrice dovuta ad un basso rapporto Acqua/Cemento e alla presenza di una parte consistente di fini, determina una forte dipendenza del fenomeno dello spalling dalle proprietà della matrice, che per effetto del riscaldamento è sottoposto a delle sovrappressioni all'interno dei pori tali da portare la matrice a livelli di stress così elevati da evidenziarsi con rotture esplosive (spalling) [06].

Tale circostanza unita al fatto che il materiale in studio, dovendo essere realizzato con aggregato calcareo di Rezzato, le cui caratteristiche cromatiche e meccaniche permettono di ottenere un calcestruzzo bianco di ottima qualità, ha indirizzato lo studio per il miglioramento del comportamento allo spalling con riferimento alla sola matrice. In tale ottica lo studio vuole mettere in evidenza il ruolo che possono giocare le fibre in polipropilene (PPF), distribuite uniformemente nel mix, nel modificare le caratteristiche della matrice e quindi il comportamento allo spalling.

Come è noto, infatti, [10] [11] le fibre in polipropilene posso determinare una porosità aggiuntiva per effetto della loro vaporizzazione che avviene fra i 160°C e i 200°C. Tale porosità aggiuntiva va quindi a costituire una sorta di camere di espansione organizzate come un sistema discreto di espansione dei pori della matrice, in grado di prevenire l'instaurarsi di elevate sovrappressioni negli stessi, limitando, così, il fenomeno dello spalling.

In questo lavoro sono presentati i primi risultati di uno studio sperimentale mirato al rilievo delle principali proprietà fisiche e meccaniche, a caldo e residue, di un calcestruzzo confezionato con cemento bianco fotocatalitico [12] e con caratteristiche reologiche assimilabili a quelle di un calcestruzzo autocompattante (SCC ad alte resistenze), esposto a cicli termici con livelli di temperatura massima di 250 °C, 500 °C e 750°C. Lo studio considera, oltre alla miscela di base, altre quattro miscele, ottenute a partire dalla miscela di base con aggiunta di fibre in polipropilene di forma diversa. Le proprietà meccaniche indagate riguardano la resistenza a compressione su cubi e cilindri, il modulo elastico statico e dinamico, la resistenza a trazione per flessione. In particolare, al fine di evidenziare una diversa sensibilità dei materiali studiati allo "spalling", lo studio è stato effettuato su provini riscaldati fino alle temperatu-

re massime indicate, seguendo tre rampe di gradiente termico. La prima rampa (R1), con gradiente termico pari a 10 C/min; la seconda rampa (R2), con il gradiente previsto analogo a quello della UNI 9502/2001 [13] [(legge di riscaldamento $T=T_0+345 \times \text{Log}(8t+1)$); la terza rampa (R3), con gradiente di 2 °C /min. Per tutte e tre le rampe, raggiunta la temperatura massima i cicli di trattamento prevedevano la permanenza alla temperatura massima per 120 minuti e successivo raffreddamento a forno aperto.

In aggiunta, al fine di evidenziare la sensibilità della risposta dei calcestruzzi considerati sottoposti a diverse condizioni termiche di prova (a caldo e residue), le resistenze a compressione sono state valutate sia a caldo (in corrispondenza del valore massimo di temperatura raggiunto) che in condizioni "residue" (al termine del ciclo termico a ventiquattro ore dall'apertura del forno). Le prove di trazione per flessione (con restituzione del diagramma carico-spostamento completo), invece, sono state effettuate solo in condizioni "residue".

2. MATERIALI E LORO CARATTERIZZAZIONE

2.1 MATERIALI

Per la realizzazione degli impasti è stato utilizzato il cemento tipo I 52.5R Italbiano della cementeria Italcementi di Rezzato (vedi tabella 1 per le proprietà), e un additivo polimerico a base carbossilica (Creactive L/B) prodotto dall'Axim. Gli aggregati utilizzati sono di tipo calcareo di frantumazione provenienti dalla cava Cremaschi di Rezzato, sotto forma di sabbia e graniglia di dimensione massima 14 mm. In tabella 2 vengono riportate sinteticamente le proprietà degli aggregati.

	Resistenza a compressione [MPa]	Resistenza a flessione [MPa]
2 giorni	34,65 ± 0,58	7,053 ± 0,344
28 giorni	58,53 ± 0,93	9,415 ± 0,265
Richiesta d'acqua [%]	30	
Stabilità [mm]	1,0	
Inizio presa [min]	163 ± 1	
Fine presa [min]	237 ± 3	

Tabella 1. Proprietà della pasta cementizia (UNI EN 196-1)

Le fibre polimeriche utilizzate per modificare il comportamento alle alte temperature del calcestruzzo, sono fibre di polipropilene di diverso diametro e lunghezza.

Le caratteristiche geometriche di tali fibre sono riportate in tabella 3.

FRAZIONI E NORMA DI RIFERIMENTO	POLVERE CR	1- CR	3- CR	5- CR
Modulo finezza UNI EN 933-1	1,35	4,45	5,74	6,85
D max [mm] UNI EN 12620	1,00	3,15	6,30	14,00
Passante 63 mic [%] UNI EN 933-1	24,38	2,25	1,61	0,71
Classi granulometriche UNI EN 12620	[0 - 1]	[1,25-3,15]	[3,15-6,3]	[6,3-14]
Massa Volumica [kg/m ³] UNI EN 1097-6	2,69	2,68	2,70	2,70
Assorbimento [%] UNI EN 1097-6	0,22	0,60	0,16	0,13
Perdita di massa aggregati grossi [%] UNI EN 1097-2	-	-	-	24,49

Tabella 2. Proprietà degli aggregati utilizzati

FIBRE	F-6	F-206	M-6	Fibrasol-2P	F.A.
L [mm]	5	6	6	12	12
d [mm]	0,048	0,270	0,048	0,048	0,018

Tabella 3. Caratteristiche geometriche delle fibre scelte

2.2 FORMULAZIONI DELLE MISCELE E PREPARAZIONE DEI PROVINI

Le formulazioni dei mix di tipo autocompatte sono state progettate ottimizzando sia il contenuto di fini totali presenti nella miscela (legante e passante allo 0,063 mm degli aggregati), sia il volume di pasta legante. Le diverse formulazioni delle miscele di calcestruzzo eseguite sono riportate in tabella 4(b). I formulati con anche le fibre polimeriche, differiscono esclusivamente per il contenuto in kg/m³ di questo materiale. Tutti gli impasti sono stati realizzati utilizzando un miscelatore non forzato da laboratorio. Il mix design è riportato in tabella 4(b), con anche l'assortimento in curva degli aggregati, ottimizzati rispetto alla curva di riferimento di Bolomey (Tabella 4a). Successivamente alla miscelazione, gli impasti sono stati utilizzati sia per il controllo delle proprietà allo stato fresco che per il confezionamento di provini in forma di travetti, cubi e cilindri utilizzati allo stato indurito per la valutazione delle proprietà fisico-meccaniche. Il confezionamento è stato eseguito all'interno delle casseforme senza alcuna costipazione. L'operazione di sformatura è stata eseguita in tutti i casi 24 ore dopo il getto; i provini ottenuti sono stati mantenuti in un'apposita camera a controllo di temperatura ed umidità (T=20±3°C; U.R.>90%) per almeno 28 giorni dalla data di getto, prima della loro caratterizzazione. Sono stati effettuati anche controlli a giorni di stagionatura intermedi.

CLASSI GRANULOMETRICHE	Assortimento in curva [%]
Polvere CR	33,00
1- CR	25,00
3- CR	19,00
5-CR	23,00

Tabella 4. (a) curva granulometrica

CODICE	02-FBT	04-FBT	07-FBT
CEM 52,5R I Italbiano	450	450	450
Polvere CR [kg/m ³]	552,6	552,6	553,5
CR 1 [kg/m ³]	413,9	413,9	414,6
CR 3 [kg/m ³]	318,2	318,2	318,7
CR5 [kg/m ³]	386,6	386,6	387,2
Fibre	F-6	F-206	M-6
L [mm]	5	6	6
D [mm]	0,048	0,27	0,048
Fibre [Kg/m ³]	1,84	1,84	0,9
A/C	0,45	0,45	0,45
Additivo	CRTV-LB	CRTV-LB	CRTV-LB
Additivo [% su cem.]	0,89	1,03	1,19
[Kg/m ³]	3,99	4,64	5,34
CODICE	08-FBT	09-FBT	07-BT
CEM 52,5R I Italbiano	450	450	450
Polvere CR [kg/m ³]	553,8	554	554,2
CR 1 [kg/m ³]	414,9	415	415,2
CR 3 [kg/m ³]	318,8	319	319,1
CR5 [kg/m ³]	387,4	387,5	387,7
Fibre	Fibrasol-2P	F.A.	/
L [mm]	12	12,0	/
D [mm]	0,048	0,018	/
Fibre [Kg/m ³]	0,6	0,4	/
A/C	0,45	0,45	0,45
Additivo	CRTV-LB	CRTV-LB	CRTV-LB
Additivo [% su cem.]	1,19	1,19	1,045
[Kg/m ³]	5,34	5,34	4,703

Tabella 4. (b) Mix-design

2.3 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DEI MIX FORMULATI

Immediatamente dopo l'impasto, il calcestruzzo è stato valutato allo stato fresco, tramite la determinazione dello "slump flow", dell' "L-Box" (Figure 1 e 2), della massa volumica e del contenuto d'aria. I valori di "slump flow", determinati secondo la norma UNI 11041, indicano la consistenza/lavorabilità della miscela allo stato fresco. Il contenuto d'aria è stato determinato secondo la norma UNI EN 1250-7, mentre la massa volumica allo stato fresco secondo la UNI EN 12350-6. "L-Box" test è stato eseguito secondo la normativa UNI 11043. Per quanto riguarda la valutazione della massa volumica allo stato indurito si è fatto riferimento alla UNI EN 12390-7.

La resistenza a compressione è stata misurata con una pressa in controllo di carico su provini cubici di lato 150 mm, la resistenza a flessione è stata valutata, sempre in controllo di carico, su provini prismatici 100x100x400 mm, rispettiva-

mente secondo le norme UNI EN 12390 parte 4 e 5; il modulo elastico statico secante e quello dinamico sono stati determinati rispettivamente secondo le norme UNI 6556 e UNI 9524, su provini cilindrici di dimensione 150x300 mm. Test a trazione indiretta sono stati effettuati su provini cilindrici 150x300 mm secondo la norma UNI EN 12390-6. Il ritiro idraulico è stato misurato in base alla norma UNI 6555/73.

Sono state inoltre eseguite delle prove fisiche di controllo della durabilità del calcestruzzo, misurando l'assorbimento d'acqua per capillarità (secondo UNI 9526) e la profondità di carbonatazione (secondo UNI 9944), su cilindri 100x200 mm; il coefficiente di permeabilità all'ossigeno (metodo interno cembureau) e la porosità accessibile all'acqua, su provini cilindrici di diametro 100 mm ed altezza 50 mm. Si è, inoltre, determinato il coefficiente di diffusione ai cloruri, in base al metodo NTBuild 492.

3. RISULTATI DELLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE

La misura delle proprietà dei formulati in calcestruzzo, sia allo stato fresco che indurito, è stata eseguita secondo le procedure e norme citate in precedenza.

3.1 PROPRIETÀ DELLO STATO FRESCO

La richiesta di un calcestruzzo autocompattante (slump flow > 600 mm ed L-Box ≥ 0,80), con l'ulteriore indicazione di ottenere caratteristiche di pompabilità, è stata soddisfatta sia ottimizzando il livello di materiale fine proveniente dagli aggregati messi in curva, sia individuando e ottimizzando il quantitativo dell'additivo polimerico da utilizzare. In particolare, il formulato base (senza fibre polimeriche) è stato ottimizzato in base alle caratteristiche di lavorabilità richieste (calcestruzzo autocompattanti, con mantenimento della lavorabilità per circa 60 minuti) sulla base di una progettazione a resistenza richiesta di circa 70-75 MPa e un modulo elastico di non meno di 35 GPa a 28 giorni di stagionatura. I risultati delle misure del mix base (07-BT) di lavorabilità sono riportati in tabella 5 e nella figura 3.

CODICE	07-BT
Slump-Flow 0' [mm]	610
Slump-Flow 30' [mm]	680
Slump-Flow 60' [mm]	700
L-Box 0' [-]	0,84
L-Box 30' [-]	0,84
L-Box 60' [-]	0,88
Aria [%]	2,2
Massa Volumica [kg/m ³]	2372,9

Tabella 5. Proprietà allo stato fresco del mix base



Figura 1. Slump flow



Figura 2. Prova L-Box

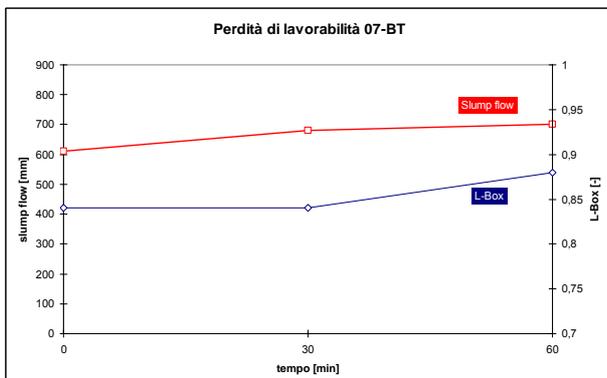


Figura 3. Perdita di lavorabilità

L'aggiunta di fibre di polipropilene al mix ottimizzato ha determinato un comportamento al fresco poco diverso da quello del materiale base

anche se in alcuni casi è stato necessario aumentare il dosaggio dell'additivo, per ottenere lavorabilità paragonabili a quella del mix base (senza fibre). In Tabella 6 sono riportate le caratteristiche al fresco dei calcestruzzi in studio.

CODICE	02-FBT	04-FBT	08-FBT	09-FBT	07-FBT
Slump-Flow 0' [mm]	500	570	600	580	620
Slump-Flow 30' [mm]	570	620	630	600	650
Slump-Flow 60' [mm]	520	600	620	600	620
Aria [%]	4,8	4	7,3	3	3,7
Massa Volumica [kg/m ³]	2325,7	2349	2278,5	2366,6	2344,1

Tabella 6. Proprietà allo stato fresco dei calcestruzzi con fibre

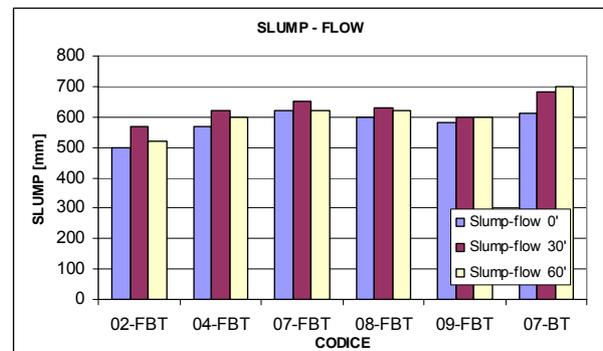


Figura 4. Proprietà allo stato fresco dei calcestruzzi formulati

Come si può notare facilmente dalla figura 4 come, ad eccezione del mix 02-FBT il quale non rispetta alla lettera la definizione di SCC, tutti i mix formulati hanno le caratteristiche di un SCC.

3.2 PROPRIETÀ DELLO STATO INDURITO

Sono state eseguite prove di resistenza meccanica a diversi giorni di maturazione, sia rompendo a compressione cubi di lato 15 cm e cilindri 15 x 30 cm, sia provando a flessione dei travetti 10x10x40 cm.

Il ritiro igrometrico è stato controllato su travetti 10x10x60, fino a 90 giorni d'esposizione in un ambiente ad umidità relativa e temperatura controllate (R.H=50% e T=20 °C), mostrando valori minori di 500 µm/m a 90 giorni.

Come mostrato in tabella 7, sono stati controllati i valori di resistenza a compressione (sia su cubi che cilindri) il modulo elastico (sia dinamico che statico), sia l'andamento del ritiro per diversi periodi di stagionatura.

CODICE	07-BT	Codice	07-BT
Rc a 1gg [MPa]	44,27	Ritiro a 28gg [mm/m]	0,335
Rc a 7gg [MPa]	54,75	Ritiro a 60gg [mm/m]	0,390
Rc a 28gg [MPa]	63,67	Ritiro a 90gg [mm/m]	0,443
Rc a 60gg [MPa]	66,15	M.E.D. 1gg [GPa]	43,81
Rc a 90gg [MPa]	72,50	M.E.D. 7gg [GPa]	44,00
fc a 28gg [MPa]	54,17	M.E.D. 28g [GPa]	46,24
fc a 90gg [MPa]	53,48	M.E.D. 60gg [GPa]	49,19
f _{fr} a 7gg [MPa]	8,81	M.E.D. 90gg [GPa]	50,62
f _{fr} a 28gg [MPa]	8,61	M.E.S. 28gg [GPa]	35,63
f _{fr} a 90gg [MPa]	8,62	M.E.S. 90gg [GPa]	36,56
Rti a 28gg [MPa]	7,27	Rti a 90gg [MPa]	10,96

Tabella 7. Proprietà meccaniche allo stato indurito

L'aggiunta delle fibre polimeriche, di diversa lunghezza e diametro, oltre a non modificare la lavorabilità rispetto a quella del materiale base, non ha causato una significativa perdita delle resistenze meccaniche (vedi tabella 8 e Fig. 5 e 6), eccezion fatta per il formulato 08-FBT che ha inglobato la maggiore percentuale di aria (Fig. 7), determinando, quindi, una corrispondente minore massa volumica (Fig. 8). Le misure di resistenza a compressione sono stati eseguiti su provini cubici di lato 10 cm.

CODICE	02-FBT	04-FBT	07-FBT	08-FBT	09-FBT
Rc a 1gg [MPa]	45,18	41,15	48,08	35,67	50,31
Rc a 28gg [MPa]	72,68	68,69	71,00	54,92	69,28
M.E.D. 1gg [GPa]	42,82	43,07	40,70	36,74	42,98
M.E.D. 90gg [GPa]	49,11	48,38	49,08	41,68	45,69

Tabella 8. Proprietà meccaniche allo stato indurito – calcestruzzi con fibre

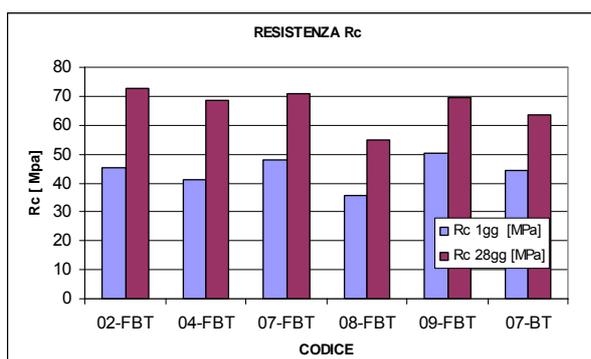


Figura 5. Resistenza a compressione dei calcestruzzi formulati

I test eseguiti per valutare le proprietà fisiche del formulato, in termini di capacità di resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi esterni (liquidi e gassosi), hanno fornito i risultati riportati in tabella 9.

Come si può notare, pur avendo una porosità accessibile all'acqua media (ϵ), si nota una di-

scelta capacità di resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro (coefficiente di diffusione ai cloruri D_{Cl} è minore di 10^{-11} m²/s) ed un coefficiente di permeabilità all'ossigeno (P_{O_2}) che, a condizioni di saturazione (S) del calcestruzzo di circa il 50 %, mostra valori minori di $5 \cdot 10^{-17}$ m².

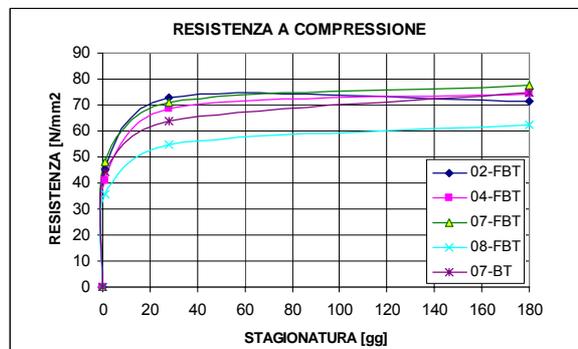


Figura 6. Andamento della resistenza a compressione con la stagionatura dei calcestruzzi formulati

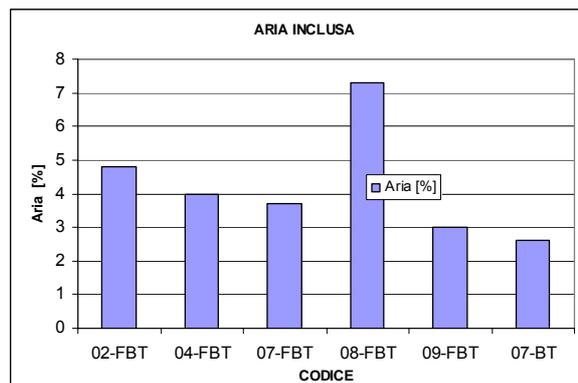


Figura 7. Contenuto di aria inclusa dei calcestruzzi formulati

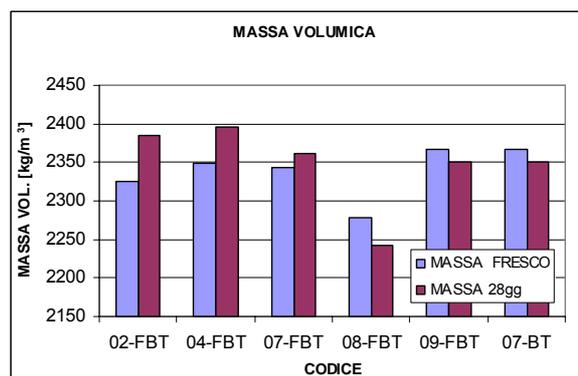


Figura 8. Massa Volumica dei calcestruzzi formulati

CODICE	ϵ [% vol.]	S [%]	P_{O_2} [10^{-17} m ²]	S [%]
07-BT	14,45	51,63	0,488	17,93
CODICE	P_{O_2} [10^{-17} m ²]	D_{Cl} [10^{-12} m ² /s]	A. Capillare [%]	Pen.CO ₂ 90gg [mm]
07-BT	1,28	4,40	2,52	0

Tabella 9. Proprietà fisiche allo stato indurito

4. TRATTAMENTO TERMICO E PROVE FISICO-MECCANICHE

Come si è detto, lo studio vuole evidenziare il comportamento al fenomeno dello spalling dei calcestruzzi preparati. Peraltro, la scelta di valutare la risposta dei calcestruzzi sotto tre diversi gradienti termici (rampe R1, R2 e R3 di Figura 9), permette di valutare la sensibilità del fenomeno al gradiente termico applicato ai provini. Per meglio simulare le condizioni di azione termica su di una superficie di calcestruzzo, si è ritenuto di esporre i provini al trattamento termico utilizzando un forno orizzontale che riscaldasse i provini prevalentemente per irraggiamento unidirezionale.

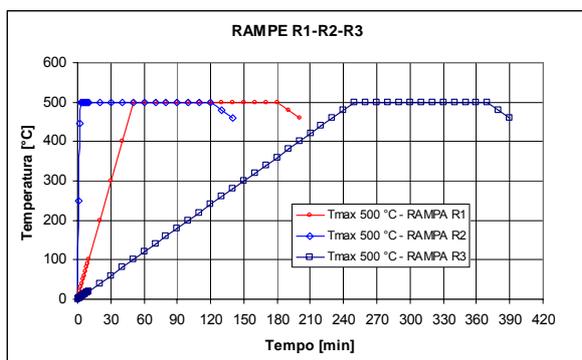


Figura 9. Rampe termiche utilizzate con Tmax 500 °C

A tal fine, i provini sono stati posizionati all'interno di un contenitore isolato termicamente (base del forno) con la disposizione indicata nella Figura 10, al di sopra del quale è stato posizionato il forno (Fig. 11). In tale ottica, lo studio sperimentale si è sviluppato con riferimento ad un confronto relativo, fra i diversi mix formulati con l'aggiunta di fibre in polipropilene e il materiale base (codice 07-BT). Il forno, avendo le resistenze elettriche poste in un piano orizzontale (Fig. 12), al di sopra della superficie dei provini concretizzati, di fatto, un riscaldamento prevalentemente di irraggiamento di tipo monodirezionale, perpendicolare alla superficie di esposizione dei provini.



Figura 10. Disposizione dei provini



Figura 11. Forno per il trattamento termico

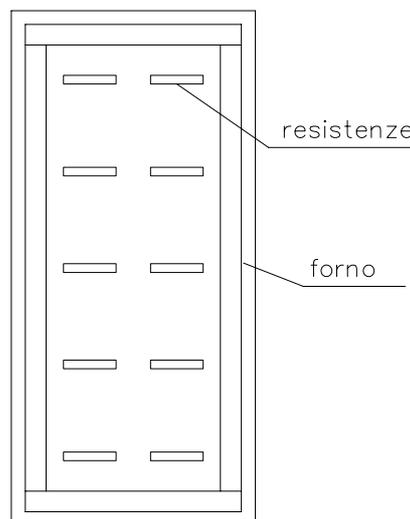


Figura 12. Resistenze elettriche del forno per il trattamento termico

In figura 13, è riportata una immagine ripresa con termocamera, che evidenzia il carattere prevalente unidirezionale del riscaldamento (l'immagine riprende un cubo posto fra i piatti di una pressa nella prova a compressione a caldo con il cubo posizionato con la superficie di esposizione all'irraggiamento in verticale sul lato destro).

La circostanza di un riscaldamento non uniforme è anche evidenziata dal diverso danneggiamento subito dal materiale, rilevato dall'indagine sonica (Fig. 14). Peraltro, la non omogeneità del danneggiamento, seppur limitata a qualche percento, può porre delle riserve sulla validità dei test meccanici a caldo e residuo che,

però, nello spirito di un confronto relativo, conservano una validità completa.¹

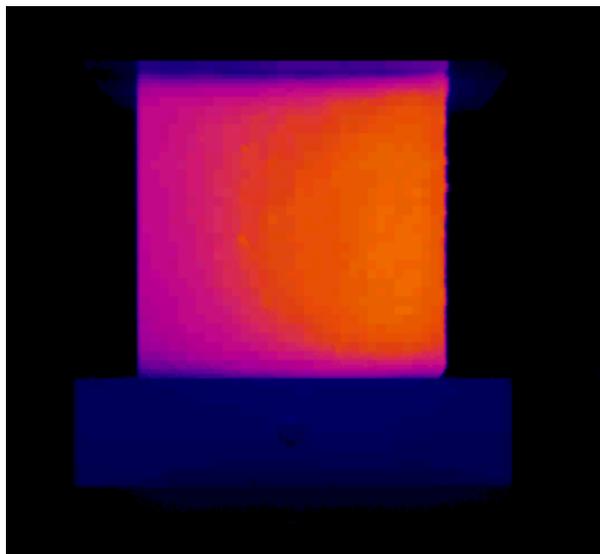


Figura 13. Immagine del riscaldamento del cubo n.4 dopo il trattamento termico con temperatura massima 250 °C, rampa R1



Figura 14. Rilievo della tempo di percorrenza in μ s delle onde acustiche (prova con gli ultrasuoni) del Cubo n. 5 trattato con rampa R3 alla Temperatura massima di 500 °C

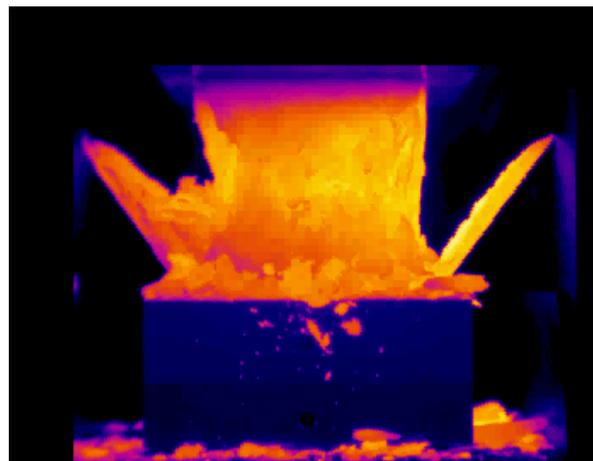


Figura 15. Immagine della rottura a caldo per compressione del cubo n. 4 dopo il trattamento termico con temperatura massima 250 °C, rampa R)

In particolare, per quanto riguarda il materiale base (07-BT) sono stati eseguiti sei cicli di trattamento termico su provini riscaldati fino alle temperature massime di 250 °C e di 500 °C, seguendo tre gradienti termici R1, R2 e R3.

Per tutte e tre le rampe, raggiunta la temperatura massima i cicli di trattamento prevedevano la permanenza alla temperatura massima per 120 minuti e successivo raffreddamento a forno aperto.

Ciascun ciclo di trattamento termico ha riguardato quattro cubi 150x150x150 mm, quattro cilindri diametro 100 mm e altezza circa 200 mm e due travetto di sezione 150x150 mm e di lunghezza 600 mm. In questa sede, però, ci si limita ad illustrare i risultati delle sole prove a compressione eseguite sui cubi, rimandando ad una memoria successiva la presentazione dei risultati degli altri test meccanici oltre ad una valutazione comparata con provini riscaldati uniformemente così da quantificare il grado d'influenza della non omogeneità di danneggiamento sulle proprietà meccaniche indagate.

La sperimentazione eseguita ha evidenziato che il materiale base (07-BT) presenta il fenomeno dello spalling in tutti i casi in cui la temperatura massima raggiunta era pari a 500 °C, mentre, per i trattamenti con temperatura massima di 250 °C in nessun caso si è evidenziato il fenomeno dello Spalling. Tale circostanza, ha fatto ritenere di non procedere per il materiale base ai trattamenti che prevedevano il raggiungimento della temperatura massima di 750 °C.

Nella tabelle 10 e 11 sono sinteticamente riportati le evidenze sperimentali in riferimento allo spalling e alle resistenze a compressione registrate a caldo e residue (dopo 24 ore a forno aperto).

¹ In ogni caso, sono in corso dei test di confronto sperimentali e numerico per valutare l'influenza della disomogeneità di danneggiamento, indotte dal trattamento termico, sulle caratteristiche meccaniche indagate. Per quanto già osservato, si può rilevare che le rotture a compressione dei cubi e dei cilindri hanno evidenziato rotture con caratteristiche analoghe (Fig. 15) a quelle classiche a clessidra osservate nel caso dei provini non trattati termicamente.

Trattamento/Tmax	RAMPA R1	RAMPA R2	RAMPA R3
250 °C	0%	0%	0%
500 °C	50%	33%	33%

Tabella 10. Percentuale cubi con fenomeno di spalling per il Materiale base 07-FB

PROVA A COMPRESIONE	CODICE	Rc [MPa]
PROVA STANDARD (stag. 60 gg)	09/02/06 - 1	68,61
	09/02/06 - 2	69,00
	09/02/06 - 3	68,95
RAMPA 1 - 250 °C (stagionatura 60 gg)		
PROVA A CALDO	09/02/06 - 4	52,15
	09/02/06 - 5	56,23
PROVA RESIDUA	09/02/06 - 6	58,65
	09/02/06 - 7	61,18
RAMPA 2 - 250 °C (stagionatura 60 gg)		
PROVA A CALDO	09/02/06 - 8	53,14
	09/02/06 - 9	52,99
PROVA RESIDUA	09/02/06 - 10	63,20
	09/02/06 - 11	63,24
RAMPA 3 - 250 °C (Stagionatura. 90 gg)		
PROVA A CALDO	09/02/06 - 16	50,73
	09/02/06 - 17	56,55
PROVA RESIDUA	09/02/06 - 18	64,50
	09/02/06 - 19	63,09

Tabella 11. Percentuale cubi con fenomeno di spalling per il Materiale base 07-FB

Per quanto riguarda le resistenze a compressione, la sperimentazione svolta per i provini trattati con temperatura massima pari a 250 °C, ha evidenziato delle riduzioni di resistenza a caldo e residua (Figg. 16, 17 e 18), rispetto alla resistenza del materiale non trattato, comparabili con quelle registrate in letteratura per i materiali non SCC, ordinari e ad alta resistenza.

I risultati delle riduzioni di resistenza osservate nel caso dei provini trattati con temperatura massima di 500 °C, sembrano, invece, evidenziare delle riduzioni minori rispetto alle analoghe riduzioni registrate in letteratura per i materiali non SCC, ordinari e ad alta resistenza.

Tale circostanza potrebbe essere legata al tipo di trattamento non uniforme a cui sono stati sottoposti i provini. In ogni caso, i risultati conservano una validità completa di confronto con i risultati registrati per i mix con fibre.

Per quanto riguarda i materiali additivati con fibre in polipropilene il programma dei trattamenti termici previsto è analogo a quello proposto per il materiale base (07-BT). In questo caso, però, si è fatto riferimento ad uno studio preliminare di pre-selezione che consentisse di individuare il mix con fibre in grado di controllare al meglio il fenomeno dello spalling che prevedeva l'impiego di soli cubi 150x150x150 mm.

Allo scopo sono stati predisposti 12 cubi per ciascun mix con fibre alcuni dei quali da sottoporre

ai cicli termici. Allo stato attuale la sperimentazione eseguita ha riguardato 8 cubi (Fig.19), due per il mix 04-FBT, 2 per il mix 07-FBT, due per il mix 08-FBT e due per il mix 09-FBT, i quali sono stati sottoposti ad un ciclo termico con rampa R3 e temperatura massima di 500 °C. I risultati ottenuti consentono già di evidenziare il miglioramento di comportamento allo spalling che mostrano, ad eccezione del mix 04-FBT, i mix con fibre.

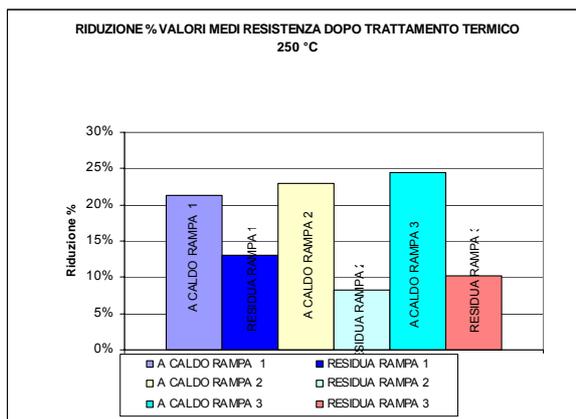


Figura 16. Riduzione percentuale della resistenza dei cubi trattati a 250 °C

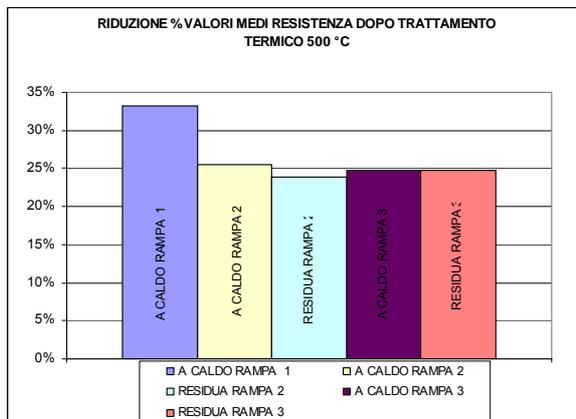


Figura 17. Riduzione percentuale della resistenza dei cubi trattati a 500 °C

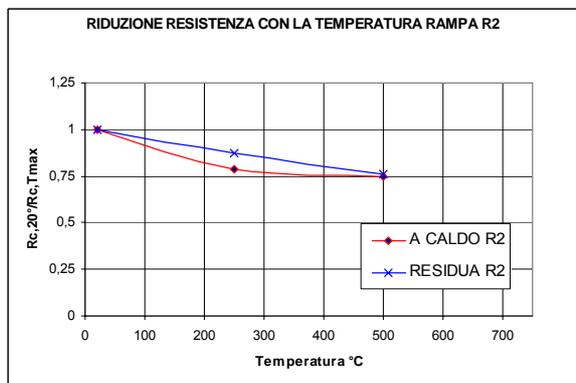


Figura 18. Riduzione percentuale della resistenza dei cubi trattati con la rampa R2

Infatti, nel solo caso del mix 04-FBT ottenuto dal mix base con additivazione delle fibre in poli-propilene F-206, con diametro 0,27 mm e lunghezza 6 mm, sembra che le fibre non abbiano determinato alcun miglioramento, in quanto entrambi i provini trattati sono esplosi disintegrandosi. Il primo dei provini è esploso a forno chiuso circa 10 minuti dopo in raggiungimento della temperatura massima di 500 °C, seguita poi da ulteriori due esplosioni che hanno riguardato le parti di maggiori dimensioni dello stesso provino (Fig. 20).

Il secondo cubetto realizzato con materiale 04-FBT è esploso qualche istante dopo l'apertura del forno (Fig. 21). Peraltro, dalle parti residue dei due provini esplosi si è potuta osservare che a differenza degli altri provini trattati questi ultimi presentavano delle macchioline nere (Figg. 21 e 22) a testimoniare una diversa combustione delle fibre F-206.

Questo con buona probabilità in ragione delle maggiori dimensioni di queste fibre che presentano un diametro circa 6 volte maggiore (diametro 0,27 mm) delle altre fibre impiegate (per lo più con diametro di 0,048 mm).



Figura 19. Parti residue prodotte dall'esplosione del primo cubetto



Figura 20. Parti residue prodotte dall'esplosione del primo cubetto



Figura 21. Parti residue prodotte dall'esplosione del secondo cubetto



Figura 22. Riduzione presenza di macchioline nere nella massa e sulla superficie dei cubi esplosi

Nella tabella 12 sono sinteticamente riportate le evidenze sperimentali in riferimento allo spalling, registrate con il trattamento con temperatura massima di 500 °C e rampa R3.

Trattamento Tmax=500 °C - Rampa R3				
CODICE	04-FBT	07-FBT	08-FBT	09-FBT
%	100%	0%	0%	0%

Tabella 12. Percentuale cubi con fenomeno di spalling per il Materiale base 07-FB

Per quanto riguarda le resistenze a compressione, nei limiti della bassa numerosità dei dati della sperimentazione svolta al momento, sembra che oltre al miglioramento allo spalling, l'additivazione delle fibre non riduca le resistenze meccaniche rispetto a quelle del materiale base.

Nella Tabella 13 sono sinteticamente riportati i valori di resistenza a compressione registrati. Nella figura 23 sono riportate le riduzioni percen-

tuali registrate in confronto con la resistenza a compressione dei cubi non trattati.

Trattamento Tmax=500 °C - Rampa R3 (stag. 180 gg)			
CODICE	Rc (20 °C)	Rc a caldo [MPa]	Rc residua [MPa]
	non trattato		
04-FBT	74,49	esploso	esploso
07-FBT	77,76	73,51	63,33
08-FBT	62,27	53,87	46,67
09-FBT	78,91	67,78	61,42

Tabella 13. Resistenza cubi calcestruzzi con fibre

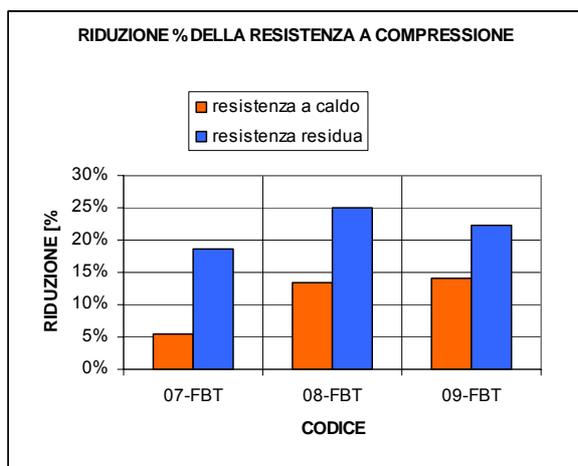


Figura 22. Riduzione percentuale della resistenza a compressione (Tmax= 500 °C – rampa R3)

5. DISCUSSIONE E PRIME CONCLUSIONI

La sperimentazione sviluppata ha permesso di definire un calcestruzzo bianco ad alta resistenza, realizzato con cemento fotocatalitico e aggregato calcereo, le cui proprietà allo stato fresco sono quelle di un autocompattante. Dal mix base sono derivati degli ulteriori mix ottenuti con l'aggiunta di fibre in polipropilene. Il dosaggio delle fibre è stato ottimizzato in relazione alla necessità di conservare anche per questi mix le proprietà di un SCC. Per le proprietà allo stato indurito, in generale i mix ottenuti con l'aggiunta di fibre hanno, ad eccezione del mix 08-FBT, evidenziato proprietà meccaniche analoghe a quelle del mix di base. Il mix 08-FBT, che è stato ottenuto dal mix di base aggiungendo delle fibre in polipropilene del tipo fbrasol-2P di lunghezza 12 mm, evidenzia delle resistenze decisamente inferiori a quelle degli altri mix. In questo caso, infatti, l'aggiunta delle fibre, pur se ottimizzato, ha prodotto un mix con più elevata percentuale di aria inclusa e, quindi, una corrispondente minore massa volumica e una significativa riduzione del-

la resistenza a compressione e del modulo elastico.

Per quanto riguarda le proprietà fisico meccaniche riferite al materiale esposto alle alte temperature, la sperimentazione sin qui sviluppata permette di evidenziare una elevata sensibilità del materiale base al fenomeno dello spalling. Il fenomeno si è presentato, infatti, indipendentemente dalla rampa di gradiente termico adottata per i cicli termici con temperatura massima pari a 500 °C. Anzi, contrariamente a quanto indicato in letteratura [06], sembra che il materiale base evidenzia una maggiore sensibilità nei riguardi dei cicli termici più lenti (Rampa 3).

Per quanto riguarda il comportamento alle alte temperature dei materiali con fibre in polipropilene, la sperimentazione, seppure limitata ad un solo ciclo di trattamento, permette di evidenziare il miglioramento del comportamento allo spalling di tali materiali. Eccezione deve essere fatta per il mix 04-FBT, ottenuto additivando il materiale base con fibre in polipropilene indicate con la sigla F-206 che, pur se con lunghezza e un dosaggio analogo a quello impiegato negli altri mix, presentano un diametro notevolmente superiore (circa 6 volte maggiore) del diametro delle altre fibre in polipropilene impiegate.

Tale circostanza, oltre a comportare una distribuzione meno diffusa delle fibre all'interno della massa (a parità di dosaggio si ha un numero inferiore di fibre) tale da rendere meno efficace il reticolo discreto realizzato dai vuoti ottenuti con la vaporizzazione delle fibre, sembra determinare una diversa combustione delle stesse che impedisce la loro completa vaporizzazione testimoniata dai residui della combustione (macchioline nere) presenti nella massa dei provini trattati.

Per quanto riguarda le resistenze a compressione, nei limiti di validità di un confronto relativo fra i mix in studio, la sperimentazione svolta evidenzia come la presenza delle fibre in polipropilene, oltre a migliorare il comportamento allo spalling sembra, per alcuni mix, addirittura migliorare il comportamento meccanico del materiale evidenziato da valori di riduzione della resistenza con la temperatura minori di quelli osservati per il materiale base.

Per quanto riguarda le resistenze a compressione, la sperimentazione svolta per i provini trattati con temperatura massima pari a 250 °C, ha evidenziato delle riduzioni di resistenza a caldo e residua (Figg. 16, 17 e 18), rispetto alla resistenza del materiale non trattato, comparabili con quelle registrate in letteratura [1-6] per i materiali non SCC, ordinari e ad alta resistenza.

I risultati delle riduzioni di resistenza osservate nel caso dei provini trattati con temperatura massima di 500 °C, sembrano, invece, evidenziare delle riduzioni minori rispetto alle analoghe ri-

duzioni registrate in letteratura per i materiali non SCC, ordinari e ad alta resistenza.

Tale circostanza potrebbe essere legata al tipo di trattamento non uniforme a cui sono stati sottoposti i provini. In ogni caso, i risultati conservano una validità completa di confronto con i risultati registrati per i mix con fibre.

6. SVILUPPI FUTURI

Il programma di ricerca prevede lo sviluppo della sperimentazione con l'esecuzione dei cicli di trattamento termico dei materiali con fibre sia con riferimento al fenomeno dello spalling che con riferimento alla riduzione delle proprietà meccaniche con la temperatura. Allo scopo, oltre alle prove in forno orizzontale con irraggiamento prevalentemente unidirezionali sono previste dei cicli termici con un forno che permetta l'applicazione della azione termica in modo che i provini si riscaldino in modo uniforme.

La ricerca si svolge in ambito delle attività previste dal contratto di ricerca fra il Consorzio CIS-E e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico Milano, dal titolo "Caratterizzazione fisico-Meccanica di calcestruzzi bianchi autopompattanti realizzati con cemento fotocatalitico".

7. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Professori Antonio Migliacci e Alberto Franchi, che, in qualità di Presidente e di Segretario del Consorzio CIS-E, hanno ritenuto di finanziare la sperimentazione prevista dal programma di ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- [01] **HOFF G. C., BILODEAU A. MALHOTRA V. H.**, "Elevated Temperature Effects On Hsc Residual Strength", Concrete Int., April 2000, pp. 41-47.
- [02] **PHAN L. T., CARINO N. J.**, "Review of mechanical properties of hsc at elevated Temperature", J. Mat. Civ. Eng. Feb. 1998, pp. 58-64.
- [03] **PHAN L. T.**, "Fire performance of high strength concrete: a report of the state-of-the-art", NIRST 5934, dec. 1996, p. 105.
- [04] **PURKISS J. A.**, "High strength concrete and fire", Concrete, march. 200, pp. 49-50.
- [05] **RILEM** "Properties of materials at high temperatures: Concrete" Ed. By U. Schneider, Publ. by the dept of civil Eng. Of the University of Kassel (Kassel Germany)1985 , pag. 131.
- [06] **BAZANT Z. P., KAPLAN M. F.**, "Concrete At High Temperatures: Material Properties And Mathematical Models", Longman, Halow, 1996.
- [07] **FELICETTI R., GAMBAROVA P.G.** "Effects Of High Temperature On The Residual Compressive Strength Of High Strength Concretes" ACI, Mat. Journal, Vol. 95, N. 4, 1998, pp. 395-406
- [08] **GAMBAROVA P.G., GUERRINI G. L., ROSATI G. P.**, "Microstructure of High-strength Concrete Subjected to High Temperature" Proceedings of the Workshop FIRE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURE: WHAT NOW? WHAT NEXT?" Milan University of Technology, Milano 2-3- December 2004, ed. Starrylink pp.83-93.
- [09] **BAMONTE P., CANGIANO S., GAMBAROVA P.G.**, " Thermal And Mechanical Characterization Of A High Performance Micro-Concrete, FIB 2006, NAPOLI.
- [10] **ACITO M., GAMBAROVA P.G., GUERRINI G.L. MICHELETTI V.**, "Correlazione fra le proprietà fisiche e meccaniche di HSC con riferimento alle alte temperature", 13° Congresso CTE 2000, Pisa, V. 1.
- [11] **KALIFA P., CHÉNEÉ G. AND GALLÉ C.** "High Temperature Behavior of HPC with Polypropylene Fibres from Spalling to Microstructure", Cement and Concrete Research, V. 31, 2001, pp. 1487-1499.
- [12] **CASSAR L.**, "Photocatalysis of cementium materials: clean building and clean air", MRS Bulletin, 2004.
- [13] **ASSOBETON UNI 9502/2001** Guidelines

*ing. ACITO MAURIZIO, Ricercatore del settore ICAR09 al Politecnico di Milano.
acito@stru.polimi.it*