

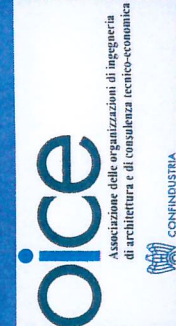
Workshop "The New Boundaries of Structural Concrete", organized at the University of Salerno (Italy) in April 2010, arises from a joined initiative between this University and American Concrete Institute (ACI) Italy Chapter.

The workshop has been articulated by organizing the over 40 lectures in four different sessions. These sessions are listed below by following the chronological order scheduled in the workshop program:

- Session A – Performance and life-cycle costs of new concrete structures
- Session B – Controlled-performance concrete
- Session C – New Scenarios for concrete
- Session D – Concrete quality control on site

The proceedings volume collects the latest advances of the research in the above mentioned topics and so, is addressed not only to members of the scientific community but also to representatives of the industry and to professionals directly involved in the design and construction of new structures and in the retrofitting of existing ones.

The workshop has been sponsored by General Admixtures, Irpinia Calcestruzzi and OICE



# THE NEW BOUNDARIES OF STRUCTURAL CONCRETE

CUES

1st Workshop on

# THE NEW BOUNDARIES OF STRUCTURAL CONCRETE

editors

A. Grimaldi, G. Plizzari, R.Realifonzo





©Copyright Edizioni Cues  
ISBN 978-88-95028-55-2

Finito di stampare nel  
mese di settembre 2010

---

Questa opera è protetta dalla Legge sul diritto d'autore.

(Legge n. 633/1941: [http://www.giustizia.it/cassazione/leggi/1633\\_41.html](http://www.giustizia.it/cassazione/leggi/1633_41.html)).

Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla citazione, alla riproduzione in qualsiasi forma, all'uso delle illustrazioni, delle tabelle e del materiale software a corredo, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla registrazione analogica o digitale, alla pubblicazione e diffusione attraverso la rete Internet sono riservati, anche nel caso di utilizzo parziale. La riproduzione di questa opera, anche se parziale o in copia digitale, è ammessa solo ed esclusivamente nei limiti della Legge ed è soggetta all'autorizzazione dell'Editore.  
La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla Legge.

©CUES 2010

Via Ponte Don Melillo

84084 Fisciano – SALERNO

Tel. 089964500 pbx, Fax 089964360

[www.cues.it](http://www.cues.it), [info@cues.it](mailto:info@cues.it)

<b>Experimental study on the long-term behaviour of cracked steel- and synthetic-fibre reinforced concrete beams.....</b>	<b>99</b>
<i>Buratti N., Mazzotti C., Savoia M.</i>	
<b>FEM analysis of reinforcement corrosion effects on RC members degradation.....</b>	<b>107</b>
<i>Lignola G.P., Menichino G.P., Montuori M., Bellucci F., Cosenza E., Manfredi G.</i>	
<b>Crack control of tunnel linings using steel fibre reinforced concretes.....</b>	<b>115</b>
<i>Buratti N., Ferracuti B., Savoia M.</i>	
<b>Session B – Controlled-performance concrete</b>	
Sessione B – Calcestruzzi a prestazione controllata	
<b>Self consolidating high performance SFRC: from material concept towards structural applications.....</b>	<b>125</b>
<i>Ferrara L., di Prisco M.</i>	
<b>Sul comportamento residuale di calcestruzzi autocompattanti esposti alle alte temperature.....</b>	<b>133</b>
<i>Acito M., Bamonte P.</i>	
<b>The use of a shrinkage compensating concrete for the construction of the slab foundation of a two-storey car park in the new S. Anna Hospital in Como.....</b>	<b>141</b>
<i>Troli R., Maringoni S.</i>	
<b>The ductility of SISMABETON under multiaxial compression.....</b>	<b>149</b>
<i>Chiaia B., Fantilli A.P., Vallini P.</i>	
<b>Innovative applications of steel fibre reinforced concrete in precast structures: non-linear finite element analyses for reinforcement optimization.....</b>	<b>157</b>
<i>Facconi L., Plizzari G.A.</i>	
<b>Fiber reinforced concrete slabs under punching shear.....</b>	<b>165</b>
<i>Grimaldi A., Meda A., Rinaldi Z.</i>	
<b>Behavior in compression of lightweight fiber reinforced concrete with hooked steel fibers and transverse steel reinforcement.....</b>	<b>173</b>
<i>Campione G., Cucchiara C., La Mendola L.</i>	
<b>Fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete.....</b>	<b>181</b>
<i>Germano F., Plizzari G.A.</i>	



## Sul Comportamento Residuale di Calcestruzzi Autocompattanti Esposti alle Alte Temperature

M. Acito<sup>1</sup> e P. Bamonte<sup>2</sup>

**ABSTRACT:** In questo lavoro si illustrano i risultati preliminari di un programma di ricerca, tuttora in corso presso il Politecnico di Milano, avente per oggetto la caratterizzazione alle alte temperature di due calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni/alta resistenza ( $f_{c20} = 65$  e  $85$  MPa, rispettivamente con aggregati silicei e calcarei). In questa fase della ricerca, l'attenzione si è focalizzata sul comportamento a compressione in condizioni residuali, ossia a seguito di esposizione a temperature comprese nell'intervallo tra 20 e 600°C. Le prove di caratterizzazione meccanica sono state completate con misurazioni di velocità ultrasonica sui provini, al fine di individuare una possibile correlazione tra il danneggiamento termico misurato mediante prove distruttive (tipiche dell'attività di laboratorio), e quello valutato tramite prove non distruttive. I risultati ottenuti in termini di decadimento delle proprietà meccaniche, costituiscono un arricchimento della base di dati sul tema, e evidenziano un soddisfacente accordo con i modelli di comportamento disponibili in letteratura per calcestruzzi ordinari, nonché con prove analoghe effettuate in precedenza.

### 1 INTRODUZIONE

È noto che il calcestruzzo presenta generalmente un buon comportamento nei riguardi dell'esposizione alle alte temperature. Tuttavia, la continua introduzione di nuovi materiali a base cementizia, ed in particolar modo l'avvento dei calcestruzzi autocompattanti (SCC – Self-Consolidating Concrete) ha determinato l'esigenza di nuove ricerche, soprattutto ai fini di indagare il loro comportamento nei riguardi di tutti gli aspetti strutturali e microstrutturali, tra i quali anche quelli legati all'esposizione alle alte temperature.

Tale esigenza risulta tanto più sentita quanto più le caratteristiche di resistenza meccanica degli SCC si avvicinano a quelle proprie dei calcestruzzi ad alta resistenza (HSC – High-Strength Concrete). In letteratura sono infatti numerosi gli studi sperimentali (Hoff et al. 2000, Phan e Carino 1998, RILEM 1985, Bazant e Kaplan 1996) dai quali si evince come i calcestruzzi caratterizzati da elevate prestazioni meccaniche siano tendenzialmente più sensibili agli effetti delle alte temperature rispetto ai calcestruzzi a normal resistenza.

Nel caso dei calcestruzzi autocompattanti ad alta resistenza, invece, non sono disponibili altrettanti dati sperimentali, sia in termini di proprietà termiche, sia per quel che concerne le proprietà meccaniche a seguito dell'esposizione alle alte temperature. Pure limitati sono gli studi sperimentali che evidenziano se il ruolo fondamentale che assumono le caratteristiche chimico-fisiche degli aggregati e della matrice, nel determinare le proprietà termiche e meccaniche dei calcestruzzi ordinari e ad alta resistenza (Felicetti e Gambarova 1998, Gambarova et al. 2004) venga, o meno, confermato anche per i calcestruzzi autocompattanti.

<sup>1</sup> Ricercatore, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

<sup>2</sup> Ricercatore, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano



In tale contesto si inquadra lo sviluppo di una ricerca condotta al Politecnico di Milano per la caratterizzazione del comportamento termico e meccanico di due calcestruzzi autocompattanti speciali, la cui formulazione è stata sviluppata in collaborazione con i laboratori Italcementi di Brindisi. In particolare, i calcestruzzi studiati sono stati formulati con riferimento a peculiari richieste prestazionali.

Il primo è di colore bianco ( $f_c = 85$  MPa), ed è quindi adatto alla realizzazione di superfici "faccia vista", con notevole qualità superficiale, e caratterizzato dall'essere alla base della formulazione del calcestruzzo foto catalitico, recentemente sviluppato da Italcementi (Cassar 2004), noto per le sue proprietà "autopulenti", dovute all'aggiunta di biossido di titanio. Il secondo, di colore grigio ( $f_c = 68$  MPa), adatto per getti massivi, e caratterizzato quindi da un basso calore d'idratazione.

Le principali prestazioni richieste a tali calcestruzzi riguardavano:

- il mantenimento delle proprietà caratteristiche tipiche dei calcestruzzi SCC per almeno 60 minuti;
- un'elevata resistenza a compressione ( $f_c \geq 65$  MPa);
- un elevato modulo elastico ( $E_c \geq 40000$  MPa).

La caratterizzazione, svolta nel 2006, ha riguardato, quindi, sia la fase fresca che la fase indurita. Nella fase fresca, particolare attenzione è stata rivolta all'ottimizzazione dei calcestruzzi sia in riferimento alle proprietà reologiche, che alle caratteristiche meccaniche della fase indurita. Con riferimento alla fase indurita del calcestruzzo bianco, la sua caratterizzazione alle alte temperature ha avuto inizio con una campagna di prove di sensibilità allo spacco esplosivo (*spalling*) svolta nel 2006. I risultati di tale campagna di prove sono riportati in Acito et al. (2006); in questa sede ci si limiterà a richiamare sommariamente i principali risultati ottenuti nella prima campagna di prove, così da poter proporre dei confronti con i risultati ottenuti con la seconda campagna di prove, iniziata nel 2009 e tuttora in corso, i cui risultati sono presentati nella presente memoria. In aggiunta alla prima campagna di prove, svolta con riferimento a tempi massimi di maturazione dei calcestruzzi dell'ordine di 180 giorni, sono state svolte ulteriori prove di caratterizzazione che hanno riguardato la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei due calcestruzzi dopo circa 1500 giorni di stagionatura in camera umida a 20 °C. In questo caso, le prove svolte in questa seconda campagna di prove hanno riguardato le proprietà meccaniche residuali di entrambi i calcestruzzi (bianco e grigio) dopo l'esposizione uniforme alle alte temperature anche in questo caso secondo tre diversi cicli termici (caratterizzati dalle temperature massime di 200, 400 e 600°C).

## 2 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI ALLO STATO FRESCO ED INDURITO

### 2.1 Calcestruzzo bianco

Per la realizzazione degli impasti è stato utilizzato il cemento tipo I 52.5R Italbiano della cementeria Italcementi di Rezzato, e un additivo polimerico a base carbosilica (Cre-active 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.

Il mix design è riportato in tabella 1, l'assortimento in curva degli aggregati, ottimizzati rispetto alla curva di riferimento di Bolomey.

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 ( $T=20\pm 3^\circ\text{C}$ ; U.R.>90%) per almeno 28 giorni dalla data di get-

to, prima della loro caratterizzazione. Sono stati effettuati anche controlli a giorni di stagionatura intermedi.

## 2.2 Calcestruzzo grigio

Anche per l'impasto del calcestruzzo grigio è stato utilizzato il cemento tipo I 52.5R della cementeria Italcementi di Rezzato e lo stesso additivo polimerico a base carbossilica (Creactive L/B) prodotto da Axim. Il mix design è riportato in Tabella 2.

Tabella 1. Mix-design bianco.

CEM 52,5R I [kg/m <sup>3</sup> ]	450
Polvere CR [kg/m <sup>3</sup> ]	554
CR 1 [kg/m <sup>3</sup> ]	415
CR 3 [kg/m <sup>3</sup> ]	319
CR5 [kg/m <sup>3</sup> ]	387
Acqua/Cemento	0.45
Additivo	CRTV-LB
Additivo [% su cemento]	1.045

Tabella 2. Mix-design grigio

CEM 52,5R I [kg/m <sup>3</sup> ]	200
Sabbia (0-3) [kg/m <sup>3</sup> ]	772
Ghialno 108 Sataf [kg/m <sup>3</sup> ]	263
Ghialetto 109 Sataf [kg/m <sup>3</sup> ]	278
Ghiala 10-20 Sataf [kg/m <sup>3</sup> ]	351
Loppa finemente macinata [kg/m <sup>3</sup> ]	300
Legante (Cemento + Loppa) [kg/m <sup>3</sup> ]	500
Acqua/Cemento	0.88
A/(Cemento+Loppa)	0.35
Acqua efficace [l/m <sup>3</sup> ]	175
Additivo	CRTV-LB
Additivo [% su legante.]	0.456

## 3 RISULTATI DELLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE ALLO STATO FRESCO

### 3.1 Proprietà dello stato fresco del bianco

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 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 Figura 1. Risultati analoghi sono stati ottenuti sul calcestruzzo bianco.

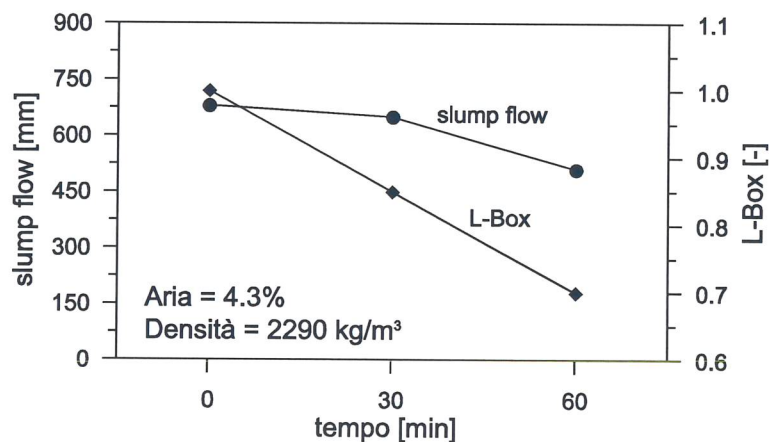


Figura 1. Misure di lavorabilità sul calcestruzzo grigio.



#### 4 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI IN CONDIZIONI RESIDUALI

Nelle prove eseguite, i provini sono stati sottoposti a cicli termici per simulare l'esposizione uniforme alle alte temperature. Il riscaldamento è avvenuto con un forno elettrico del Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano.

I cicli termici a cui sono stati sottoposti i provini sono stati eseguiti applicando un riscaldamento omogeneo e mantenendo la temperatura massima prevista (200 °C, 400 °C e 600 °C), per 2 ore, così da garantire il raggiungimento di una temperatura uniforme nel provino.

Le rampe di riscaldamento adottate nei cicli termici prevedono un riscaldamento di 1°C/min in fase ascendente, e un raffreddamento di 0.25°C/min, in fase discendente. Al raggiungimento di una temperatura di circa 80°C, il forno è stato aperto, ed il raffreddamento è proseguito in modo naturale.

Le rampe di riscaldamento adottate non sono sicuramente rappresentative degli elevati gradienti di riscaldamento caratteristici di un incendio reale (che raggiungono anche i 10°C/min), ma si rendono necessarie per evitare l'insorgere di elevate differenze di temperatura tra la superficie e il cuore del provino, con il conseguente pericolo di elevate autotensioni (Felicetti e Gambarova 1998). Una velocità di riscaldamento contenuta è inoltre necessaria per evitare il fenomeno dello spalling, che nei calcestruzzi autocompattanti tende a verificarsi anche a basse velocità di riscaldamento.

Effettivamente, nella prima campagna di prove, si è evidenziata nel calcestruzzo bianco, esposto alle alte temperature in modo unidirezionale, un'elevata sensibilità al fenomeno dello spalling. Il fenomeno si è presentato, infatti, indipendentemente dalla rampa di riscaldamento adottata per i cicli termici con temperatura massima pari a 500 °C. Peraltro, contrariamente a quanto indicato in letteratura (Bazant e Kaplan 1996), nei limiti della numerosità contenuta delle prove eseguite nella prima campagna di prove, sembra che il materiale evidenzia una maggiore sensibilità nei riguardi dei cicli termici più lenti.

Peraltro, nella precedente campagna sperimentale, l'aggiunta di fibre polipropilene alla miscela base, ha migliorato il comportamento alle alte temperature del calcestruzzo bianco in termini di spalling, senza modificarne le caratteristiche di resistenza a compressione a caldo, sistematicamente inferiore rispetto alla resistenza residuale. Tale dato, in controtendenza rispetto a quanto osservato generalmente in letteratura nei calcestruzzi vibrati, ordinari e ad alta resistenza, è molto probabilmente legato al tipo di trattamento termico non uniforme (esposizione unidirezionale) a cui sono stati sottoposti i provini nella prima campagna di prove. Tale esposizione, soprattutto nelle prove a caldo, tende ad esaltare la non omogeneità di danneggiamento termico, come evidenziato dai rilievi ultrasonici riportati in Acito et al. (2006).

A differenza della prima fase, nella seconda campagna di prove, la caratterizzazione ha riguardato esclusivamente le condizioni residuali: si è provveduto ad indagare la resistenza a compressione, il modulo elastico (statico e dinamico), nonché i legami sforzo-deformazione in compressione. Alle temperature più basse (20 e 200°C), ove il comportamento del calcestruzzo tende ad essere più fragile, sono state condotte prove di modulo elastico statico-stabilizzato, e prove di compressione in controllo di carico. I provini più danneggiati dall'alta temperatura (ossia quelli esposti a T = 400 e 600°C) sono stati invece sottoposti a prove in controllo di spostamento, che hanno consentito la misurazione delle curve sforzo-deformazione.

##### 4.1 Misura della perdita di massa

L'esposizione del calcestruzzo a temperature elevate comporta una serie di trasformazioni chimico-fisiche che dipendono dalla natura del materiale indagato. Comune a tutti i tipi di calcestruzzo è la perdita di massa, associata in gran parte all'essiccamento, e dunque alla perdita dell'acqua non coinvolta nel processo di idratazione.

Al fine di valutare tale perdita nel caso in esame, sono state effettuate operazioni di pesatura sui provini, prima e dopo i cicli termici. Le operazioni di pesatura sono state effettuate

sempre una settimana dopo la fine del ciclo termico, al fine di garantire il raggiungimento di una situazione stabilizzata. I risultati sono sintetizzati in Figura 2a. La densità del calcestruzzo grigio decresce in modo pressoché perfettamente lineare all'aumentare della temperatura di esposizione. Per il calcestruzzo bianco, invece, la perdita di densità tende a diminuire con l'aumento della temperatura, con un andamento analogo a quello del grigio fra 200 e 400°C. Da un confronto fra i dati ottenuti e le prescrizioni dell'Eurocodice 2 (2005), si nota come i calcestruzzi indagati presentino una perdita di massa lievemente superiore, ma comunque sostanzialmente in linea, a quella suggerita in normativa.

#### 4.2 Misura della velocità

Il rilievo delle velocità degli ultrasuoni per i vari livelli di danneggiamento termico è sintetizzato in Figura 2b. L'andamento decrescente della velocità in funzione della temperatura è indice di un degrado del materiale. Il calcestruzzo bianco presenta valori di velocità, e quindi di omogeneità interna, maggiori del grigio. La variazione è pressoché la stessa per entrambi i calcestruzzi fra 0 e 200°C. Successivamente il grigio ha un comportamento pressoché lineare tra 200 e 600°C, con pendenza maggiore che nel primo tratto, mentre il bianco mostra una perdita più contenuta. In particolare, per il calcestruzzo grigio, si nota un forte calo in corrispondenza dei 600°C, probabilmente dovuto alla trasformazione allotropica del quarzo (per  $T = 573^\circ\text{C}$ ) contenuto negli aggregati silicei. Dall'analisi dei provini grigi esposti a 400 e 600°C si è notata infatti una consistenza più "friabile" della pasta cementizia, rispetto a quanto rilevato per i provini in calcestruzzo bianco.

Si deve peraltro rilevare come misurazioni di velocità ultrasonica fossero state condotte anche nella prima campagna di prove, con risultati analoghi a quelli qui illustrati.

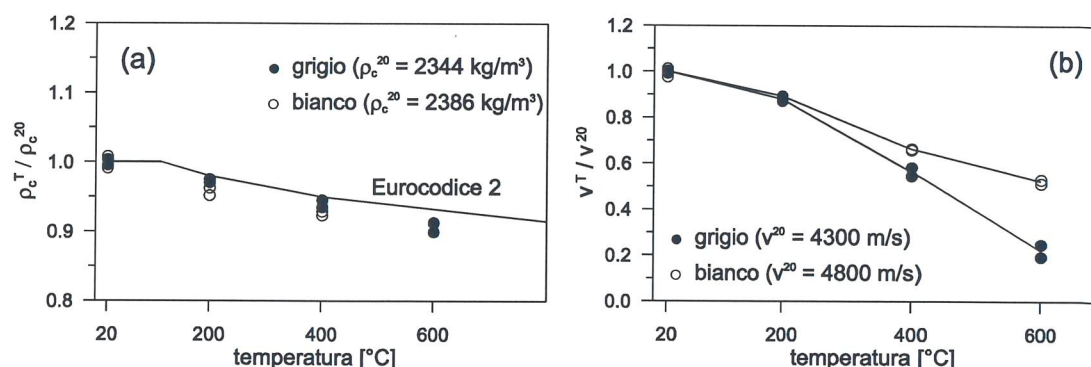


Figura 2. a) Variazione della densità relativa in funzione della massima temperatura raggiunta; b) variazione della velocità relativa in funzione della massima temperatura raggiunta.

#### 4.3 Modulo elastico dinamico e statico

I dati sulla velocità e sulla densità consentono di valutare il decadimento del modulo elastico dinamico in funzione della temperatura. In letteratura sono proposte diverse relazioni tra il modulo elastico dinamico e la velocità degli ultrasuoni, la densità del campione e il modulo di Poisson. Per una prima stima del modulo elastico dinamico si è scelto di utilizzare la relazione:

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

Dai risultati riportati in Figura 3a, si osserva come il modulo elastico dinamico normalizzato risulti, a parità di trattamento termico, sempre maggiore nei provini realizzati con il calcestruzzo bianco. Il decadimento relativo è comunque simile per i due calcestruzzi a



tutte le temperature, e tende ad essere più accentuato nell'intervallo tra 200 e 400°C. Oltre i 400°C si nota come le due curve tendano ad allontanarsi maggiormente, in perfetta analogia a quanto osservato per i rilievi di velocità ultrasonica, con il calcestruzzo grigio che presenta un decadimento decisamente più accentuato. In assenza di curve da normativa di riferimento, per i calcestruzzi autocompattanti, si sono messe a confronto le due curve sperimentali con la curva a due tratti proposta da Chang et al. (2005) per la valutazione delle caratteristiche residuali. Si noti come l'accordo tra il decadimento del modulo elastico del calcestruzzo grigio e la curva in questione sia pressoché perfetto, mentre il calcestruzzo bianco confermi la propria minore sensibilità (almeno per quel che riguarda il modulo elastico) alle alte temperature. Si registra comunque come l'espressione utilizzata fornisca valori assoluti di modulo dinamico molto elevati, anche per calcestruzzi di resistenza elevata, quali quelli qui indagati.

I valori di modulo elastico dinamico sono stati confrontati con i valori di modulo elastico statico. Per i provini in condizioni vergini e per quelli danneggiati a  $T = 200^\circ\text{C}$  è stato possibile misurare solo il modulo elastico statico stabilizzato, secondo le procedure standardizzate. Per i provini assoggettati a cicli termici con temperatura massima di 400 e 600°C, per i quali è stato possibile effettuare le prove di compressione in controllo di spostamento tra il modulo elastico ricavato dalle curve sforzo-deformazione e quello statico-stabilizzato, osservando una buona corrispondenza dei valori. In termini assoluti i valori misurati sono inferiori ai corrispondenti valori di modulo dinamico. Il decadimento relativo in funzione della temperatura (Figura 3b), al contrario, è analogo a quello del modulo elastico dinamico mostrato in precedenza. Si noti come il decadimento del modulo elastico valutato per via statica del calcestruzzo bianco si avvicini molto a quello del calcestruzzo grigio, a differenza di quanto osservato in precedenza.

Il confronto fra i dati ottenuti e quelli relativi a ricerche precedenti effettuate rispettivamente da Persson (2004) e da Bamonte e Gambarova (2008), su calcestruzzi autocompattanti simili a quelli trattati in questa indagine, evidenzia un accordo pressoché perfetto, soprattutto per il calcestruzzo grigio. Anche l'equazione a due tratti proposta da Chang (2005) interpreta bene le misure effettuate.

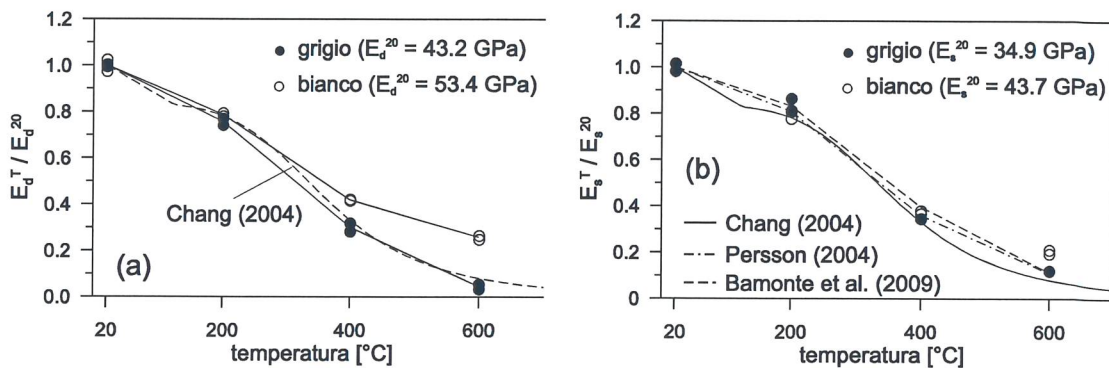


Figura 3. a) Variazione del modulo elastico dinamico (normalizzato rispetto al valore misurato in condizioni vergini) in funzione della massima temperatura raggiunta; b) Variazione del modulo elastico dinamico in funzione della massima temperatura raggiunta.

#### 4.4 Resistenza a compressione e curve sforzo-deformazione

Nel grafico di Figura 4 a) è mostrato il decadimento relativo della resistenza a compressione in funzione della massima temperatura raggiunta durante il ciclo termico. Si deve osservare come la forte disparità tra i valori ottenuti sul bianco a 20°C può essere dovuta alla presenza di un dato anomalo. In ogni caso, anche se questo valore fosse eccessivo, il bianco a 20°C ha comunque una resistenza a compressione maggiore del grigio.

Il decadimento del calcestruzzo bianco è pressoché lineare. Il calcestruzzo grigio sembra invece non risentire del ciclo termico sino a 200°C; da questo punto in poi ha un andamento del tutto simile a quello del bianco, con valori confrontabili, mantenendo dopo il ciclo a 600°C una resistenza relativa lievemente maggiore. In Figura 4 a) sono riportati a titolo di confronto i risultati ottenuti rispettivamente da Persson (2004) e da Bamonte e Gambarova (2008), su calcestruzzi autocompattanti e ad alte prestazioni aventi classe di resistenza analoga a quella dei calcestruzzi indagati nel presente progetto di ricerca. In questo caso si osserva come il calcestruzzo grigio sia in linea con i dati di Persson, mentre il calcestruzzo bianco, che contiene aggregato calcareo, presenti valori di resistenza di picco in linea con i dati di Bamonte e Gambarova. In ogni caso, tutti i risultati sono inferiori a quanto previsto dall'Eurocodice 2 (banda grigia in Figura 4a) per le resistenze "a caldo", come era lecito attendersi.

Nella figura 4b) è riportato l'andamento dello sforzo-deformazione in funzione della massima temperatura raggiunta. Dai diagrammi relativi al calcestruzzo bianco, a differenza del calcestruzzo grigio, si osserva un comportamento anomalo rispetto ai dati sperimentali caratterizzati da deformazioni di picco via via crescenti con la massima temperatura raggiunta. Nel caso studiato, la deformazione di picco del bianco si mantiene costante al variare della temperatura. Tale circostanza può essere spiegata in ragione della maggiore sensibilità al danneggiamento termico della resistenza a compressione rispetto al modulo elastico. Tale aspetto, che potrebbe essere legato alla presenza di aggregato calcareo, per sua natura meno sensibile alle alte temperature, rispetto all'aggregato siliceo, richiede un ulteriore approfondimento.

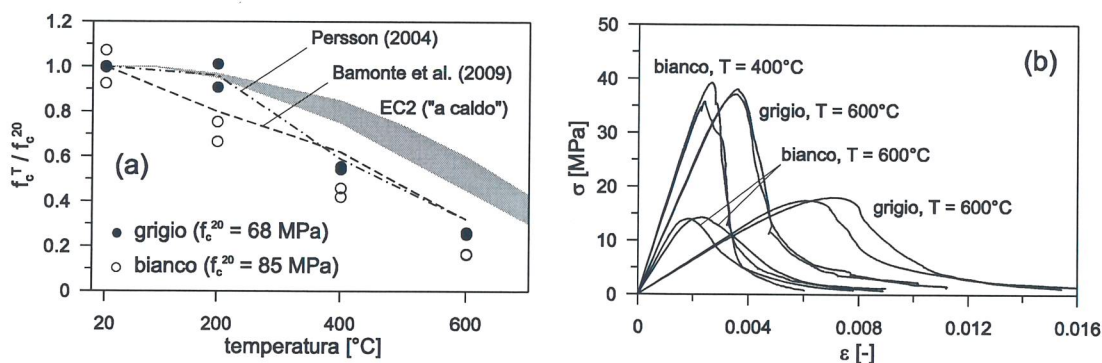


Figura 4. a) Variazione della resistenza a compressione (normalizzato rispetto al valore misurato in condizioni vergini) in funzione della massima temperatura raggiunta; b) Variazione del legame sforzo-deformazione in funzione della massima temperatura raggiunta.

## 5 CONCLUSIONI

In accordo con quanto riportato in letteratura, si osserva un degrado delle proprietà meccaniche residuali del calcestruzzo con l'aumento della temperatura di esposizione. In termini di resistenza a compressione, il calcestruzzo grigio, caratterizzato dalla presenza di aggregati di tipo siliceo, non sembra risentire del ciclo termico a 200°C in termini di resistenza di picco. Il calcestruzzo bianco, ad aggregato calcareo, sembrerebbe invece essere più sensibile alle alte temperature.

Il confronto dei valori di modulo elastico dinamico e statico evidenzia, in accordo a quanto riportato in letteratura, come il rapporto tra questi sia sempre maggiore dell'unità, tranne che per i provini grigi sottoposti al ciclo termico a 600°C.

Dai diagrammi sforzo-deformazione relativi al calcestruzzo bianco, a differenza del calcestruzzo grigio, si osserva un comportamento anomalo con riferimento alla deformazione di picco, che si mantiene costante al variare della temperatura. Tale aspetto potrebbe essere legato alla presenza di aggregato calcareo, per sua natura meno sensibile alle alte temperature, rispetto all'aggregato siliceo.



Va sottolineata una lieve discrepanza che spesso si individua fra i risultati ottenuti e le prescrizioni da normativa, che non tratta separatamente i calcestruzzi tradizionali dagli autocompattanti e che spesso si riferisce a prove effettuate a caldo.

Sebbene siano stati sottoposti a prova solo due campioni per tipo di calcestruzzo e temperatura di riferimento, i risultati mostrano una soddisfacente ripetibilità e uniformità di risultati.

La bontà dei risultati è confermata anche dal buon accordo tra i risultati ottenuti nel presente studio e precedenti campagne sperimentali su calcestruzzi analoghi.

Gli studi futuri, oltre ad aumentare la numerosità dei dati di decadimento delle resistenze di picco e dei moduli elastici, dovranno riguardare l'analisi del legame sforzo deformazione per calcestruzzi trattati alle alte temperature. Risulta inoltre di interesse il completamento della prima campagna di prove, con l'estensione del confronto fra le resistenze a caldo e le resistenze residuali in relazione al tipo di esposizione (uniforme o unidirezionale) e alle temperature di esposizione.

## 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Acito, M., Borsa, M., Cangiano, S., Rosati G.P. 2006. "Caratterizzazione Fisico-Meccanica Di Calcestruzzi Di Cemento Bianco Fotocatalitico, Autocompattanti E Ad Alte Prestazioni, Alle Alte Temperature", Atti del 16° Congresso CTE del 2006.

Bamonte, P., Gambarova, P.G. 2008. "Comportamento Meccanico di una Famiglia di Calcestruzzi Autocompattanti Esposti all'Alta Temperatura". Atti del 17° Congresso C.T.E., Roma, 5-8 Novembre 2008, pp. 347- 356.

Bazant, Z. P., Kaplan, M. F. 1996. „Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models". London: Longman (Addison-Wesley). 412 pp.

Cassar, L. 2004. "Photocatalysis of cementium materials: clean building and clean air", MRS Bulletin, 2004.

Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S., Yao, G.C. 2005. "Residual Stress-Strain Relationship for Concrete after Exposure to High Temperatures", Department of Architecture, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

Felicetti, R., Gambarova, P.G. 1998. "Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High Strength Concretes". ACI Materials Journal, Vol. 95, N. 4, 1998, pp. 395-406.

Gambarova, P.G., Guerrini, G. L., Rosati, G. P. 2004. "Microstructure of High-strength Concrete Subjected to High Temperature" Proceedings of the Workshop "Fire Design of Concrete Structures: What Now? What Next?" Milan University of Technology, Milano 2-3 December 2004, ed. Starrylink, pp. 83-93.

Hoff, G. C., Bilodeau, A., Malhotra, V. H. 2000. "Elevated Temperature Effects on HSC Residual Strength". Concrete International, April 2000, pp. 41-47.

Persson, B. 2004. "Fire Resistance of Self-Compacting Concrete – SCC". Materials and Structures-Matériaux et Constructions, Vol. 37, No. 11, pp. 575-584.

Phan, L. T., Carino, N. J. 1998. "Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature". ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 58-64.

RILEM 1985. "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, 131 pp.

UNI EN 1992-1-2 "Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo, Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio", UNI, Milano, 2005, 97 pp.