

Calcestruzzo e Polimeri: materiali compositi versatili dalle prestazioni specifiche

Antonio Magarò

Calcestruzzo e Polimeri tra passato e presente

La classificazione tradizionale dei materiali, basata sulla composizione chimica, è stata da tempo superata con l'utilizzo sempre più diffuso dei materiali compositi, il cui sviluppo è stato notevole negli ultimi anni. L'idea di comporre materiali combinandone altri con lo scopo di unificarne le prestazioni non è certamente una novità, anche se questa definizione è talmente larga che potrebbe portare a definire come compositi quasi tutti i materiali presenti sul mercato in quanto costituiti da sostanze non pure.

In ambito tecnico è consuetudine restringere il campo dei compositi ai soli materiali rinforzati in cui vi è una matrice che ha il compito di garantire la coesione del materiale e racchiudere il rinforzo, e quest'ultimo, che generalmente è sotto forma di fibre¹ e ha una determinata prestazione decisamente elevata rispetto alla matrice, ed è per questo che vi si additiva.

I compositi del calcestruzzo sono un'invenzione tanto antica quanto fondamentale nella storia delle costruzioni. Se la primordiale forma di calcestruzzo si può ricondurre all' *opus caementicium*, tecnica costruttiva utilizzata dagli antichi romani, è da allora che il conglomerato cementizio viene addizionato con elementi fibrosi quali paglia o pelo animale, con lo scopo di contrastare la formazione di crepe e fessure saturandone le cavità.

Il Calcestruzzo armato è di per se un materiale composito, dove la matrice cementizia abbraccia il rinforzo metallico che ha lo scopo di fornire la prestazione a flessione, ed è certamente da quei primi brevetti che non si è mai fermata la ricerca su quei materiali che, inseriti nella miscela, potevano sopperire alle carenze di un materiale straordinario ma ben lungi dall'essere perfetto.

E' nei primi decenni del '900 che si studiano fibre che potessero avere un potere antifessurativo se miscelate con il calcestruzzo armato, e se questo ha portato in un primo tempo al tragico impiego delle fibre d'amianto, fortunatamente abbandonate quando sono diventati noti i danni che questo materiale provoca sulla salute, è dalla metà degli anni '70 che la ricerca si è orientata con decisione verso l'impiego delle fibre sintetiche: al 5° Salone delle Invenzioni di Ginevra, nel 1976, L'ingegnere svizzero Rudolf Enzler si aggiudica la medaglia d'oro con il suo "Sistema Forta-Ferro", dando così l'incipit all'impiego delle fibre polimeriche per il rinforzo del calcestruzzo (Enzler, 1975).

Parte un periodo di grande fermento nella ricerca, che però vede la traslazione della sperimentazione dal cantiere al laboratorio, scollamento che portava inevitabilmente verso il confinamento della ricerca stessa limitandone la diffusione su larga scala, cosa che avviene quasi solo esclusivamente per la prefabbricazione pesante in conseguenza del boom economico di metà secolo. (Iori, Marzo Magno, 2011).

A ricomporre la frattura tra ricerca e costruzione, tra laboratorio e cantiere, sono le interessanti sperimentazioni della prima metà degli anni '80 di Sergio Musmeci sulle grandi strutture reticolari spaziali da realizzare con il calcestruzzo impregnato con polimero, materiale che da allora diventa uno dei più stimolanti dal punto di vista della ricerca e dell'innovazione (Brodini, 2008).

¹ Il rinforzo non è obbligatoriamente sotto forma di fibre, anzi a seconda del tipo di rinforzo si distinguono i compositi in: Particellari, Rinforzati in fibre, Strutturati. Questi ultimi sono i Pannelli Sandwich in cui i diversi materiali si distinguono in strati

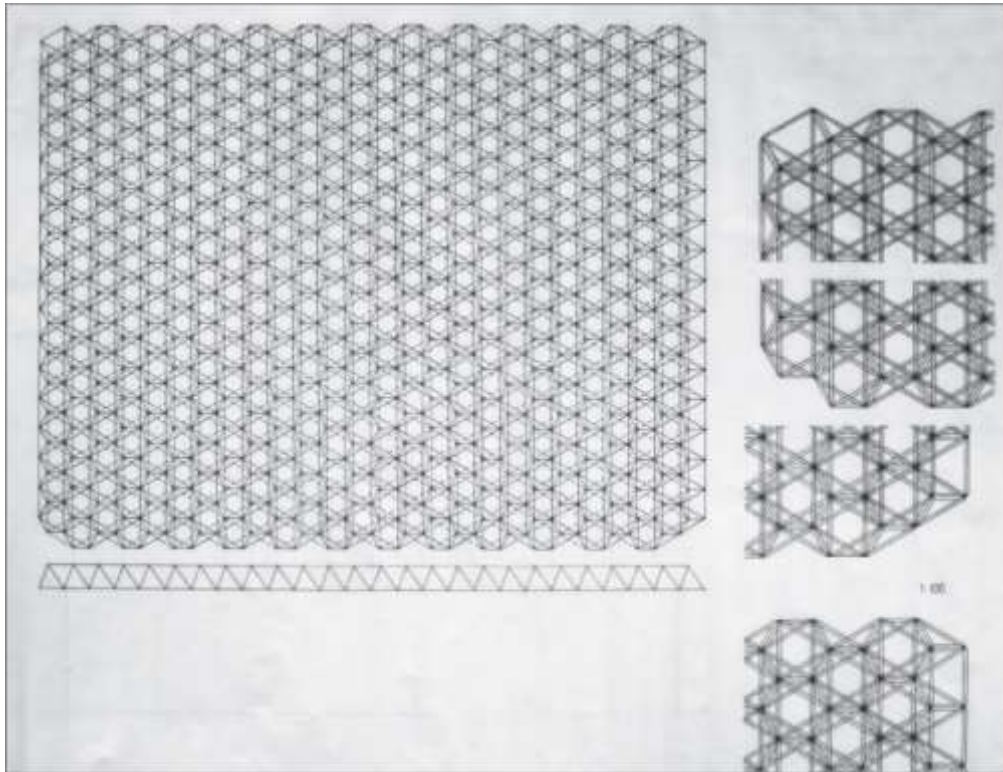


Fig. 1 - Copertura modulare a maglia rombododecaedrica, Sergio Musmeci, 1978 circa, china su carta fonte: Archivio Sergio Musmeci e Zenaide Zanini

La struttura sperimentale è, assieme alle altre di Musmeci, l'espletarsi del concetto per il quale non sono le tensioni ad essere incognite in un'architettura ma la forma. La ricerca della forma minima, quella che occupa il minor spazio e la minore quantità di materia necessari all'espletamento della propria funzione spinge Musmeci dalle membrane ai reticoli spaziali, grazie allo stimolo delle prestazioni eccezionali promesse dal calcestruzzo impregnato con polimeri, agli albori. E' la sua grande padronanza delle leggi della tecnica che gli consente di conciliare il calcestruzzo con la struttura reticolare spaziale, superando il problema dei nodi nella maniera più drastica, ovvero abolendoli e riempiendo il vuoto a forma di poliedro con il calcestruzzo.

Nel 1979, in occasione della settimana dell'Architettura promossa dall' in/Arch, riuscirà a far realizzare da Italcementi dei prototipi a grandezza naturale delle strutture da lui immaginate con il calcestruzzo alleggerito impregnato con polimero dal peso dimezzato rispetto al tradizionale calcestruzzo e dalla risposta a trazione quadruplicata, riuscendo a farle esporre in Piazza San Salvatore in Lauro a Roma (Purini, Barucci, Rossi, Sotoglia, 1979).

Al giorno d'oggi si tende verso una sempre maggiore specializzazione dei materiali compositi, diversificandoli al soddisfacimento delle singole esigenze. La ricerca quindi si muove verso la selezione dei diversi polimeri studiandoli in relazione al loro comportamento con gli aggregati, con l'obbiettivo di sviluppare un calcestruzzo affidabile ma anche relativamente economico, condizione dalla quale non si può prescindere se si vuole la diffusione su larga scala.

Il calcestruzzo a cui viene addizionato il polimero o che viene impregnato con il polimero è un materiale composito in cui il calcestruzzo a base di cemento viene addizionato con delle resine (Macchia, 2004). Le resine utilizzate sono dei polimeri, ovvero delle catene chimiche di monomeri², che possono essere

² Il termine "monomero" deriva dal greco e significa "una parte", si tratta di una molecola in grado di legarsi in catene con molecole identiche dette polimeri. Il processo che dà luogo alla formazione dei polimeri prende il nome di

utilizzate in combinazione con il calcestruzzo in differenti modi, in modo tale da determinarne la prestazione.

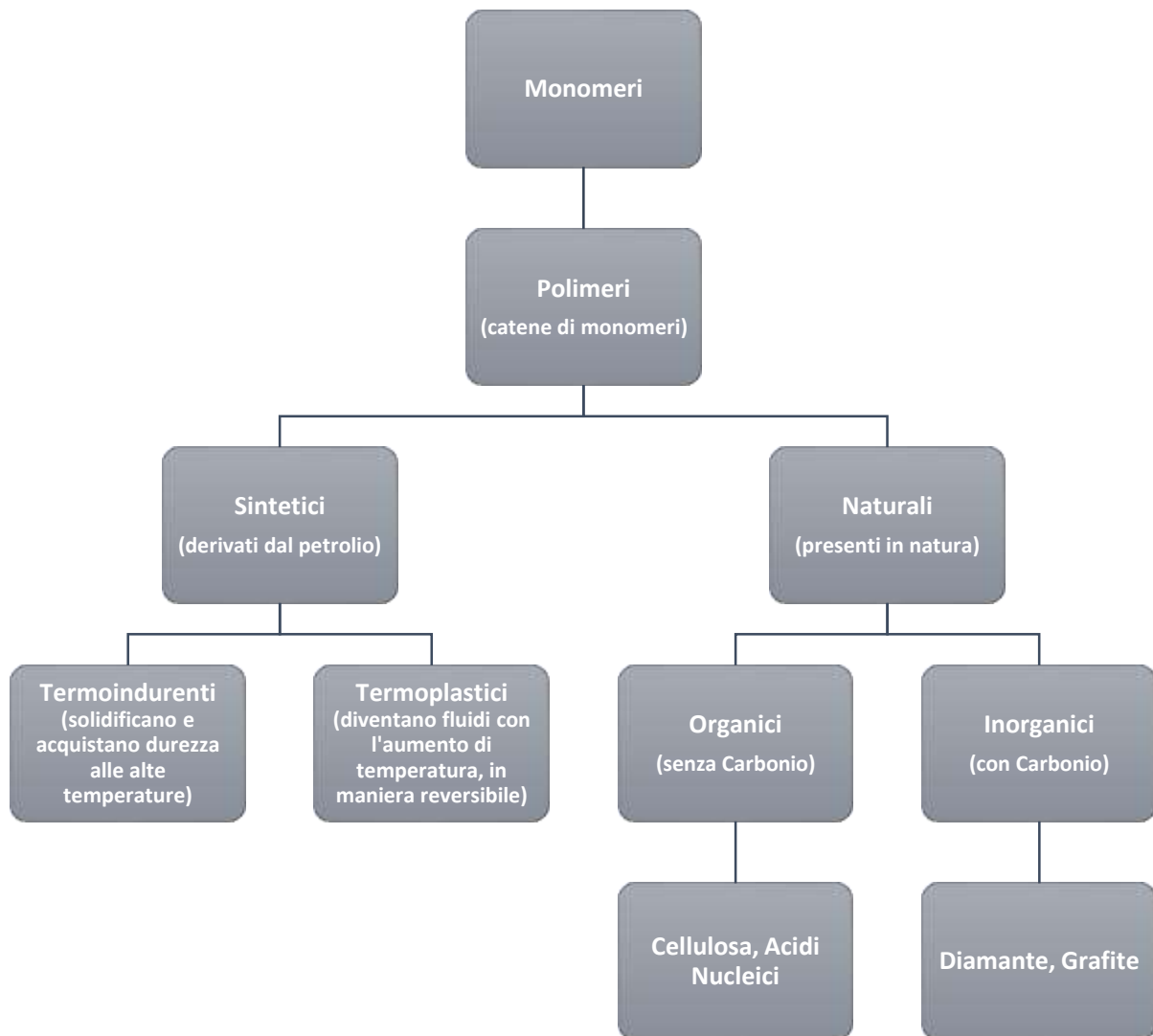


Fig. 2 – Classificazione dei Monomeri

Da questa definizione si deduce che i compositi di calcestruzzo e polimeri sono dei materiali molto diversi dai calcestruzzi fibrorinforzati, sebbene la sovrapposizione di alcuni materiali, che, ridotti in fibre, si utilizzano anche in quest’ultimo tipo di compositi del calcestruzzo, può generare confusione.

La precisazione è sostanziale dal momento che, sebbene come si preciserà successivamente in questo studio, i calcestruzzi impregnati possono essere tali direttamente nell’impasto, la differenza con i fibrorinforzati sta nell’afferenza di questi ultimi con la fisica del materiale, mentre i calcestruzzi compositi con polimeri hanno a che fare con la sua chimica.

Altra differenza da sottolineare è rispetto a quei materiali che agiscono al livello chimico nell’incrementare la prestazione meccanica, ma non sono dei monomeri, come il caso del cosiddetto “vetro liquido” o “vetro

polimerizzazione. I polimeri sono noti nell’industria edile: il cloruro di vinile è un monomero che dà luogo al PVC, l’etilene dà luogo al polietilene, lo stirene al polistirene ed il metilacrilato al plexiglass. I monomeri analizzati in questo studio per l’impregnazione del calcestruzzo solo esclusivamente monomeri organici ovvero quelli derivati dal petrolio.

solubile” ovvero il silicato di sodio³. Questi prodotti, pur impregnando in profondità il calcestruzzo e agendo sulla matrice cementizia, sono esclusi da questo studio, che intende riferirsi quindi esclusivamente ai compositi di calcestruzzo e polimeri.

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’ AICAP⁴.

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 (Macchia, 2004):

- Monomeri inseriti nell’impasto secondo un adeguato *mix design*⁵;
- Inerti lapidei agglutinati e cementati tra loro esclusivamente o parzialmente mediante polimerizzazione di monomeri che quindi assumono il ruolo di legante⁶;
- Monomeri addizionati al calcestruzzo dopo la fase di indurimento e successivamente polimerizzati in cantiere⁷.

E’ evidente sin da questa prima classificazione che la prestazione risultante è fortemente condizionata, oltre che dal polimero che si utilizza, il quale possiede delle proprietà chimiche che connoteranno fortemente il comportamento della struttura, soprattutto dal processo di produzione.

E’ facile immaginare che, se il monomero polimerizza direttamente nell’impasto può fornire una prestazione legata maggiormente al comportamento meccanico, viceversa un monomero che viene applicato per impregnazione alla superficie esterna, sebbene con lo scopo di penetrare all’interno, avrà effetto soprattutto sul comportamento della superficie di separazione con l’ambiente esterno, quindi 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. Quelli più utilizzati si presentano a temperatura ambiente allo stato liquido, sebbene le differenti caratteristiche della stessa fase possono comportare differenti modalità di applicazione: 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 la tensione di vapore⁸ dei monomeri allo stato liquido non deve essere troppo alta, cosa che comporta anche la bassa volatilità del liquido che quindi può essere lasciato in posa sul calcestruzzo dopo la sua applicazione prima che polimerizzi.

PMC: Calcestruzzi modificati con polimeri

I PMC, acronimo che individua i *Polymer Modified Concrete* conosciuti anche come *Polymer Cement Concrete*, sono conosciuti per essere economici e al contempo riuscire a garantire prestazioni migliori rispetto al calcestruzzo ordinario. Vengono spesso utilizzati per la loro resistenza agli agenti aggressivi e per

³ Il silicato di sodio reagisce con uno specifico catalizzatore che gli permette di trasformarsi in un gel capace di penetrare in profondità nei pori del calcestruzzo, agevolando la loro parziale o totale saturazione.

⁴ Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso

⁵ Vengono indicati come PMC ovvero *Polymer Modified Concrete* PMC

⁶ Vengono indicati solitamente come PC ovvero *Polymer Concrete* PC

⁷ Sono i calcestruzzi impregnati con polimeri o calcestruzzi polimero-impregnati *Polymer Impregnated Concrete* PIC

⁸ La tensione di vapore o pressione di vapore superficiale è la pressione gassosa corrispondente all’equilibrio, in prossimità della superficie di un liquido, tra il liquido stesso ed il suo vapore ed è costante a temperatura costante. Se la pressione di vapore è bassa allora il liquido evapora ad una temperatura più alta.

il basso coefficiente di assorbimento, che consente loro di essere impiegati anche in condizioni di forte umidità. I polimeri che di solito si utilizzano per la produzione di PMC sono:

- Stirene-Butadiene⁹ dalla grande resistenza all'abrasione ed all'invecchiamento, al punto che viene considerato la gomma industrialmente più importante, ed utilizzato nella produzione di pneumatici, soles per scarpe e fondi per piste di atletica;
- Resine epossidiche diluite con stirene per diminuirne la viscosità;
- Furano, che si ottiene dalla distillazione di alcune specie legnose, tipicamente dal Pino, che è estremamente volatile, al punto da evaporare a temperatura ambiente ed essere quindi inadatto ad altri tipi di applicazione con il calcestruzzo.

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, al punto che se ne deve aggiungere davvero poca. Nonostante questo, la natura chimica delle molecole utilizzate per la realizzazione di PMC garantisce un'ottima lavorabilità del composto.

La caratteristica principale dei PMC è la loro resistenza all'aggressione da parte degli agenti corrosivi e soprattutto la loro completa impermeabilizzazione, dovuta all'eccellente azione di saturazione che i polimeri effettuano all'interno delle porosità e nelle microfessure del calcestruzzo. Per questo motivo sono largamente utilizzati ad esempio per il consolidamento di pile di ponte, ma anche per il risanamento di pavimentazioni danneggiate per effetto dell'acqua.

Come già accennato, in nessuna delle successive considerazioni si rileverà che un composito di calcestruzzo e polimero riesca a soddisfare più della singola prestazione per cui è progettato. Pertanto è immaginabile che a fronte di alcuni vantaggi si possano individuare altrettante caratteristiche negative anche nei PMC. Si può facilmente immaginare che l'incompatibilità dei polimeri utilizzati nei PMC con le soluzioni acquose interferisca 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 della durabilità.

PC: Calcestruzzi polimeri

La principale tecnica per la produzione di PC consiste nel ridurre al minimo la dimensione degli spazi vuoti tra gli inerti, in modo da ridurre la quantità di polimero richiesta per legare l'aggregato. Per ottenere questo risultato è necessario scegliere correttamente la granulometria degli inerti.

In definitiva, i PC non contengono né cemento né acqua e gli inerti, dalla granulometria fine, sono legati tra loro esclusivamente dal polimero.

La prestazione dipende fortemente dal polimero utilizzato, come per tutti gli altri compositi, ma è strettamente correlata ad una corretta esecuzione dell'impasto (è necessario ad esempio che gli inerti siano completamente privi di residui di polveri, in modo da favorire l'azione legante del polimero), ma anche dagli eventuali altri componenti della miscela, dal momento che spesso questi prodotti sono rinforzati in fibre.

I polimeri utilizzati sono generalmente di due tipi:

- Polimeri termoindurenti: hanno la caratteristica di indurire durante il processo di formatura (riscaldamento a 200°C), ed il vantaggio di non perdere durezza se riscaldati nuovamente. Sono

⁹ È un co-polimero ovvero un polimero composto da due monomeri differenti. Lo stirene-butadiene è conosciuto come gomma sbr.

polimeri termoindurenti le gomme vulcanizzate, le resine epossidiche, le resine fenoliche¹⁰ ed i poliesteri. Sono in generale più duri dei polimeri termoplastici (descritti di seguito) proprio perché sono necessarie temperature molto elevate per distruggere il polimero e quindi minare la sua capacità come legante;

- Polimeri termoplastici: sottoposti a riscaldamento hanno la caratteristica di arrivare a liquefarsi, per indurire nuovamente con il successivo ciclo di abbassamento della temperatura. Il processo è reversibile, a meno che non si arrivi a temperature molto alte che degradano irrimediabilmente il polimero. Sono polimeri termoplastici il polietilene, il polistirene ed il cloruro di polivinile, ma anche il teflon ed il nylon.

Spesso si utilizzano additivi come le ceneri volanti (ad esempio fumo di silice¹¹) per incrementare alcune proprietà dei PC che di solito si riferiscono ad una migliore prestazione meccanica ed ad una buona resistenza agli agenti aggressivi ed alla corrosione.

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 monomeri¹² può conferire grande duttilità al composito.

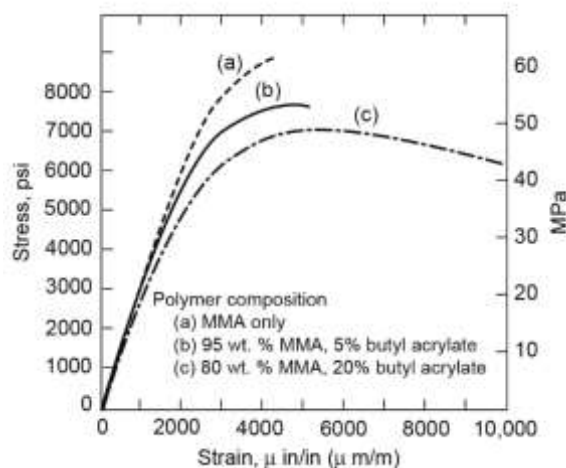


Fig. 3 – diagramma tensione-deformazione relativo a PC con Metilmetacrilato e con due diverse combinazioni di metilmetacrilato e acrilato di butile (Metha, 2006)

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.

PIC: Calcestruzzi polimero impregnati

¹⁰ 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.

¹¹ Il fumo di silice si ottiene come sottoprodotto della lavorazione all'arco elettrico di tutte quelle leghe metalliche in cui è presente il silicio e viene recuperato da appositi filtri di abbattimento delle polveri. (Pigni, 1998)

¹² In genere si aggiunge l'acrilato di butile.

Il *concept* che sta alla base del progetto di un composito di calcestruzzo polimero impregnato parte dall'idea che se i vuoti presenti nel calcestruzzo indurito sono alla base di un decremento della prestazione meccanica e della durabilità soprattutto in ambienti aggressivi, qualora si eliminassero si otterrebbe un miglioramento prestazionale.

L'impregnazione delle porosità del calcestruzzo resta una pratica più difficoltosa di quanto si possa immaginare soprattutto se si pensa che i fluidi hanno una viscosità e che le cavità non sono vuote, ma contengono aria o acqua allo stato di vapore. Si presenta necessario quindi, oltre che abbassare la viscosità del monomero scelto quando è allo stato liquido, anche preparare il calcestruzzo deumidificandolo il più possibile e rimuovendo l'aria al suo interno.

I monomeri utilizzati per questa tecnica sono soprattutto lo stirene ed il metilmetacrilato proprio perché si presentano, a temperatura ambiente, con una bassa viscosità, un'alta temperatura di ebollizione (cosa che permette il loro utilizzo per il tempo necessario all'impregnazione), 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 (Lee, 2016):

- Aggiunta di un catalizzatore a temperatura ambiente, ovvero di un elemento esterno che favorisca il processo di polimerizzazione. Questa pratica è sconsigliata perché difficilmente controllabile, poiché avviene al livello microscopico, e soprattutto richiede molto tempo
- Bombardamento con raggi Gamma a temperatura ambiente, anche questa pratica favorisce la polimerizzazione dei monomeri sopra citati, ma le implicazioni legate alla salute degli operatori ne scoraggiano l'utilizzo.
- 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.

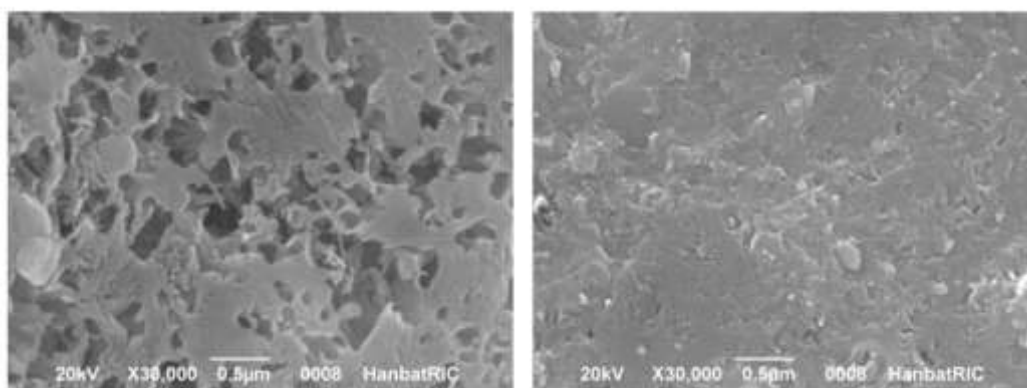


Fig. 4 – Scansione al microscopio elettronico del calcestruzzo ordinario (a sinistra) e di un PIC con metilmetacrilato (a destra). Si nota la differenza nel numero di cavità (Lee, 2008)

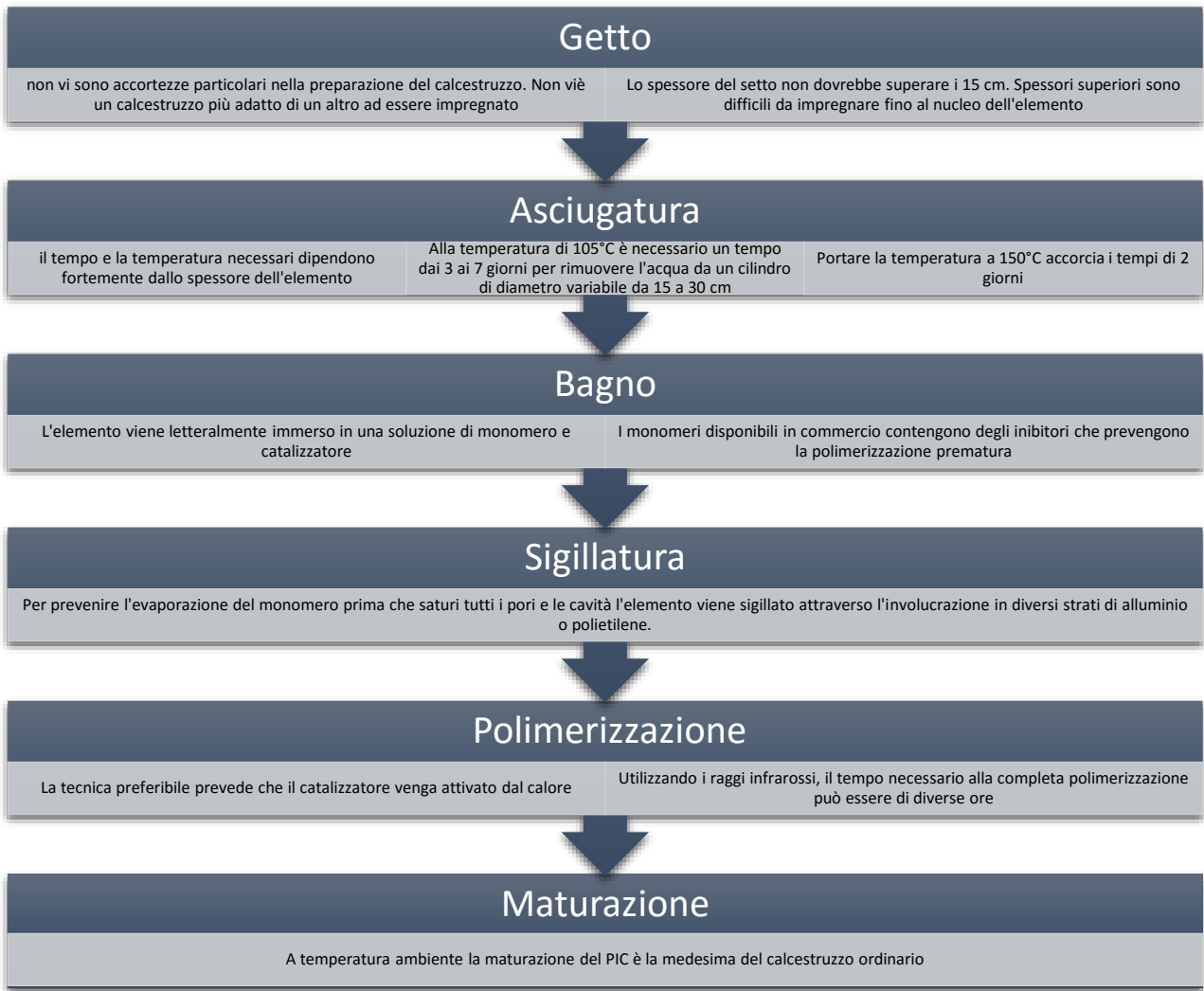


Fig. 5 – schematizzazione delle fasi di produzione del PIC

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.

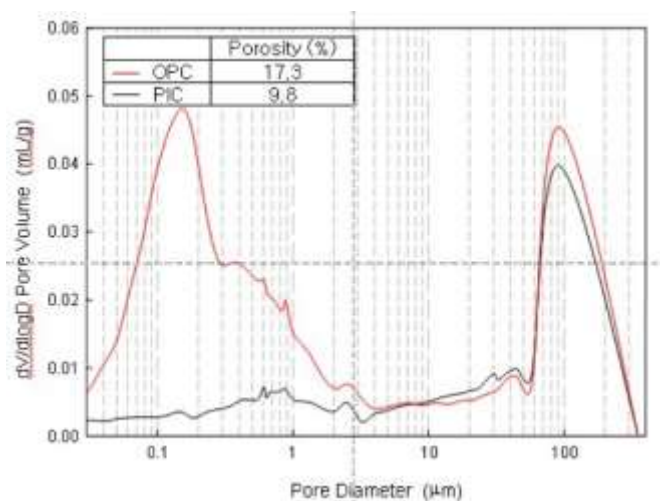


Fig.6 – Comparazione della porosità del calcestruzzo ordinario e del calcestruzzo PIC con metilmetacrilato (1% in peso): la porosità si abbatte del 57% circa (Lee, 2008)

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 (Lee, 2008) un evidente incremento della resistenza alla corrosione come si vede in Fig. 6.

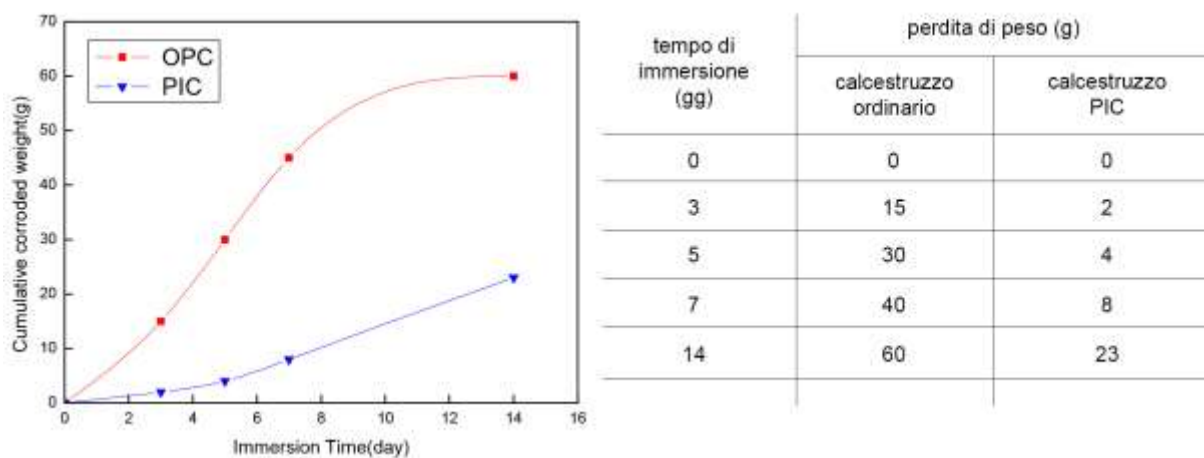


Fig. 6 – Valutazione della resistenza alla corrosione di un provino di calcestruzzo ordinario e PIC immerso in una soluzione di 5 moli di acido solforico (Lee, 2008)

Limiti attuali ed applicazioni future dei compositi di calcestruzzo e polimeri

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.

Ciò nonostante, si tratta di materiali dal grande potenziale applicativo per le loro caratteristiche e certamente potranno rispondere egregiamente, come materiali da costruzione, alle esigenze future. Per il momento l'unico vero limite alla ricerca si può individuare nel costo elevato della maggior parte dei polimeri che si possono utilizzare combinati con il calcestruzzo, dovuto sia al costo intrinseco del polimero, che al processo produttivo che risulta essere laborioso. Per questo motivo le prospettive di impiego negli anni passati hanno riguardato quasi esclusivamente la prefabbricazione pesante di tubazioni, serbatoi, sili, ovvero quelle applicazioni in cui i costi si ammortizzano parzialmente con la prefabbricazione e comunque l'impiego di calcestruzzi particolarmente resistenti a liquidi aggressivi come gli acidi è quasi obbligato (Collepardi, 1991).

Attualmente, i costi di produzione restano elevati, ma alcuni tipi di compositi come i PC in cui il polimero sostituisce completamente il legante, giustificano l'elevato costo con la prestazione meccanica davvero 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.

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 addirittura 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 (Bozkurt, Islamoglu, 2013).

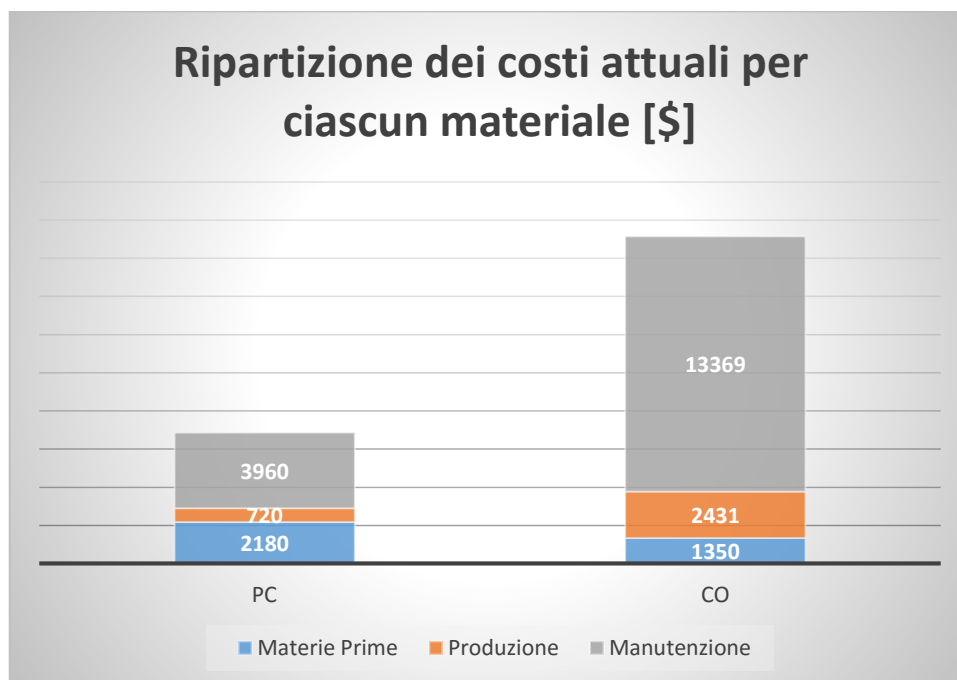


Fig.7 – Ripartizione dei costi annuali per lo stesso elemento di tubatura realizzato con Calcestruzzo Polimero e con Calcestruzzo Ordinario (Bozkurt, Islamoglu, 2013)

Una delle prestazioni che non sono state affrontate sono quelle relative al comportamento al fuoco, ma anche in questo caso la ricerca sui polimeri e sul loro comportamento all'interno del calcestruzzo è ad un punto di svolta. I calcestruzzi ad alte prestazioni, ovvero quelli che hanno una resistenza alla compressione tra 60 e 75 N/mm² (CSLP, 2016), per raggiungere queste caratteristiche così elevate hanno una porosità bassissima. Questo, che abbiamo visto essere un vantaggio anche di alcuni compositi di calcestruzzo e polimero, ha, come rovescio della medaglia, un inconveniente non da poco: per effetto di questa bassissima porosità, non è possibile per il vapore acqueo che si forma a seguito di un aumento della temperatura oltre i 100°C, fuoriuscire dall'elemento di calcestruzzo, provocandone in alcuni casi addirittura l'esplosione (Lura, 2014). E' in preparazione nei laboratori dell' EMPA di Dübendorf un composito di calcestruzzo e polietilene che ha la proprietà di avere una grande resistenza meccanica a compressione, una discreta resistenza meccanica a trazione, e soprattutto, mentre in esercizio la porosità del materiale è bassissima, in caso di incendio, le proprietà termoplastiche del polietilene consentono al polimero di sciogliersi, liberando le cavità che prima occludeva e consentendo al vapore acqueo di sfogare scongiurando il rischio di esplosione.

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 27/03/2016)
- Brodini Alessandro, "Le coperture a grande luce nell'opera di Sergio Musmeci" in "La concezione strutturale, Ingegneria ed architettura in Italia negli anni cinquanta e sessanta", 2008, Allemandi & C., Torino
- Collepari Mario, "Scienza e tecnologia del calcestruzzo", 1991, Hoepli, Milano
- CSLP, "Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale", 2016, www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=3274&Itemid=10 (consultato il 10-03-2016)
- Enzler Rudolf, "Kunststoff-Faserarmierung von Beton" in "Schweizerische Bauzeitung", 1975, ETH Eidgenössische Technische Hochschule, Zurigo, pp 713-715
- Iori Tullia, Marzo Magno Alessandro, "1861 2011 150 anni di storia del cemento in Italia", 2011, Gangemi Editore
- 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 18-03-2016)
- Lura Pietro, RSI.ch, 2014, www.rsi.ch/play/tv/il-giardino-di-albert/video/calcestruzzo-ad-alta-prestazione?id=1743412 (consultato il 19-03-2016)
- 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, McGraw Hill, New York
- Musmeci Sergio, "Le tensioni non sono incognite" in "Parametro", 1979, n°80 pp 64-68
- Pigni, Ivano, "Impiego di fumi di silice nei calcestruzzi. Aspetti tecnologici innovativi", in "in Concreto", 1998, n°17, pp 46-49
- Purini Franco, Barucci Clementina, Rossi Giovanni, Sotoglia Antonello, "Ritorno a Roma: città, didattica, vita quotidiana: catalogo della mostra organizzata dall'INARCH nell'ambito della settimana dell'architettura", 1979, Staderini, Roma