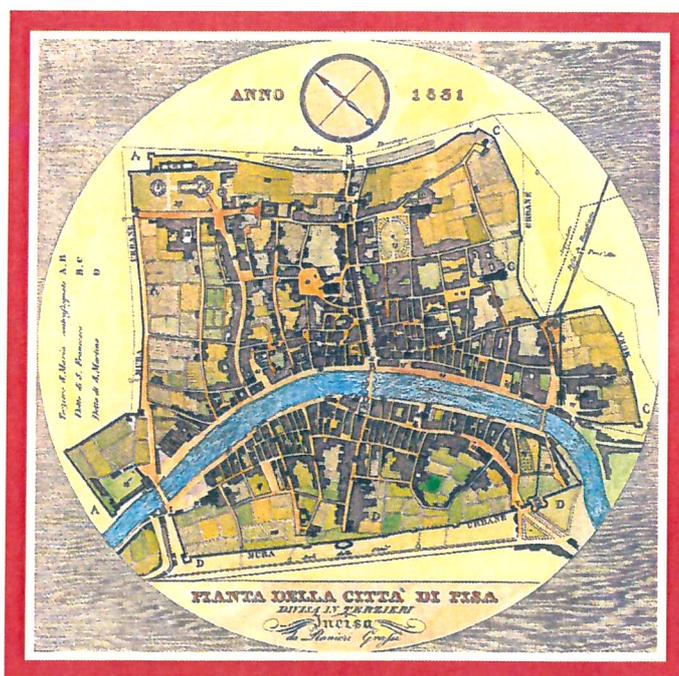




Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia

13° Congresso C.T.E.

Pisa, 9 - 10 - 11 Novembre 2000



Atti, volume 2

CORRELAZIONE FRA PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE DEI CALCESTRUZZI AD ELEVATA RESISTENZA NEI CONFRONTI DELLE ALTE TEMPERATURE

GIAN LUCA GUERRINI, VIRGINIA MICHELETTI
CTG Italcementi Group, Bergamo

MAURIZIO ACITO
Scuola di Specializzazione "F.lli Pesenti",
Politecnico di Milano

PIETRO GAMBAROVA
Politecnico di Milano

SUMMARY

The problem of the correlation between physical properties and mechanical properties in High Strength Concrete, exposed to high temperature tests, is discussed in this paper. Several mixes of High Strength Concrete (>100 MPa) were tested, after a single high-temperature cycle (250, 500 and 750°C), in order to evaluate the residual compressive strength and elastic modulus. Some of the mixes included polymeric fibers.

Later, the evaluation of the porosity was performed in order to establish a correlation between the porosity and the compressive strength.

1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo è normalmente considerato un materiale piuttosto resistente alle alte temperature ed al fuoco, ma con l'utilizzo crescente dei calcestruzzi ad alte ed altissime prestazioni (in inglese HPC e VHPC) e resistenze (HSC e VHSC), caratterizzati da una porosità molto ridotta, si pone il problema se essi mantengano un comportamento altrettanto buono di quello del calcestruzzo ordinario.

Infatti, numerosi studi sull'argomento [1-5] hanno mostrato che un calcestruzzo normale (NSC) se riscaldato fino a 300°C, perde circa il 25% della resistenza a compressione originaria e circa il 75% se riscaldato fino a 600°C. Al pari della resistenza a compressione, altre proprietà fisico-meccaniche (ad esempio il modulo elastico) risultano ridotte, a causa del danneggiamento della microstruttura dovuto alla formazione di

microdifetti. Comunque, le proprietà termiche in relazione alle alte temperature di trattamento dipendono principalmente dal tipo di aggregato utilizzato e dalla espansione termica relativa. Nel caso degli HPC/HSC, invece, si hanno delle matrici molto compatte, sia per i ridotti rapporti acqua/cemento che per la presenza di materiali ad attività pozzolanica (es. microsilice). In tal caso, quindi, la possibilità di fuoriuscita dell'umidità dal materiale (in seguito al riscaldamento) può diventare problematica, per cui si vengono ad avere sovrappressioni interne generate dal vapore imprigionato nei pori più piccoli ed isolati. Pertanto, pur continuando ad essere importante la scelta dell'aggregato (la cui natura chimico-fisica ne influenza la conducibilità termica [1-8]), negli HPC/HSC diviene determinante il comportamento della matrice cementizia, il cui spacco esplosivo (spalling) può indurre a deterioramento non solo dell'integrità del materiale, ma anche del buon comportamento strutturale.

Una soluzione spesso adottata per limitare lo spalling è quella di aggiungere fibre di polipropilene nella fase d'impasto, che uniformemente distribuite nella matrice; si fondono (a circa 160°C), parzialmente fondono e poi volatilizzano lasciando disponibile una certa porosità interna che accoglie il vapore [4, 9-10].

Con riferimento a calcestruzzi classe C100/115 MPa, additivati o meno con fibre organiche (polipropilene - PP e polivinilalcol-PVA), in questo lavoro ci si propone di studiare la correlazione fra alcune proprietà meccaniche e alcune proprietà fisiche significative (in particolare la porosità) in relazione a cicli di trattamento termici fino a 750°C.

In effetti, lo studio della variazione della struttura porosa del calcestruzzo in relazione ai trattamenti termici aiuta ad interpretare il meccanismo di danneggiamento del materiale con riduzione significativa delle sue proprietà meccaniche.

I risultati mostrano il differente comportamento dei due tipi di aggregato qui considerato, e l'effetto benefico dell'aggiunta delle fibre organiche. In tal modo è quindi possibile correlare la porosità e la resistenza meccanica dei calcestruzzi, secondo i modelli proposti in letteratura [11].

2. COMPOSIZIONE E PROPRIETÀ DELL'IMPASTO FRESCO

In questo lavoro sono stati considerati 7 impasti di calcestruzzo ad alta resistenza, alcuni dei quali contenenti differenti tipi fibre organiche.

Un primo gruppo di calcestruzzi (MIX 1-4) è stato preparato utilizzando cemento CEM I 52,5 R

Ultracem (Stabilimento di Scala di Giocca) ed aggregato calcareo dolomitico frantumato (zona di Sassari-Monte Alvaro), con diametro massimo 20 mm.

Un secondo gruppo di calcestruzzi (MIX 5-7) è stato preparato utilizzando cemento CEM I 52,5 R Ultracem (Stabilimento di Matera) ed aggregato calcareo frantumato di Fasano (Brindisi), con diametro massimo 15 mm.

Per tutti gli impasti sono stati utilizzati: microsilice in polvere non densificata Elkem 940 e additivo superfluidificante acrilico Superflux 2000 AC (Axim Italia). I calcestruzzi con fibre organiche differivano per composizione chimica e geometria delle fibre:

- PP monofilamento Fibrasol II P, L=19 mm
- PP fibrillato Crackstop, L=12 mm
- PVA monofilamento Kuralon, L=6 mm

Nelle Tabelle 1 e 2 sono riportate le caratteristiche degli impasti ottimizzati per poter ottenere le proprietà fisico-meccaniche di progetto (resistenza a compressione cubica maggiore di 100 MPa, consistenza S4-S5).

Il cedimento al cono (slump) delle diverse miscele è stato misurato alla fine del mescolamento, secondo quanto previsto dalla norma UNI 9418.

Dopo un'ora, tutti gli impasti avevano ancora una consistenza S3-S4. Il contenuto d'aria (UNI 6395) variava fra il 2,4 ed il 3,8%.

3. PROPRIETÀ MECCANICHE ALLO STATO INDURITO

Sono state eseguite prove di resistenza alla compressione (cubi di lato 100 mm, UNI 6132-72), e alla flessione (travetti di dimensioni 100x100x400 mm, UNI 6133).

Per tutte le miscele i valori di resistenza alla compressione a 28 giorni sono risultati superiori a 100 MPa (da 102 a 122 MPa). I valori di resistenza alla flessione a 28 giorni sono risultati compresi fra 10,5 MPa (MIX 1-3) e 12,2 MPa (MIX 5-6), mentre per il MIX 4 (con fibre di PVA) si è ottenuto un valore più basso (6,8 MPa).

Sono state inoltre eseguite prove di permeabilità all'ossigeno (metodo Cembureau): il valore del coefficiente di permeabilità è variato fra $0,1 \cdot 10^{-17}$ ed $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

4. TRATTAMENTO ALLE ALTE TEMPERATURE E PROVE FISICO-MECCANICHE

Le prove di trattamento alle alte temperature (250°C, 500°C e 750°C) sono state eseguite su provini cilindrici aventi diametro 100 mm ed altezza 200 mm. Dopo il trattamento, i provini sono stati sottoposti a misure di variazione di peso, e a prove di resistenza alla compressione e di modulo elastico secante (UNI 6556). Successivamente, su frammenti di provini rotti a compressione sono state effettuate le determinazioni porosimetriche di seguito descritte. Tutte le prove sono state effettuate anche su una serie di provini non sottoposti a ciclo termico (20°C).

		MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4
composizione		senza fibre	+ PP monofil.	+ PP fibrillate	+ PVA 6 mm
CEMENTO	CEM I 52.5 R Scala di Giocca	460	460	460	460
MICROSILICE	Elkem 940	46	46	46	46
<i>totale legante</i>		506	506	506	506
fibre organiche		0	2	2	2
SUPERFLUID.	Superflux 2000 AC	27	27	27	27
ACQUA		139	139	139	139
AGGREGATI	calcareo, zona Sassari				
frazione 0 - 3.5	45%	792	792	792	792
frazione 3 - 5	22%	387	387	387	387
frazione 5 - 10	18%	316	316	316	316
frazione 10 - 20	15%	264	264	264	264
<i>totale aggregati</i>		1760	1760	1760	1760
RAPPORTI CARATTERISTICI					
superfluidificante/legante		1,60%	1,60%	1,60%	1,60%
acqua/legante		0,32	0,32	0,32	0,32
fibre	% vol.	0	0,2	0,2	0,2
slump	cm	16	10	10	12

Tabella 1. Caratteristiche degli impasti con aggregato calcareo, zona Sassari-Monte Alvaro

composizione		MIX 5	MIX 6	MIX 7
		senza fibre	+ PP monofil.	+ PP fibrillate
CEMENTO	CEM I 52.5 R Matera	446	447	447
MICROSILICE	Elkem 940	45	45	45
<i>totale legante</i>		491	492	492
fibre organiche		0	2	2
SUPERFLUID.	Superflux 2000 AC	34	34	34
ACQUA		158	156	156
AGGREGATI	calcareo, zona Brindisi			
frazione 0 - 5	60%	1030	1030	1030
frazione 5 - 8	14%	240	240	240
frazione 8 - 15	26%	446	446	446
<i>totale aggregati</i>		1717	1717	1717
RAPPORTI CARATTERISTICI				
superfluidificante/legante		2,30%	2,30%	1,60%
acqua/legante		0,37	0,36	0,36
fibre		% vol. 0	0,2	0,2
slump		cm 20	18	18

Tabella 2. Caratteristiche degli impasti con aggregato calcareo, zona Brindisi

Le prove in compressione sono state eseguite con pressa Controls da 3000 kN di capacità in controllo di carico (0.5 MPa/s). Tuttavia il rapido decadimento della resistenza a compressione verificatosi fra i cicli a 250 e 500°C ha indicato chiaramente che la bassissima resistenza attesa dopo i cicli a 750°C avrebbe consentito di eseguire le prove su una pressa di minore capacità in controllo di spostamento, e quindi con possibilità di cogliere anche il ramo discendente della curva carico/spostamento, ovvero tensione/deformazione. Pertanto le prove dopo ciclo termico a 750°C (relative a tutti i MIX ad esclusione del MIX1, i cui provini sono sistematicamente esplosi a circa 300 °C durante i cicli a $T_{max}=500^{\circ}C$) sono state eseguite con pressa INSTRON da 100 kN, con velocità di deformazione di 25 $\mu\epsilon/s$.

I cicli termici sono stati eseguiti con forno FT 73, dotato di controllo elettronico proporzionale-derivativo, sia in salita (fino alla temperatura di 1000°C), che in discesa (fino a 200°C). Il ciclo tipico consisteva in un riscaldamento effettuato con rampa di 1°C/min, in permanenza alla temperatura massima per un'ora, in raffreddamento lento controllato (-0.2°C/min, $T>200^{\circ}C$) e quindi in raffreddamento naturale, a forno aperto fino a temperatura ambiente.

Le misure di peso sui cilindri, prima e dopo i cicli termici, sono state eseguite con pesa Controls avente fondo scala di 300 N, e tolleranza di 0,005 N.

Infine le misure di modulo elastico sono state eseguite grazie al montaggio sui provini cilindrici di un'apposita gabbia portante 3 comparatori induttivi, che hanno permesso di misurare

l'accorciamento dei provini su base 50 mm (modulo elastico secante – secondo norma UNI 6556). Limitatamente alle misure di modulo dopo i cicli a 750°C, essendo il materiale molto degradato meccanicamente, si è ritenuto opportuno evitare i cicli di carico, ed il modulo elastico è stato misurato come pendenza media del ramo ascendente delle curve tensione-deformazione fino ad 1/3 del carico massimo raggiunto durante la prova.

Tutti i provini trattati in forno sono stati protetti con una camicia di lamiera metallica traforata, avente spessore di 0.3 mm e chiusa agli estremi da coperchi sempre in lamiera traforata, al fine di prevenire danni al forno e agli altri provini, nel caso di esplosione durante i cicli termici.

Per tutte le miscele sono state effettuate le determinazioni porosimetriche, utilizzando un porosimetro al mercurio Fisons: in funzione della temperatura massima di trattamento, sono stati misurati il volume cumulativo (cm^3/g), la densità apparente (g/cm^3), la porosità totale (%) e la superficie specifica (m^2/g).

5. RISULTATI E DISCUSSIONE

5.1. PROPRIETA' MECCANICHE

Nelle Figure 1 e 2 sono riportati gli andamenti rispettivamente delle resistenze alla compressione cilindrica e dei moduli elastici secanti, misurati dopo trattamento termico.

Le variazioni delle proprietà meccaniche sono differenti a seconda delle famiglie di MIX. In particolare per il MIX 1 si osserva una esplosione

dei provini cilindrici quando essi sono trattati fino a 500°C. Peraltro, l'aggiunta di fibre polimeriche nell'impasto permette di non avere più tale fenomeno (MIX 2-4). In particolare, la resistenza residua relativa nel MIX 3 sembra leggermente migliore rispetto a quella degli altri MIX con fibre, Figura 3. Le fibre di PVA (MIX 4) hanno un comportamento analogo a quelle di PP, ma danno luogo a valori della resistenza relativa alla compressione leggermente inferiori.

Nel secondo gruppo di materiali, invece, non si ha una rottura esplosiva dei provini senza fibre (MIX 5). D'altra parte, l'aggiunta di fibre permette di avere dei valori residui di resistenza più elevati, per la temperatura di 250°C. Tuttavia le tre misure danno risultati assoluti e relativi molto vicini.

A 500°C le resistenze di tutti i calcestruzzi risultano quindi decisamente ridotte rispetto ai valori relativi alla temperatura ambiente, con diminuzione dell'80% nei MIX 2-4 e del 70% nei MIX 5-7, nonostante che in assoluto i valori residui siano del tutto considerevoli (da 20 a 30 MPa), se paragonati a quelli tipici degli NSC a temperatura ambiente. A 750°C i valori sono ormai molto ridotti ed i provini risultano quasi "sfarinati".

Il confronto con prove in compressione su calcestruzzi additivati con fumo di silice ed aventi caratteristiche simili, con aggregato di origine simile o di tipo diverso, permette di fare le seguenti considerazioni:

Dopo il ciclo termico a 500°C i MIX qui provati (con aggregato essenzialmente calcareo, rapporto acqua/legante 0.35) conservano ancora dal 15-20% al 30% della resistenza iniziale rispettivamente nei casi MIX 2-4 e MIX 5-7 (Figura 3) mentre, ad esempio, i calcestruzzi con aggregato altamente siliceo (a base di selce, si veda [6], con $f_c=72-95$ MPa e rapporto acqua/legante 0.43-0.30), conservano solo il 6.5-5.0% a causa della perdita di acqua degli

aggregati e del cambiamento di sistema di cristallizzazione del quarzo.

In termini di modulo elastico, i calcestruzzi qui provati conservano – dopo ciclo termico a 500°C – dal 17 al 29% (Figura 4) del valore a temperatura ambiente, mentre i calcestruzzi già citati con aggregato siliceo conservano solo il 3%.

Sempre con riferimento al ciclo termico a 500°C, il confronto con calcestruzzo ad aggregato iposiliceo (in [12], $f_c=92$ MPa) denota in quest'ultimo una resistenza residua prossima al 58%, ben maggiore di quella misurata in queste prove (dal 15 al 30%) e pressoché coincidente con quella riscontrabile nei calcestruzzi ordinari (si veda l'Eurocodice EC4). Sempre in [12], il modulo elastico residuo si attesta attorno al 30%, contro il 17-29% dei casi qui studiati.

Si può quindi osservare che in ogni caso il decadimento del modulo elastico è decisamente più pronunciato di quello della resistenza alla compressione e che il tipo di aggregato gioca un ruolo rilevante.

5.2. PROPRIETA' FISICHE

Nella Tabella 3 sono riportati i dati riepilogativi relativi delle misure di porosità eseguite con porosimetro a mercurio (MIP). Nelle Figure 5-10 sono mostrati gli andamenti della porosità intesa come volume cumulativo, in funzione delle temperature di trattamento. Si può osservare come nel MIX 1 (scoppiato alla temperatura di 330°C) la porosità si mantenga sempre su valori molto bassi, per cui si può supporre che la sovrappressione causata dalla formazione di vapore entro la matrice molto compatta abbia portato al cedimento del provino (Figura 11).

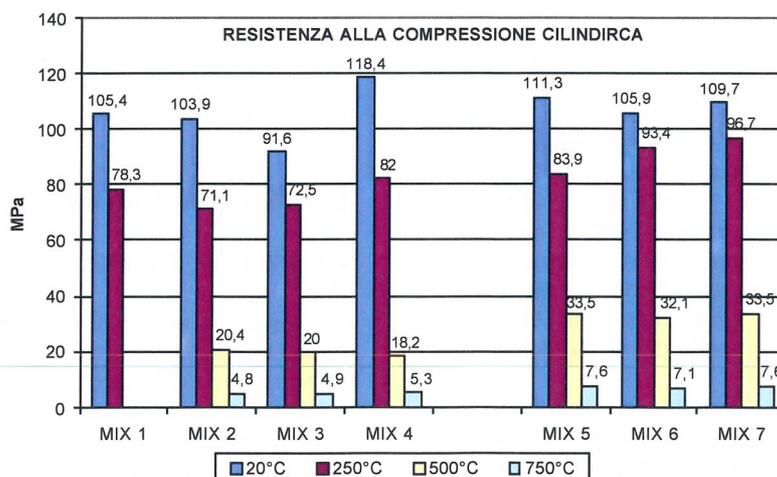


Figura 1. Resistenza alla compressione cilindrica per le diverse temperature di trattamento

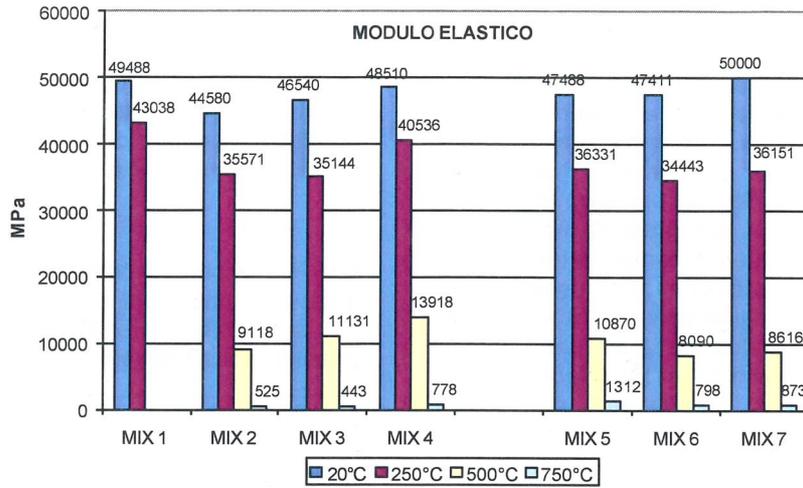


Figura 2. Modulo elastico secante per le diverse temperature di trattamento

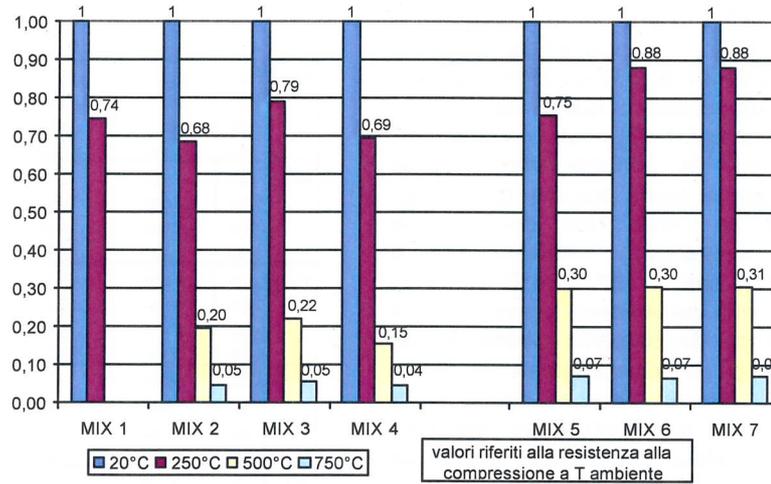


Figura 3. Resistenza relativa alla compressione

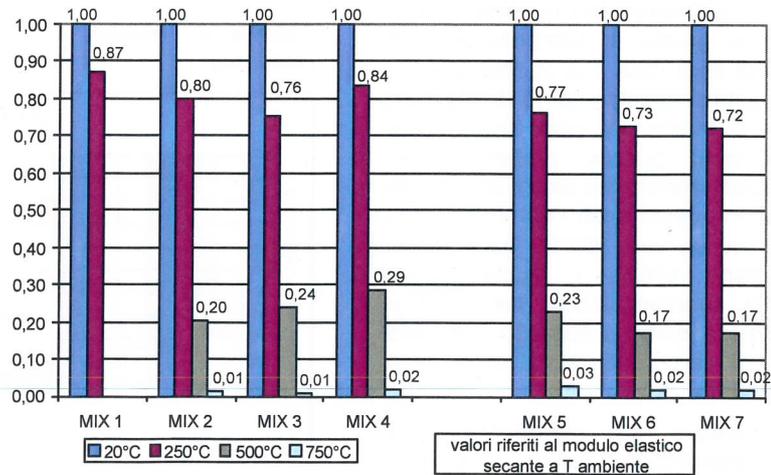


Figura 4. Modulo elastico secante relativo

Negli altri casi, l'aggiunta di fibre consente di ottenere un aumento lineare della porosità in funzione della temperatura. Infatti, il trattamento alle alte temperature fa sì che i valori di porosità risultino crescenti, a conferma del degrado chimico-fisico dei materiali, osservabile visivamente, sia a livello macroscopico (Figura 12) che microscopico. La presenza di fibre di PP risulta perciò importante nel campo di temperature fino a 250°C per un duplice motivo: esse fondono ed assorbono parte dell'energia termica fornita al calcestruzzo ed inoltre creano una porosità supplementare e piccoli canalicoli (Figura 13) che possono favorire lo smaltimento del vapore formatosi all'interno del materiale, senza creare sovrappressioni interne. Queste osservazioni sono state fatte anche in [13].

I valori di porosità percentuali risultano abbastanza simili fino a 500°C (dal 9 al 16% per tutti i MIX), così come i valori di volume cumulativo (da 0,052 a 0,074 cm³/g, compreso il valore relativo al MIX 1 che, come già detto, ha ceduto prematuramente a 330°C). Peraltro, tali valori risultano paragonabili a quelli dell'NSC a temperatura ambiente [14-16]. Dalle Figure 5-10 si nota inoltre che la porosità intesa come porosità percentuale e come volume cumulativo dei pori, cresce in modo non determinante passando dalla temperatura ambiente fino a 500°C (si consideri che a 450- 500°C si ha la decomposizione della calce idrata presente nella matrice), ma cresce decisamente passando da 500°C a 750°C, con un danneggiamento ormai evidente (Figura 12) dei materiali (inizio della decarbonatazione alle temperature più elevate). Tale condizione è stata evidenziata anche da prove termogravimetriche e da prove di perdita in massa percentuale.

Sono state infine eseguite misure di DSC (Differential Scanning Calorimetry) in atmosfera di ossigeno per i due gruppi di composizione, in presenza o meno di fibre (MIX 1 e 2, MIX 5 e 6), Figura 14. La velocità di riscaldamento di 10°C/min è stata superiore a quella del ciclo termico dei calcestruzzi (1°C/min): questo, probabilmente, spiega anche lo spostamento dei picchi dovuti alla fusione delle fibre, in questo caso intorno a 190°C (MIX 2 e MIX6), invece che 160°C. Dalle curve registrate si notano anche i picchi dovuti probabilmente alla decomposizione dei CSH e della Portlandite (calce idrata) a 400-450°C ed alla decomposizione del carbonato di calcio e delle fasi CSH (a 600-900°C).

Infine, per predire la correlazione fra resistenza alla compressione residua e porosità dei materiali, dopo il trattamento termico eseguito alle varie temperature, si è utilizzato quanto

proposto già da Boguerra ed altri [16], e ripreso poi da Chan ed altri [14].

A differenza di quanto presentato in [14], in questa sede, per ciascun tipo di aggregato è stato maggiore il numero di punti da interpolare, con un modello esponenziale del tipo:

$$f_{cu} = a \cdot \exp(-bP)$$

ove P è la porosità totale percentuale (Tabella 3) e a,b sono due costanti empiriche.

Le relazioni ottenute per le due famiglie di materiali sono riportate nelle Figure 15 e 16.

n. MIX	MAX TEMP °C	VOLUME CUMULATIVO cm ³ /g	DENSITA' APPARENTE g/cm ³	POROSITA' TOTALE %	SUPERFICIE SPECIFICA m ² /g
MIX 1	20	0,022	2,441	5,37	2,65
	250	0,035	2,398	8,39	3,05
	330	0,039	2,376	9,27	4,8
MIX 2	20	0,023	2,346	5,40	2,43
	250	0,028	2,373	6,64	2,05
	500	0,057	2,288	13,04	3,92
	750	0,139	1,940	26,97	3,49
MIX 3	20	0,023	2,344	5,39	2,42
	250	0,031	2,342	7,26	2,10
	500	0,052	2,292	11,92	3,61
	750	0,143	1,929	27,58	3,64
MIX 4	20	0,022	2,406	5,29	2,76
	250	0,043	2,379	10,23	6,76
	500	0,068	2,285	15,54	4,24
	750	0,137	2,086	28,58	3,68
MIX 5	20	0,028	2,393	6,70	3,07
	250	0,055	2,341	12,88	6,40
	500	0,074	2,267	16,78	4,20
	750	0,155	2,055	31,85	6,12
MIX 6	20	0,030	2,364	7,09	3,50
	250	0,046	2,283	10,50	4,70
	500	0,065	2,236	14,53	4,30
	750	0,151	1,912	28,89	4,04
MIX 7	20	0,029	2,347	6,81	3,00
	250	0,043	2,288	9,84	4,52
	500	0,061	2,252	13,74	4,11
	750	0,167	1,863	31,11	5,44

Tabella 3. Misure di porosità (Porosimetro a mercurio)

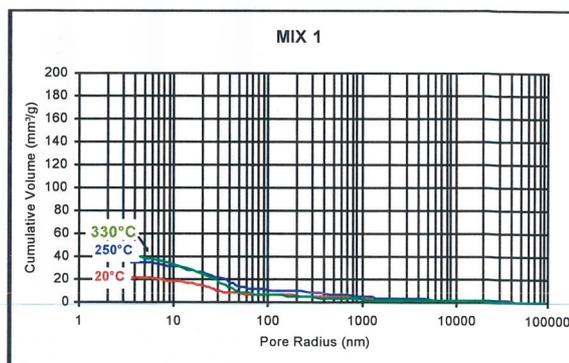


Figura 4. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

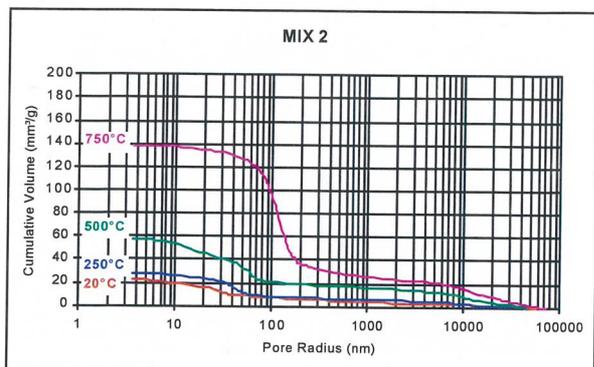


Figura 5. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

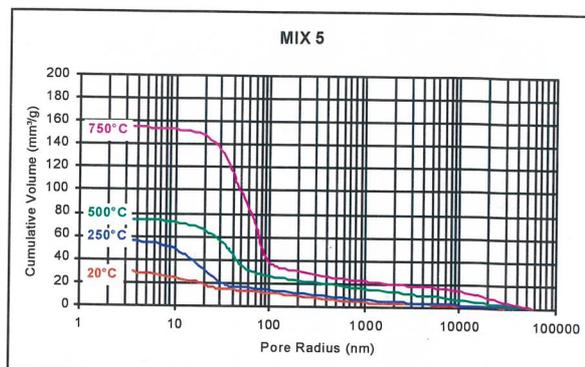


Figura 8. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

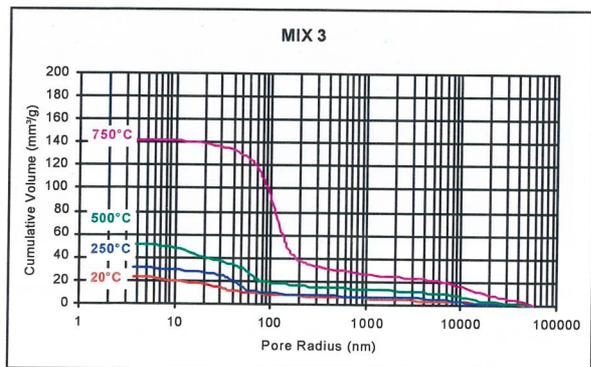


Figura 6. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

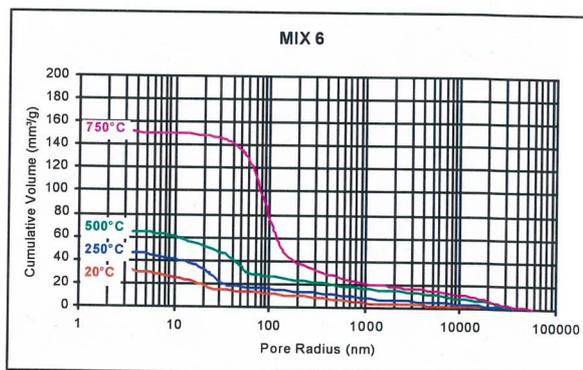


Figura 9. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

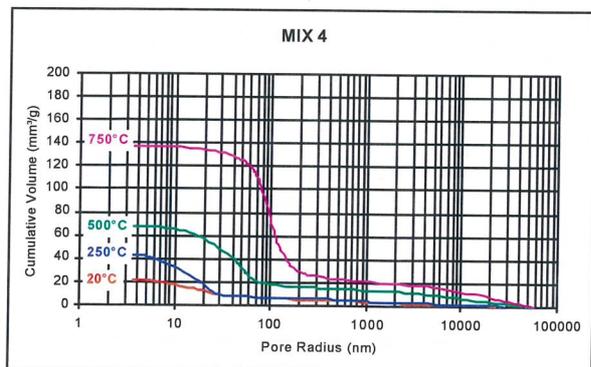


Figura 7. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

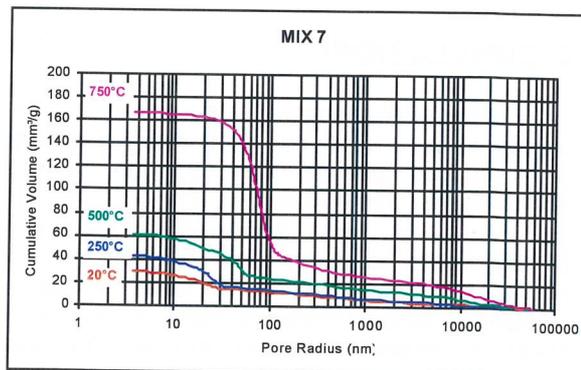


Figura 10. Andamento della porosità con la temperatura di trattamento

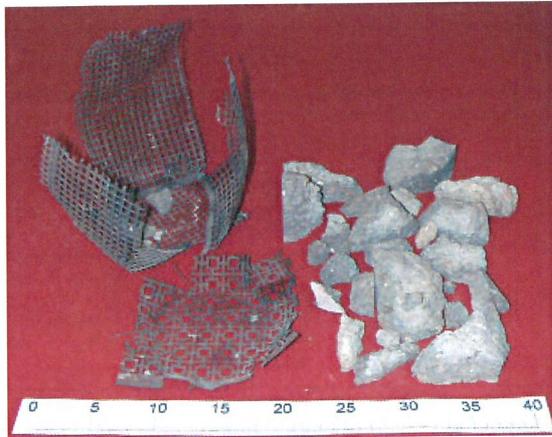


Figura 11. MIX 1 (senza fibre): esplosione a circa 330°C



Figura 12. MIX 6: rottura a compressione di un provino trattato a 750°C

6. CONCLUSIONI

La sperimentazione su sette mescole, tutte ad aggregato calcareo, di tipo dolomitico per le prime 4 e tufaceo per le altre 3, con rapporto acqua/legante, rispettivamente, 0.32 e 0.36-0.37, ha messo in luce innanzitutto l'importanza dell'aggregato, la cui migliore qualità garantisce nel secondo gruppo di mescole maggiore resistenza iniziale (+4%, a parte il MIX 4) e maggiore resistenza relativa residua (30% dopo ciclo a 500°C, in luogo di 15-20%).

Per il modulo elastico, non si osservano particolari differenze, anche se il primo gruppo denota una marginale minore sensibilità all'alta temperatura.

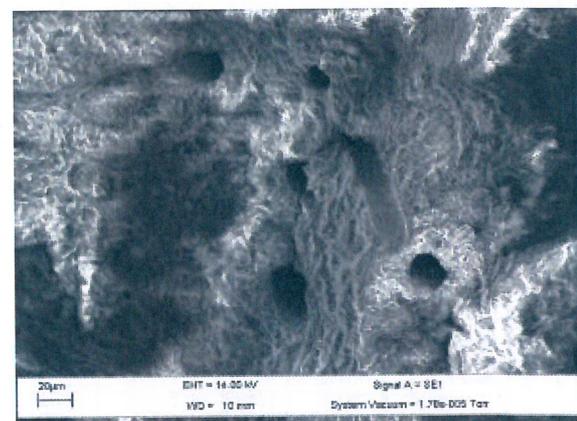
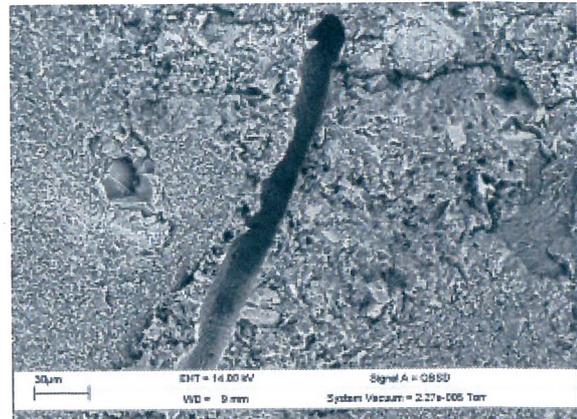


Figura 13. Tracce delle fibre di PP dopo fusione e volatilizzazione

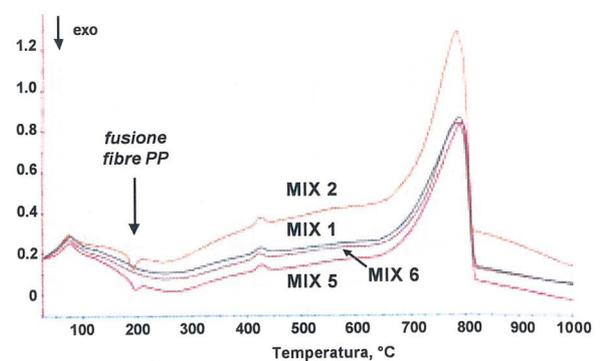


Figura 14. Curve DSC (Differential Scanning Calorimetry)

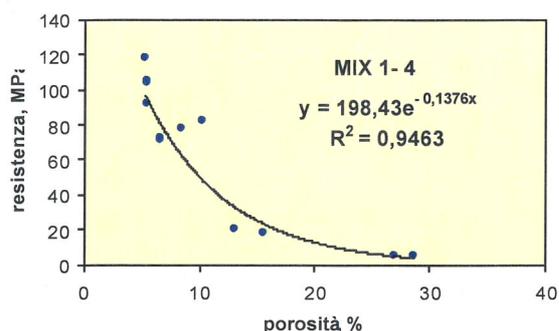


Figura 15. Correlazione fra resistenza e porosità totale: MIX 1-4

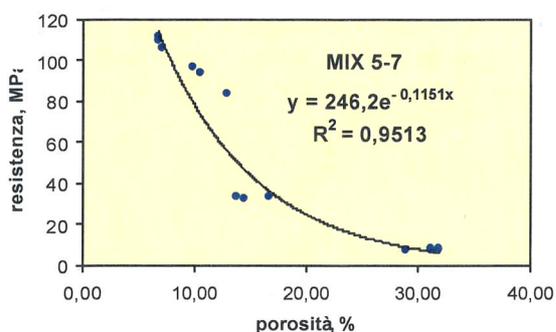


Figura 16. Correlazione fra resistenza e porosità totale: MIX 5-7

Seppure non sia da escludere che la scelta dell'aggregato possa evitare lo scoppio del materiale anche in assenza di fibre, tuttavia la presenza delle fibre è certamente una efficace protezione per l'integrità del materiale. D'altra parte anche il rapporto acqua/legante agirà in modo importante, tant'è che la misura "bianca" del secondo gruppo ($w/l=0,36\pm 0,37$) non è mai esplosa, mentre quella del primo gruppo ($w/l=0,32$) è sempre esplosa, pur avendo le due misure pressoché le stesse caratteristiche meccaniche iniziali. Sembrerebbe pertanto, che sia la maggiore porosità dell'aggregato (MIX 5-7) rispetto a MIX 1-4), che quella della matrice (a causa del maggior rapporto w/l) favoriscono l'integrità del materiale. A ciò si aggiunge l'effetto benefico delle fibre (nelle misure fibrorinforzate), che sembra dovuto non tanto al conseguente aumento di porosità ma alla geometria delle cavità lasciate dalle fibre (che sono veri e propri macropori).

Infine, l'evoluzione della porosità con la temperatura conferma la necessità di correlare la diminuzione della resistenza alla porosità stessa e conferma anche la bontà delle correlazioni proposte in letteratura, pur di adeguare i parametri

numerici alle diverse caratteristiche delle miscele di calcestruzzo.

BIBLIOGRAFIA

- [01] G. C. HOFF, A. BILODEAU, V.H. MALHOTRA, "Elevated temperature effects on HSC residual strength", *Concrete Int.*, April 2000, p. 41-47
- [02] L.T. PHAN, N.J. CARINO, "Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature", *J. Mat. Civ. Eng.*, Feb. 1998, p. 58-64
- [03] L.T. PHAN, "Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art", NISTIR 5934, Dec. 1996, 105 p.
- [04] J.A. PURKISS, "High strength concrete and fire", *Concrete*, March 2000, 49-50
- [05] G.A. KHOURY, "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment", *Mag. Of Concr. Res.*, 1992, 44, No. 161, Dec., p. 291-309
- [06] R. FELICETTI, P.G. GAMBAROVA, "Effects of high temperature on the residual compressive strength of high strength siliceous concretes", *ACI - Mat. Journal*, Vol. 95, No. 4, 1998, pp. 395-406
- [07] R. SARSHAR, G.A. KHOURY, "Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures", *Mag. Concr. Res.*, 1993, 45, No. 162, Mar., 51-61
- [08] G. TOGNON, S. CANGIANO, "Effetti dell'incendio sui materiali", *Corso CTE "resistenza al fuoco di elementi in c.a. e c.a.p. Verifiche e normative"*, Milano, 4-5 ottobre 1990, pp. 31
- [09] A. NISHIDA, N. YAMAZAKI, H. INOUE, U. SCHNEIDER; U. DIEDERICHS, "Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fiber for spalling resistance", *Int. Symp. "Concrete under severe conditions"* (K. Sakai, N. Banthia and O.E. GjØrv Eds.), Vol. 2, 1995, p. 1141-1150

- [10] **T. LENNON, N. CLAYTON**, "Fire tests on high grade concrete with polypropylene fibers", 5th Int. Symposium on "Utilization of High Strength/High Performance Concrete", 20-24 June 1999, Sandefjord, Norway, Vol. II, pp. 1200-1209
- [11] **X. LUO, W. SUN, S.Y.N. CHAN**, "Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete", *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000), No. 3, March, p. 379-383
- [12] **R. FELICETTI, P.G. GAMBAROVA, M.P. NATALI-SORA, F. CORSI, G. GIANNUZZI**, "On tension and fracture in thermally-damaged high-performance concrete: VHSC versus HSC", *Proc. Int. Workshop HPCFRCC '99*, (Ed. by A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, Mainz, (Germany), 1999, pp. 437-448
- [13] **NUOMOWE', R. DUVAL, A. LEFEVRE**, "Microstructure of polypropylene high strength concrete exposed to elevated temperature", *Proceedings of Int. Symposium: "Cement and Concrete Technology in the 2000s"*, 6-10 September, 2000, Istanbul, Turkey, Vol. 2, p. 107-114
- [14] **Y.N. CHAN, X. LUO, W. SUN**, "Compressive strength and pore structure of high performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C", *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000), March, p. 247-251
- [15] **S.Y.N. CHAN, G. PENG, J.K.W. CHAN**, "Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature", *Mat. Struct.*, Vol. 29, Dec. 1996, pp. 616-619
- [16] **BOUGUERRA, A. LEDHEM, F. DE BARQUIN, R.M. DHEILLY, M. QUEDENEC**, "Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement and wood aggregates", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 28, No. 8 (1998), pp. 1179-1190