



ARCHITETTURA *e* TECNICA
2016



a cura di

Agostino Catalano
Camilla Sansone

LUCIANOEDITORE

ISBN 88-6026-180-9



9 788860 261809

INDICE

Comitato Scientifico	7
Presentazione	9
Cocncrete 2009 - italiano	11
Cocncrete 2009 - inglese	13
Cocncrete 2012 - italiano	15
Cocncrete 2012 - inglese	19
Cocncrete 2014 - italiano	23
Cocncrete 2014 - inglese	25

SESSIONE 1

Storia del costruito in calcestruzzo del XX Secolo

Mario Cristiano

The use of recycled tyre rubber as concrete aggregate replacement: a literary review **29**

Francesca Albani, Carlo Dusi

Gusci sottili in calcestruzzo: costruire con il legno o con l'aria? Isler e Bini alla prova del tempo **39**

Claudia Mura

Costruire in calcestruzzo nella Sardegna del novecento. L'idrovora di Sassu, Arborea (OR) **51**

Fausto Mistretta, Paolo Sanjust

La Casa del Balilla di Arborea. Storia della costruzione e indagini sul manufatto **63**

Ornella Fiandaca

Il contributo delle imprese edili alla ricostruzione di Messina. La concezione antisismica del calcestruzzo armato **75**

Mariangela Bitondi, Federica Stella <i>L'esperienza formale e strutturale di Pier Luigi Nervi nei depositi del sale di Margherita di Savoia e Tortona</i>	87
Marina Pugnaletto, Cesira Paolini, Filippo Cagnotto <i>Il mercato coperto di Terni: un'architettura dimenticata</i>	99
Giulia Favaretto, Marco Pretelli, Leila Signorelli <i>Asilo Santarelli di Forlì e Casa del Fascio di Predappio. Cantieri del razionalismo a confronto</i>	109
Laura Greco <i>Il serbatoio sopraelevato Fiat Mirafiori a Torino di Pier Luigi Nervi (1961-1963)</i>	121
Patrizia Dellavedova <i>Dall'industria al tempo libero: l'uso del calcestruzzo armato in architettura tra le due guerre - Legnano (MI)</i>	133
Micaela Antonucci, Sofia Nannini <i>Pier Luigi Nervi's Manifattura Tabacchi in Bologna: a research on the use of concrete in Italian industrial architecture of 20th century</i>	145
Gianluca Lecoque <i>L'espansione all'estero della Società Generale Immobiliare - Parigi e Montecarlo</i>	159
Maria Paola Gatti, Giorgio Cacciaguerra <i>The austro-hungarian fortresses and the deployment of concrete</i>	171
Iliaria Giannetti <i>Cemento armato autarchico. I ponti militari della Campagna di Etiopia (1935 -1936)</i>	183
Stefania Mornati <i>Antonio Maria Michetti, ingegnere architetto: sintesi fra rigore e semplificazione costruttiva</i>	195
Enrico Sicignano, Pierfrancesco Fiore <i>Quando il calcestruzzo armato diventa scultoreo. le problematiche tecniche per costruire un'opera complessa: la stazione marittima di Salerno di Zaha Hadid</i>	207
Claudia Sicignano <i>La tecnologia quale ideale e perfetto supporto della composizione: "Il Salk Institute" a La Jolla, California di Louis Kahn (1959-1965)</i>	217

SESSIONE 2

Tecniche, Materiali e salvaguardia per il recupero e il restauro dell'architettura del XX Secolo in calcestruzzo

- Maria Danzi, Francesco Pepe, Riccardo Strada**
Il rilievo finalizzato al recupero e al consolidamento delle architetture in calcestruzzo. Nuove tecnologie laser - scanning applicate ai Mulini Meridionali Marzoli di Torre del Greco (NA) **229**
- Oana Tiganea, Carolina Di Biase**
Acciaio e prefabbricati in calcestruzzo nell'architettura industriale rumena, 1948-1965. A confronto con l'eredità del secondo Novecento **237**
- Roberto Vigliotti**
Il calcestruzzo armato nella ricostruzione post-bellica: la Casina del Boschetto nella Villa Comunale di Napoli **249**
- Maurizio Nicolella, Claudio Scognamillo, Viola Cirillo**
Valutazione sperimentale della durabilità di sistemi di rinforzo con calcestruzzo autocompattante **267**
- Enza Zullo**
Architettura dei primi anni del XX secolo in Capitanata: problemi di restauro e riuso **279**
- Giuliana Aiello, Francesca Malesani, Luigi Marino**
Calcestruzzi di calce con cenere e bitume nella cultura costruttiva del vicino oriente **291**
- Francesco Colella, Flavia Fascia, Antonio Gloria, Emanuele La Mantia, Renato Iovino**
Reverse Engineering e Additive Manufacturing: rilievo e restituzione del modello 3D di edifici della Mostra d'Oltremare a Napoli **303**
- Rosa Maria Vitrano**
Built recovery and regeneration. A case study in Sicily **311**

SESSIONE 3

Tecnologie innovative per l'architettura in calcestruzzo del XXI Secolo

- Fabio Minutoli**
Analisi tecnico-prestazionale delle tamponature portate in calcestruzzo **323**

Ornella Fiandaca <i>Aggregati plastici riciclati per calcestruzzi leggeri strutturali una riflessione diagnostica sugli esiti sperimentali conseguiti</i>	335
Simone Pirro, Maria Federica Ottone, Valeria Corinaldesi <i>Home Smart Concrete</i>	347
Adolfo F.L. Baratta, Laura Calcagnini, Fabrizio Finucci, Antonio Magarò, Ottavio Minella <i>La questione abitativa in Colombia. Aspetti normativi e proposte progettuali</i>	359
Antonio Magarò <i>Calcestruzzi compositi con polimeri e additivi. Prestazioni meccaniche e comportamento al fuoco</i>	369
Laura Calcagnini <i>Calcestruzzo e ambiente. i casi studio del Messner Mountain Museum di Zaha Hadid e lo Schaulager Museum di Herzog&Demeuron</i>	381
Luigi Mollo <i>Valutazione sperimentale delle caratteristiche meccaniche delle malte cementizie realizzate utilizzando vetro di scarto in sostituzione della sabbia</i>	393
Renato Iovino, Flavia Fascia, Salvatore Simonetti, Emanuele La Mantia <i>Calcestruzzi ad alte prestazioni. Valutazione sperimentale delle caratteristiche reologiche e meccaniche dei calcestruzzi autocompattanti con fumo di silice</i>	409
Francesco Maria La Mantia, Renato Iovino <i>La prevenzione incendi nella stazione Toledo linea 1 della metropolitana di Napoli</i>	431
Andres Salas Montoya <i>Recycled aggregate concrete for rigid concrete pavements</i>	443
Gigliola Ausiello <i>Calcestruzzo: una tecnologia sempre più performante</i>	455
Valeria D'Ambrosio <i>Tecnologie per l'adaptive design e la riduzione degli impatti del cambiamento climatico nell'edilizia residenziale in c.a.</i>	467

Fabrizio Leccisi, Paola Francesca Nisticò, Rosa Morosini	
<i>I controlli di accettazione del calcestruzzo in Europa</i>	479
Angelo Di Chio	
<i>Architettura e integrazione. nuove morfologie dell'involucro edilizio per le energie eoliche. Architectural integration for the aeolian energies</i>	491
Mattia Federico Leone, Raphael Fabbri	
<i>Design and innovation in the field of UHPFRC Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete</i>	503
Raffaella Lione	
<i>Evoluzione tecnologica del c.c.a., edilizia, architettura</i>	515
Camilla Sansone	
<i>Applicazioni nanotecnologiche e biomolecolari alla formulazione delle miscele. I calcestruzzi autoriparanti</i>	525
Rafael Talero, César Pedrajas, Viviana Rahhal	
<i>Influencia del humo de sílice en el comportamiento reológico de pastas frescas de cementos portland</i>	537
Vincenzo Tuccillo, Eduardo Pareja	
<i>I "Cholets" della Città de El Alto, un esempio di architettura vernacolare e complementare in cemento armato nel nuovo contesto andino</i>	553
Fernando Mejía, Rolando Grandi	
<i>Propuesta de norma sismica de Bolivia</i>	561

**CONCRETE 2016
ARCHITETTURA e TECNICA**

**Termoli
22 e 23 settembre 2016**

**CALCESTRUZZI COMPOSITI CON POLIMERI E ADDITIVI.
PRESTAZIONI MECCANICHE E COMPORTAMENTO AL FUOCO**

Antonio Magarò

*Università degli Studi Roma Tre, Roma, Italia
e-mail: antonio@magaro.it*

Parole chiave: calcestruzzi modificati con polimeri, calcestruzzi polimeri, calcestruzzi polimero-impregnati, *spalling*, calcestruzzi addizionati con polipropilene, calcestruzzi polimeri e ossido di alluminio

Abstract

Il contributo si concentra sulle caratteristiche, sulla modalità di preparazione e sulle prestazioni dei materiali compositi di calcestruzzo e polimeri, partendo da una premessa storica e da una serie di classificazioni e descrizioni che permettono di individuare sia le tipologie di materiali compositi sia i polimeri che si utilizzano, per arrivare ad individuare la composizione, di preparazione o di trattamento, che si richiede per il singolo materiale in funzione della specifica prestazione che si intende ottenere. Sono analizzate la durabilità e la resistenza agli agenti esterni, la resistenza meccanica, ed il comportamento al fuoco. Il contributo è completato da considerazioni di natura economica.

1 Introduzione

La classificazione tradizionale dei materiali, basata sulla composizione chimica, è stata da tempo superata con l'utilizzo sempre più diffuso dei materiali compositi. Il campo dei compositi si restringe ai soli materiali rinforzati in cui vi è una matrice che garantisce la coesione del materiale e racchiude il rinforzo, e quest'ultimo, che ha una determinata prestazione decisamente più elevata. È nei

primi decenni del '900 che si iniziano a studiare fibre che potessero conferire potere antifessurativo. Dopo l'abbandono dell'impiego delle fibre di amianto, dalla metà degli anni '70 la ricerca si è orientata verso l'utilizzo delle fibre sintetiche: al 5° Salone delle Invenzioni di Ginevra, nel 1976, l'ingegnere svizzero RudolfENZLER si aggiudica la medaglia d'oro con il suo "Sistema Forta-Ferro", a base di fibre polimeriche per il rinforzo del calcestruzzo. Parte un periodo di grande fermento nella ricerca, che vede la traslazione della sperimentazione dal cantiere al laboratorio. A ricomporre la frattura tra ricerca e costruzione sono le interessanti proposte della prima metà degli anni '80 di Sergio Musmeci sulle grandi strutture reticolari spaziali da realizzare con il calcestruzzo impregnato con polimero. Al giorno d'oggi si tende verso una sempre maggiore specializzazione dei compositi del calcestruzzo, diversificandoli per soddisfare singole esigenze. La ricerca quindi si muove verso la selezione dei diversi monomeri con l'obiettivo di sviluppare un calcestruzzo affidabile, ma anche relativamente economico, condizione imprescindibile per la diffusione su larga scala. Le norme di riferimento per tutti i tipi di calcestruzzi che prevedono l'aggiunta di polimeri è la UNI 9527 del 1989 ed il suo aggiornamento del 1992. Le norme dalla UNI 9528 alla UNI 9533 elencano e dettagliano i metodi di controllo e di prova. Oltre a queste sono molto utili le "Raccomandazioni tecniche per impiego del conglomerato cementizio impregnato con polimeri" emanate dall'AICAP (Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso).

2 Prestazioni specifiche e calcestruzzi compositi specializzati

A prescindere dal monomero che si impiega per l'impregnazione, sono le tecniche e la loro messa in opera a determinare un primo tipo di classificazione. In particolare si possono definire tre categorie principali di compositi del calcestruzzo:

- Monomeri inseriti nell'impasto (*PMC Polymer Modified Concrete*);
- Inerti lapidei agglutinati esclusivamente o parzialmente da polimeri che assumono il ruolo di legante (*PC Polymer Concrete*);
- Monomeri addizionati al calcestruzzo dopo la fase di indurimento e successivamente polimerizzati in cantiere (*PIC Polymer Impregnated Concrete*).

La prestazione risultante è fortemente condizionata sia dal polimero sia dal processo di produzione: il monomero che polimerizza direttamente nell'impasto può fornire una prestazione legata maggiormente al comportamento meccanico, mentre un monomero che viene applicato per impregnazione alla superficie esterna avrà effetto soprattutto sulle proprietà legate al comportamento al fuoco, alla sua interazione con l'acqua ecc. Anche i monomeri utilizzati sono identificativi del tipo di prestazione che si intende raggiungere. Per permettere una corretta impregnazione del calcestruzzo deve essere possibile per i monomeri penetrare attraverso i pori senza che si debba applicare una pressione eccessiva, per questo motivo i monomeri allo stato liquido devono essere poco volatili per essere lasciati in posa sul calcestruzzo.

2.1 PMC: Calcestruzzi modificati con polimeri

I PMC, acronimo che individua i *Polymer Modified Concrete* conosciuti anche come *Polymer Cement Concrete*, sono relativamente economici e garantiscono prestazioni migliori rispetto al calcestruzzo ordinario. Vengono spesso utilizzati per la loro resistenza agli agenti aggressivi e per il basso coefficiente di assorbimento, che consente loro di essere impiegati anche in condizioni di forte umidità. I polimeri che di solito si utilizzano sono:

- Stirene-Butadieneⁱ dalla grande resistenza all'abrasione ed all'invecchiamento;
- Resine epossidiche diluite con stirene per diminuirne la viscosità;
- Furano, che si ottiene dalla distillazione di alcune specie legnose, tipicamente dal Pino, che, pur essendo inadatto ad altri tipi di applicazione con il calcestruzzo a causa della sua volatilità, è un monomero che polimerizza in ambiente acido, risultando resistente all'aggressione in ambienti caratterizzati da pH bassi.

La percentuale di polimero che si aggiunge nei PMC varia dal 10 al 25% in peso. L'inserimento di polimeri come gomme o resine va a sostituire buona parte dell'acqua che di solito compone la miscela del calcestruzzo, ma la lavorabilità non viene inficiata. La caratteristica principale dei PMC è la loro resistenza all'aggressione da parte degli agenti corrosivi e la completa impermeabilizzazione. Per questo motivo sono largamente utilizzati ad esempio per il consolidamento di pile di ponte, ma anche per il risanamento di pavimentazioni danneggiate dall'acqua. L'incompatibilità dei polimeri utilizzati nei PMC con le soluzioni acquose interferisce con il normale processo di idratazione del cemento e quindi con il corretto indurimento del calcestruzzo, dando luogo a prodotti che non presentano dei significativi incrementi della prestazione meccanica o di durabilità.

2.2 PC: Calcestruzzi Polimeri

L'acronimo indica i *Polymer Concrete*. I PC non contengono né cemento né acqua e gli inerti, dalla granulometria fine, sono legati tra loro esclusivamente dal polimero. La prestazione è strettamente correlata ad una corretta esecuzione dell'impasto: gli inerti devono essere privi di polveri, in modo da favorire l'azione legante del polimero. I polimeri utilizzati sono generalmente di due tipi:

- Polimeri termoindurenti: hanno la caratteristica di indurire durante il processo di riscaldamento a 200°C, ed il vantaggio di non perdere durezza se riscaldati nuovamente. Sono polimeri termoindurenti le gomme vulcanizzate, le resine epossidiche, le resine fenolicheⁱⁱ ed i poliesteri;
- Polimeri termoplastici: sottoposti a riscaldamento hanno la caratteristica di arrivare a liquefarsi, per indurire nuovamente con il successivo ciclo di abbassamento della temperatura. Sono polimeri termoplastici il polietilene, il polistirene ed il cloruro di polivinile, ma anche il teflon ed il nylon.

Il punto di forza dei PC è certamente la prestazione meccanica, soprattutto se il polimero è di tipo termoplastico.

Il PC con metilmetacrilato è in genere un materiale molto fragile, con una relazione tra tensione e deformazione che è pressoché lineare. Nonostante questo, l'aggiunta di altri monomeri può conferire grande duttilità al composito. Le caratteristiche di buona resistenza meccanica, fanno dei PC degli ottimi materiali per le opere di consolidamento strutturale, mentre non sono del tutto adeguati per l'impiego nella nuova edificazione per la cattiva prestazione termica e per difetti legati alla cattiva aderenza con le armature.

2.3 PIC: Calcestruzzi polimero impregnati

L'idea è quella di migliorare la prestazione meccanica e la durabilità saturando i vuoti che si formano all'interno dell'elemento dopo l'indurimento. L'impregnazione è una pratica difficoltosa se si pensa che i fluidi presentano viscosità e che le cavità contengono aria o acqua allo stato di vapore. Si rende necessario quindi abbassare la viscosità del monomero scelto e deumidificare il calcestruzzo rimuovendo l'aria al suo interno. I monomeri utilizzati per questa tecnica sono soprattutto lo stirene ed il metilmetacrilato proprio per la bassa viscosità e l'alta temperatura di evaporazione ma, soprattutto, per il loro costo relativamente contenuto. Dopo l'impregnazione è necessario che il monomero venga polimerizzato, e questo può avvenire in tre modi:

- aggiunta di un catalizzatore a temperatura ambiente, operazione lunga e difficilmente controllabile;
- bombardamento con raggi gamma con rischi per la salute degli operatori;
- aggiunta di un catalizzatore e successivo riscaldamento a temperature superiori a 70°C, mediante vapore o bombardamento con microonde. Il grado di polimerizzazione è superiore in quest'ultimo caso.

I vantaggi derivati dall'occlusione dei pori sono evidenti. Quelli più immediati riguardano la durabilità del calcestruzzo soprattutto quando questo è esposto agli agenti atmosferici o è collocato in ambienti aggressivi.

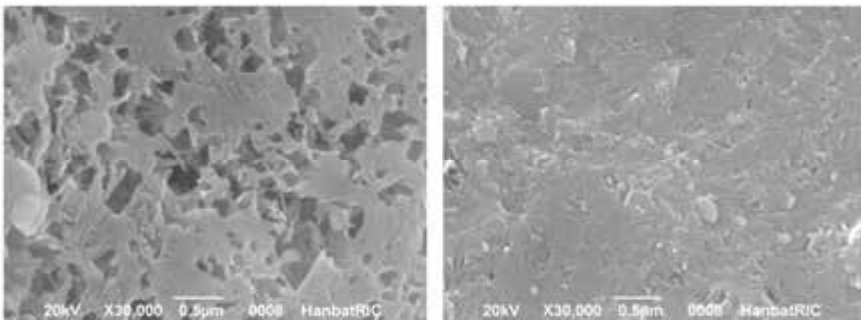


Figura 1: Scansione al microscopio elettronico del calcestruzzo ordinario (a sinistra) e di un PIC con metilmetacrilato (a destra). Si nota la differenza nel numero di cavità

Un modo per valutare in laboratorio la resistenza alla corrosione del calcestruzzo è quello di valutare la perdita di peso di un elemento quando questo viene esposto per un certo periodo alla corrosione diretta. Si può apprezzare un evidente incremento della resistenza alla corrosione come si vede in Figura 2.

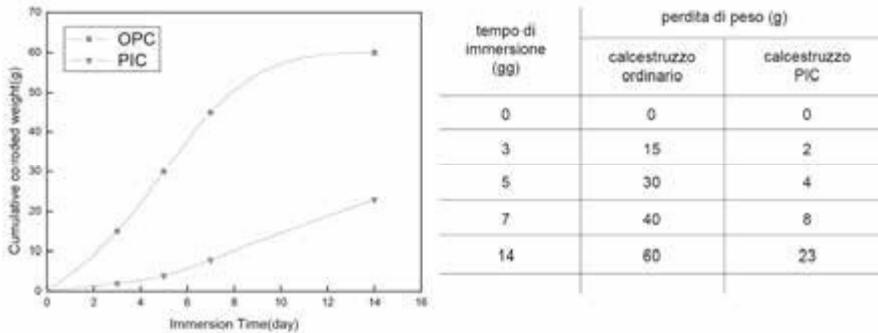


Figura 2: Valutazione della resistenza alla corrosione di un provino di calcestruzzo ordinario e PIC immerso in una soluzione di 5 moli di acido solforico

3 Comportamento al fuoco dei calcestruzzi compositi con polimeri

Nonostante i grandi vantaggi che offrono i calcestruzzi compositi con polimeri, essi vedono una limitata applicabilità per la perdita di prestazione meccanica alle alte temperature. Per ovviare a questo inconveniente si selezionano polimeri resinosi con la migliore resistenza al fuoco come le resine fenoliche, le quali però sono caratterizzate da una resistenza a compressione molto bassa o, come accade più spesso, si impiegano nella miscela dei ritardanti di fiamma con effetti collaterali come il rilascio di fumi durante l'incendio o la perdita di prestazione meccanica. Uno dei fenomeni che si punta a contenere attraverso l'utilizzo di polimeri nella miscela del calcestruzzo è lo *spalling*, ma per comprendere quale sia il ruolo dei polimeri all'interno del *mix design* è necessario analizzarne le diverse tipologie:

- *Spalling* superficiale: si determina quando pezzi di calcestruzzo (dell'ordine di massimo 20 mm) si staccano in maniera non esplosiva dalla superficie dell'elemento strutturale. Questo accade se il degrado del calcestruzzo è dovuto alla perdita di umidità che inficia il potere legante della matrice cementizia. Se l'innalzamento di temperatura è sufficientemente lento, la quantità d'acqua contenuta all'interno del calcestruzzo ha il tempo di "migrare" verso la parte esposta dell'elemento strutturale e quindi sfogare sotto forma di vapore;
- Rottura dell'angolo: conosciuta anche come "desquamazione del calcestruzzo", si verifica in una fase avanzata dell'incendio, quando l'elemento strutturale è già indebolito e sono presenti fratture;

- *Spalling* esplosivo: si può verificare quando il calcestruzzo è investito in maniera repentina da un innalzamento di temperatura tra i 150 ed i 250 °C e schegge ben più grandi di 20 mm vengono proiettate per diversi metri provocando l'improvvisa perdita di resistenza dell'elemento ed il conseguente probabile collasso.

3.1 Calcestruzzi addizionati in pasta con fibre di polipropilene

Un grande passo avanti è stato effettuato nella seconda metà degli anni '90 a seguito di tre incendi disastrosi che si sono verificati in Europa: quello del *Great Belt Tunnel* in Danimarca (1994), quello del tunnel sotto la Manica (1996) e quello del *Kaprun Tunnel* in Austria (2000). Le perdite economiche e, soprattutto, umane sono state ingenti e dolorose. Per prevenire ulteriori disastri di questo tipo si è valutato l'impiego di calcestruzzi addizionati di fibre di polipropilene, che hanno dimostrato di esprimere una eccellente resistenza intrinseca allo *spalling*. Con l'aumentare della temperatura, il cambiamento di fase del polipropilene avviene gradualmente e presenta una fase intermedia nel passaggio da solido a liquido che influisce sulle tensioni che determinano lo *spalling*. A giustificare questo fenomeno le teorie sono due:

- PITS (*pressure induced tangential space*ⁱⁱⁱ). Presentata nel 2008 si basa sul fatto che il vapore che si forma all'interno della matrice cementizia, ha una pressione talmente elevata da contrastare l'espansione del polipropilene mentre cambia di fase, riuscendo quindi ad infiltrarsi negli interstizi lasciati liberi nel calcestruzzo e sfogando all'interno dello spazio lasciato libero dalla fibra. Il meccanismo è tanto efficace quanto più è legato all'utilizzo di fibre ultrasottili, diffuse uniformemente ed in grande quantità nell'impasto in modo da determinare una rete di capillari che, una volta svuotata, porta sempre verso l'esterno dell'elemento strutturale. Questa teoria è fortemente accreditata, ma non riesce a spiegare come mai esperimenti che hanno visto l'impiego di fibre dal diametro superiore che nella stessa percentuale in volume sono meno di quelle più sottili, hanno dimostrato di caratterizzare i provini di calcestruzzo da una resistenza allo *spalling* esplosivo paragonabile o leggermente superiore.
- Microfratture. Questa teoria è meno recente (2001) e si basa sul fatto che il polipropilene ha un coefficiente di dilatazione termica circa 8,5 volte superiore a quello del calcestruzzo, pertanto, durante un'espansione repentina, ma con un passaggio di fase intermedio, si determina una serie di microfratture interne alla matrice cementizia che facilitano la fuoriuscita del vapore dall'interno dell'elemento strutturale. Anche in questo caso il tutto dipende dalla giusta dimensione della fibra.

Entrambe le teorie si propongono di trovare la relazione tra la dimensione delle fibre e la loro efficacia nel prevenire lo *spalling*. Alcune ricerche hanno messo a confronto il comportamento del calcestruzzo addizionato in pasta con fibre di polipropilene di diametro differente (32 µm e 18 µm). Il calcestruzzo utilizzato nelle prove era quello utilizzato comunemente in Svezia nella costruzione di gallerie, ambienti, come è facile immaginare, sottoposti ad alto rischio incendio. Le prove sono state realizzate simulando le condizioni che possono provocare lo *spalling* esplosivo, ovvero quello più dannoso e pericoloso, utilizzando come

riferimento per la simulazione la curva tempo-temperatura RWS anziché la meno restrittiva curva prevista dall'Eurocodice 2 ISO 834^{iv}, utilizzando dei provini di grandi dimensioni sottoposti a compressione ed immersi in un ambiente caratterizzato da grande umidità. I pannelli sono stati progettati con una concentrazione di fibre non elevata e con aggregati di diverse granulometrie. I dati si riferiscono alle composizioni di cui alla Tabella 1:

Tabella 1: Composizione dei provini

Denominazione	Granulometria aggregati (mm)	Diametro delle fibre (μm)	Quantità di fibre (kg/m^3)
A	16	-	0
B	25	-	0
E	16	18	1
F	25	18	1
I	16	18	1,5
J	25	18	1,5
M	16	32	1
N	25	32	1

Nella figura 3 si riportano i risultati della ricerca [Liu et al. 2008]. Si può intuire come non sia solo la quantità di fibre nel calcestruzzo a determinarne la loro efficacia, infatti lo *spalling* nei pannelli in cui si ha lo stesso quantitativo in peso di fibre da 32 μm e da 18 μm è paragonabile, pur essendo le fibre dal diametro minore circa 3,2 volte quelle dal diametro maggiore.

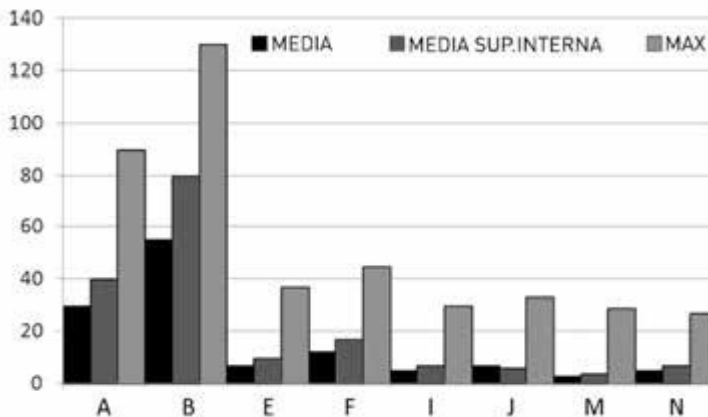


Figura 3: Dimensione della profondità dello *spalling* (mm) dopo 30 minuti di esposizione all'incendio secondo la curva RWS

Allo stesso tempo 1 Kg/m³ di fibre da 32 µm all'interno di un pannello con le stesse caratteristiche, offre una resistenza allo *spalling* solo di poco superiore ad un quantitativo di 1,5 kg/m³ di fibre da 18 µm.

È di tutta evidenza che il diametro delle fibre e la loro quantità sono fattori da considerare insieme, senza che nessuno prevalga sull'altro.

3.2 Calcestruzzi polimeri addizionati con micro e nano particelle di ossido di alluminio

Il settore di applicazione dei PC attualmente è limitato sia per il costo dei polimeri, sia per la loro scarsa prestazione alle alte temperature.

La ricerca si è concentrata su come migliorare il comportamento al fuoco dei PC mediante l'aggiunta di micro e nano particelle di ossido di alluminio Al₂O₃ al posto dei più comuni ritardanti di fiamma. Le nano particelle di ossido di alluminio, sottoposte ad alte temperature, si legano tra di loro a formare delle sfere cave, che imprigionano i gas ed il vapore acqueo che si viene a formare all'interno dell'elemento di calcestruzzo. Questa struttura a microsferi riempite di gas, ha un potere isolante dal punto di vista termico ed in qualche modo protegge naturalmente il calcestruzzo limitando l'aumento della temperatura al suo interno. Nella ricerca le prove di laboratorio sono state condotte mediante l'utilizzo del calorimetro a cono^v al quale è stato sottoposto un provino con superficie esposta al calore di 10 x 10 cm ed uno spessore di 1 cm. Le prove al calorimetro a cono sono state eseguite secondo gli standard individuati dalla ASTM E1354^{vi} che sono gli stessi indicati nella normativa ISO 5660:2002^{vii}.

I provini sono stati realizzati con una resina connotata da una bassa viscosità a temperatura ambiente^{viii} (165 mPas a 20°C), mentre sono stati utilizzati due tipi differenti di particelle di ossido di alluminio:

- Micro particelle sferiche;
- Nano particelle sotto forma sia di nano polveri a secco sia di nano polveri disperse in soluzione.

Nella Tabella 2 sono indicati alcuni parametri dimensionali dei costituenti delle miscele.

Tabella 2: Peso specifico e dimensioni degli aggregati e delle particelle di ossido di alluminio

	Peso specifico [g/cm ³]	Granulometria	Granulometria media
Nano particelle di Al ₂ O ₃	1,2 - 1,8	-	45 nm
Micro particelle di Al ₂ O ₃	-	0,4 - 11 µm	0,55 µm
Ceneri volanti	2,65	100 - 425 µm	245 µm
Sabbia	2,60	0,1 - 4 mm	0,7 mm

Sono stati realizzati tre diversi impasti di calcestruzzi polimeri modificati con ossido di alluminio e messi a confronto con un campione di calcestruzzo polimero senza ossido di alluminio (0-E):

- MAE5-E: caratterizzato dal 5% in peso di micro particelle a secco di ossido di alluminio;
- NDA5-E: caratterizzato dal 10% in peso di nano polveri di ossido di alluminio disperse in soluzione;
- NA5-E: caratterizzato dal 5% in peso di nano particelle a secco di ossido di alluminio.

Alcuni risultati delle prove al calorimetro a cono sono sintetizzati nella tabella seguente:

Tabella 3: Risultati del test del calorimetro a cono

PC e PC modificati	ML (%)	IT (s)	SEA (m ² /kg)	Tasso CO (kg/kg)	Tasso CO ₂ (kg/kg)	HRR (kW/m ²)		
						Picco massimo	Media dopo 180 secondi	Media totale
0-E	94	45	922	0,050	1,22	645	374	160
MA5-E	91	50	930	0,054	1,17	561	344	107
NDA5-E	96	44	868	0,061	1,46	862	442	170
NA5-E	84	47	709	0,039	1,18	718	363	209

Sebbene questi dati non esprimano significativi miglioramenti della prestazione al fuoco, a parte un aumento del tempo di ignizione anche se modesto ed una diminuzione relativa di monossido di carbonio ed anidride carbonica, si deve sottolineare il fatto che l'aggiunta di polveri di ossido di alluminio a secco porta un miglioramento degli indici SEA e soprattutto HRR. Inoltre, il passaggio dalle micro alle nano particelle di ossido di alluminio conferisce a quest'ultimo un buon comportamento in qualità di ritardante di fiamma.

In tutti i casi, la prestazione meccanica viene considerevolmente incrementata.

4 Conclusioni

Le variabili che determinano la prestazione specifica di un composito di calcestruzzo e polimero sono diverse, se questo consente di selezionarne alcune per determinare un procedimento produttivo per arrivare ad un materiale che garantisca un determinato comportamento, allo stesso tempo, inevitabilmente, esclude alcune caratteristiche che potrebbero essere ugualmente auspicabili.

Per il momento l'unico vero limite alla ricerca si può individuare nel costo elevato della maggior parte dei polimeri, dovuto sia al costo intrinseco del materiale, sia al processo produttivo laborioso. Attualmente alcuni tipi di compositi come i PC in cui il polimero sostituisce completamente il legante, giustificano l'elevato costo

con la prestazione meccanica elevata, e con la possibilità di abbattere i tempi di disarmo e maturazione del calcestruzzo, utilizzando un minor numero di casseforme per ottenere un ugual numero di elementi nell'unità di tempo, oltre ad avere minore necessità di manodopera.



Figura 4: Ripartizione dei costi annuali per lo stesso elemento di tubatura realizzato con Calcestruzzo Polimero e con Calcestruzzo Ordinario

Inoltre, uno studio articolato sul ciclo di vita di elementi costruttivi in PC esposti ad un ambiente corrosivo come le tubature per gli scarichi fognari ha dimostrato che la vita utile dell'elemento in PC è più che doppia rispetto a quella dello stesso elemento realizzato con il calcestruzzo ordinario, al punto di consentire di ignorare l'alto costo della materia prima che costituisce i PC a fronte del costo praticamente nullo della manutenzione dell'elemento nel lungo periodo.

Dall'analisi risulta che pur valutando i costi di produzione e di installazione dell'elemento in PC, il suo costo su base annua, una volta in opera, è pari al 40% del medesimo elemento realizzato con il calcestruzzo ordinario.

Per quanto riguarda il comportamento al fuoco, i due approcci alla prevenzione dei danni provocati dall'incendio alle strutture di calcestruzzo presentano entrambi vantaggi e svantaggi.

L'introduzione delle microfibre di polipropilene è un metodo dall'applicazione largamente diffusa e il suo costo appare tuttavia competitivo se paragonato al costo di soluzioni alternative come le schiume intumescenti. I progetti di gallerie più moderni fanno affidamento su questo tipo di tecnologia per prevenire lo

spalling, come ad esempio, solo per citare alcuni casi europei, il tunnel del Gottardo, quello del Brennero ed il già citato prolungamento del tunnel sotto la Manica fino alla città di Londra.

Per quanto riguarda l'aggiunta di additivi come le micro e nano particelle di ossido di alluminio nei calcestruzzi polimeri, è importante considerare la peculiarità di questi ultimi di utilizzare i polimeri in sostituzione del legante tradizionale. La loro prestazione meccanica è assolutamente convincente, sebbene cali drasticamente durante l'esposizione alle alte temperature. Per questo motivo, il potere intrinseco di isolare e proteggere dall'innalzamento della temperatura dell'ossido di alluminio additivato sotto forma di micro e nano polveri, riesce a mantenere la prestazione meccanica anche durante l'incendio.

Bibliografia

Bozkurt Orhan, Islamoglu Mehmet, "Comparison of Cement-based and Polymer-based Concrete Pipes for Analysis of cost assessment", in "International Journal of Polymer Science", 2013, www.hindawi.com/journals/ijps/2013/921076/ (consultato il 27/06/2016)

Ribeiro M.C.S., Pereira C.M.C., Sousa S.P.B., Novoa P.R.O., Ferreira A.J.M., "Fire retardancy enhancement of unsaturated polyester polymer resin filled with nano and micro particulate oxide additives", in "IOP Conference Series: Materials science and engineering", 2014, vol 58

Ribeiro M.C.S., Pereira C.M.C., Sousa S.P.B., Novoa P.R.O., Ferreira A.J.M., "Fire reaction and mechanical performance analyses of polymer concrete materials modified with micro and nano alumina particles", in "Restoration of buildings and monuments", 2013, vol. 19 n° 2/3, pp. 195-202

Collepari Mario, "Comportamento al fuoco delle strutture in calcestruzzo armato", in "Enco Journal", 2012, Enco, Treviso

Ribeiro M.C.S., Pereira C.M.C., Martins M.S.S., Marques A.T., Ferreira J.M., "Effects of micro and nano-sized Al₂O₃ particles on mechanical behaviour and fire reaction properties of epoxy polymer mortars" in "Proceedings of the 13th International Congress on Polymers in Concrete ICPIC 2010", 2010, Department of Engineering - University of Minho, Portogallo

Elalaoui O., Ghorbel E., Benouzedou M., "The effect of the fire flame retardant type on the durability of polymer concrete exposed to elevated temperature", in "Proceedings of the 13th International Congress on Polymers in Concrete ICPIC 2010", 2010, Department of Engineering - University of Minho, Portogallo

Lee Won Mook, Nair J Priya, Lee Woo Chul, et al. "Physical and chemical properties of polymer impregnated concrete on the preparation condition", 2008, www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/aiche-2008/data/papers/P137724.pdf (consultato il 18/06/2016)

Jansson R., Boström L., "Experimental Study of the Influence of Polypropylene Fibres on Material Properties and Fire Spalling of Concrete", in "3rd International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS)", 2008, Stoccolma

Liu, X, G. Yeb, G. De Schutter, Y. Yuana and L. Taerwe, "On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self compacting and high performance cement paste", in "Cement & Concrete Research", 2008, Vol38,

Tomo 4, pp. 487-499

Macchia Cesira, "I materiali e i manufatti in conglomerati cementizi" in "Quaderni del Manuale di progettazione edilizia, materiali e prodotti", 4° ed. 2008, Hoepli, Milano

Mehta P. Kumar, Monteiro Paulo J.M., "Concrete Microstructure, Properties and Materials", 2006, Mc-Graw Hill, New York

Note

ⁱ È un co-polimero ovvero un polimero composto da due monomeri differenti. Lo stirene-butadiene è conosciuto come gomma sbr.

ⁱⁱ Le resine epossidiche e le resine fenoliche sono delle resine sintetiche ovvero dei polimeri di aspetto simile alle resine naturali, in grado di indurirsi al freddo o al caldo. In particolare le resine fenoliche sono delle catene di monomeri ottenuti facendo reagire fenolo e formaldeide. Sono in generale termoindurenti. Le resine epossidiche hanno una elevata viscosità al punto che per agglutinare bene gli inerti è necessario farle reagire con dei diluenti come lo stirene, inoltre l'anello a tre atomi che le caratterizza (e che reagisce molto bene con lo stirene) conferisce loro grande rigidità, dalla quale deriva un'ottima prestazione meccanica e una buona resistenza al calore, infatti sono anch'esse termoindurenti.

ⁱⁱⁱ Si può tradurre liberamente con Pressione indotta nello spazio interstiziale e si riferisce alla possibilità che il vapore sottopressione possa sfogare attraverso i capillari che si determinano per la fusione del polipropilene.

^{iv} La normativa europea prevede tre metodi di calcolo nel caso di progettazione al fuoco delle strutture. Lasciando perdere quello semplificato per il quale si considera una soglia di temperatura oltre la quale il calcestruzzo si considera privo di resistenza mentre sotto la quale è integro, ed il metodo tabellare che considera percentuali di resistenza a quelle porzioni di elemento strutturale che si trovano in diverse fasce di temperatura, restano i metodi di calcolo generali che determinano una risposta elastica della struttura in funzione di curve di simulazione di un incendio reale. La normativa europea consente di utilizzare la curva logaritmica ISO 834 che raggiunge il picco massimo di 1100°C dopo 3 ore. La curva RWS (RijksWaterStaat) proposta dal Ministero dei Lavori Pubblici Olandese, è decisamente più severa, e prevede che la temperatura arrivi istantaneamente a 1200°C e dopo 10 minuti al picco massimo di 1350°C. La differenza tra le due curve sta nel tipo di incendio che si va a simulare. La curva ISO 834 simula un incendio di cellulosa, mentre la RWS un incendio di idrocarburi. È chiaro che appartiene a questa categoria la tipologia più disastrosa ma anche più comune nelle gallerie, ovvero sotto le ipotesi a cui si riferisce lo studio in oggetto. (Eurocodice 2, 2005).

^v Il calorimetro a cono permette la valutazione del tasso di rilascio del calore di un materiale indicato con la sigla HRR (Heat Release Rate). Questo parametro è considerato il più importante nella valutazione del comportamento al fuoco di un materiale. Esso viene determinato misurando il consumo di ossigeno attorno ad un provino sottoposto ad una fonte di calore per irraggiamento. Il calore netto di combustione dei prodotti è proporzionale alla quantità di ossigeno richiesta per la combustione. Il test misura anche altri parametri, tutti presi in considerazione nella ricerca in esame, come la perdita di massa (ML mass loss), il tempo di ignizione (IT ignition time), la superficie media specifica di estinzione (SEA specific extinction area), assieme alla quantità di monossido di carbonio e di anidride carbonica. Oltre all'andamento dell'HRR è di fondamentale importanza valutare il picco massimo poiché grazie ad esso si può fare una valutazione sull'intensità del fuoco prodotto.

^{vi} ASTM E1354 "Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using oxygen consumption calorimeter".

^{vii} ISO 5660:2002 "Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate"

^{viii} La bassa viscosità a temperatura ambiente, ovvero alla temperatura di preparazione del calcestruzzo polimero, è un parametro fondamentale nella qualità di quest'ultimo infatti questa proprietà permette al legante di agglutinare nella maniera più efficace gli inerti.