

GIGLIOLA AUSIELLO

CALCESTRUZZO FLUIDO PER ARCHITETTURE FLUIDE

Self compacting concrete for shaped architectures



LUCIANOEDITORE

Non è certo un caso che le opere contemporanee di architettura, oggi, prediligano sempre più calcestruzzi tecnologicamente “speciali” e, in particolare, tutte quelle che scelgono la soluzione del calcestruzzo a facciavista oppure modelli scultorei imperniati sulla plasticità più assoluta si avvalgano di miscele autocompattanti. Nel diventare fluido il calcestruzzo ha offerto semplici risposte, necessarie a compiere un passo verso l’industrializzazione dei getti in cantiere, fino ad offrire un nuovo grado di libertà all’architettura e ad innescare il cambiamento. Nella storia di questa pietra creata, la fluidità implica l’accesso in un dominio conoscitivo eminentemente tecnico, in cui entrare, anche virtualmente, è estremamente necessario e l’analisi di realizzazioni emblematiche guadagna un certo rigore metodologico, fondamentale ai fini di una conoscenza di valore scientifico di un sistema tecnologico, vecchio anagraficamente, soprattutto dal punto di vista dei giapponesi, che deve ancora crescere nella realtà europea.

ai miei studenti

GIGLIOLA AUSIELLO

**CALCESTRUZZO FLUIDO
PER ARCHITETTURE FLUIDE**

Self compacting concrete for shaped architectures

©2018 by LUCIANO EDITORE – Napoli
Via P. Francesco Densa, 7
80138 Napoli
[http:// www. lucianoeditore.net](http://www.lucianoeditore.net)
e-mail: [info@ lucianoeditore.net](mailto:info@lucianoeditore.net); editoreluciano@libero.it

Tutti diritti riservati
È vietata ogni riproduzione

ISBN: 978-88-6026-246-2

Editing

Gigliola Ausiello, Luca Vincenzo Passaro, Immacolata Piscopo

Grafica copertina

Luca Vincenzo Passaro

In copertina

Stazione Marittima
Zaha Hadid, Salerno, 2016

Indice

7 PRESENTAZIONE Enrico Dassori

10 INTRODUZIONE Design, constructions and re-design

Capitolo primo

17 **FRA TECNOLOGIA E ARCHITETTURA**

Abstract

1.1 Fluidità ... autocompattabilità

1.2 Cenni storici

1.3 Proprietà reologiche

1.4 Prestazioni allo stato indurito

1.5 Innovazioni e vantaggi

1.6 Verso architetture fluide

Capitolo secondo

39 **LA COMPOSIZIONE**

Abstract

2.1 Il principio della composizione

2.2 Il materiale finissimo

2.3 Il dosaggio degli SCC

2.4 Tipologie di SCC

2.5 Gli additivi

2.6 Composizioni teoriche a confronto

2.7 Composizioni di realizzazioni celebri

Capitolo terzo

77 VERSO IL CANTIERE

Abstract

- 3.1 Confezionamento
- 3.2 Posa in opera
- 3.3 Stagionatura
- 3.4 Valutazione delle proprietà reologiche
- 3.5 Ritiro
- 3.6 Facciavista
- 3.7 Durabilità
- 3.8 Tecnologia dei pali a elica continua

Capitolo quarto

111 PERFORMANCE IN PROGRESS

Abstract

- 4.1 Un'aspirazione all'eternità o alla performance?
- 4.2 Calcestruzzi fibrorinforzati
- 4.3 Calcestruzzi nanorinforzati
- 4.4 Calcestruzzi traslucidi
- 4.5 Calcestruzzi autopulenti e antinquinanti
- 4.6 Calcestruzzi leggeri strutturali autocompattanti
- 4.7 Futuri scenari di sostenibilità

131 Quadro Normativo

141 Bibliografia e sitografia

Presentazione

*Enrico Dassori**

L'aggettivo "fluido" che compare due volte nel titolo del lavoro di Gigliola Ausiello offre lo spunto per innumerevoli riflessioni che hanno come comune radice l'intenzione dell'Autrice di cimentarsi con il classico tema della natura duale dell'architettura, ovvero della lettura ermeneutica del suo rapporto con la tecnica.

Tema classico perché da sempre, almeno dal momento della trasposizione dell'*homo faber* nella sua declinazione *sub specie aedile*, esso è lo snodo di tutti i ragionamenti che, interessando l'architettura, implicano necessariamente riflessioni sul rapporto fra razionalizzazione e interiorità.

Associare la fluidità del calcestruzzo alla fluidità dell'architettura è gesto ardito che ci trasferisce direttamente al cuore della questione, portando a sintesi tre secoli di vicende caratterizzate principalmente dal progredire della

tecnica e dal formarsi dell'estetica a disciplina autonoma.

La stretta relazione che Gigliola, con l'approccio rigoroso che le è congegnale, propone tra "calcestruzzi speciali tecnologicamente" e "opere contemporanee di architettura" sottende il principio che il materiale non ha di per sé alcuna forma, ma le forme, quasi sempre, dipendono dal materiale. Il perfetto equilibrio fra trattazione tecnologica ed esempi di applicazioni ad architetture significative dimostra poi la raggiunta maturità di chi guarda ai materiali con due categorie di valutazione affatto distinte: quella delle loro caratteristiche quantitativamente misurabili, che rendono oggettiva la costruzione, e quella delle loro vocazioni figurative, che ne rappresentano le potenziali valenze espressive.

Ma l'ottimo lavoro di Gigliola mi stimola ad un ulteriore passo in avanti, che trae spunto da una considerazione di Vittorio Gregotti circa la progressiva dissolvenza dell'architettura da fenomeno eminentemente materiale a immagine più o meno virtuale.

Per compiere questo passo vorrei introdurre un altro aggettivo, per certi versi, al netto di un doveroso distinguo tecnologico, non distante da "fluidico". L'aggettivo è "liquido" e si riferisce, nelle parole di Zygmunt Bauman, al tipo di vita che si tende a vivere nella società liquido-moderna, una società individualizzata che porta all'ascolto speciale delle emozioni e dei sentimenti che si agitano dentro di noi.

Orbene, proprio le architetture proposte dall'Autrice a

corollario di argomenti estremamente tecnici, aprono uno scenario di incredibile valenza concettuale laddove la concretezza di architetture costruite induce a considerare la relazione fra aspetti tecnici e simbolici, fra realtà tangibile e concetto astratto.

Nulla di più singolare che ad accendere questi pensieri sia un materiale, il calcestruzzo, ancorché tecnologicamente speciale, di così evidente natura tettonica.

Con queste ultime riflessioni, apparentemente fuori tema, ho inteso ringraziare Gigliola Ausiello per aver svolto con rigore e sensibilità un argomento solo in apparenza concluso. La bontà di un impegno, come in questo caso, si misura non solo con le cose dette ma anche con il contributo al divenire delle idee.

*Ordinario di Architettura Tecnica
Università degli Studi di Genova
Direttore del Dipartimento Architettura e Design

Design, constructions and re-design

What does architecture have in common with music?

The answer seems difficult, but in reality different languages lead to the same place: the soul of man.

Both light up the senses, thanks to which we live strong emotional experiences. Both build spaces to live and they make spatial poetry their design goal.

The architectures are physical and intangible spaces. Musical compositions are metaphysical and tactile space.

These are spaces of great existential value, differently unique, because they have different sizes, both with its own wraparound shape.

Remaining in the musical theme, we are reminded of the famous aphorism of Gustav Mahler which says that “tradition is to keep the fire not to adore the ashes”.

Analyzing the thought of the composer, which we can define as the architect of change, we understand another important message for those who have to create new things, not as an alternative to the past, not even in nostalgic visions.

Ancient and modern must be on the same level in order to create a dimension of contemporaneity that it includes the past and it's

INTRODUZIONE

Che cosa hanno in comune l'architettura e la musica?

La risposta sembra difficile, ma nella relatività dell'essere complicato o comprensibile, la riflessione più immediata porta a dire le energie, che con linguaggi diversi arrivano esattamente nello stesso luogo, l'animo dell'uomo.

Entrambe accendono i sensi e fanno vivere esperienze emozionali forti.

Entrambe costruiscono spazi per vivere e fanno della poetica dello spazio il loro obiettivo progettuale.

Uno spazio fisico, e a tratti intangibile, quello delle composizioni di architettura.

Uno spazio metafisico, e a volte tattile, quello delle composizioni di musica.

In entrambi i casi si tratta di uno spazio di grande valore esistenziale, diversamente unico, perché di dimensioni diverse, ma costantemente affidato alla poetica e con una propria forma avvolgente.

E, per restare in tema di musica, suona a metà tra un proposito e un'esortazione il celebre aforisma di Gustav Mahler "La tradizione è custodire il fuoco non adorare le ceneri."

sensitive to the appeal of innovation.

Returning to the words of Gustav Mahler, the fire of tradition means looking at the new in the right way, with the awareness of the potential of the past.

Concrete is rich in tradition starting from Les Corbusier up to Pier Luigi Nervi, a great innovator.

It has always been a technological statement with a more or less hidden focus on innovation. In fact, while it seemed stable as regards the technological system and the applications, the research continued to look ahead. Today, we can say that the use of this material is witness to an epochal change both for the regeneration of structural principles and for the poetics of a new "stone". The "new artificial stone" has given and continues to give infinite formal freedoms and it proves to be open to innovation.

As Isaac Newton says "Truth is ever to be found in the simplicity, and not in the multiplicity and confusion of things", therefore we understand that new and complex formal possibilities arise from simplicity and this is allowed by the "fluidity" of the concrete, fluidity that offers simple answers necessary to take a step towards the industrialization of the building site. Nowadays fluidity's a rediscovery and at the same time it is also an added value because it's easier to obtain and guarantees superior performance. Certainly a self compacting concrete still needs an active experimentation. "The main fuel to speed the world's progress is our stock of knowledge, and the brake is our lack of imagination." This message by Julian Lincoln Simon, an American economist, introduces the methodological path to follow in the field of fluid concrete. It's a "special" technology, that must earn affirmations on the field in the European reality, before it can be systematized in the right way. Only the experimentation of time, strong in tradition and in the identity of European culture, can allow growth in the sense of progression. It's a methodological path marked by three moments: design, construction and re-design. Each is a premise of the next, like a

Ma entrando nel merito del senso più proprio dell'affermazione di questo compositore, artefice del cambiamento, sembra esserci un altro messaggio importante per chi deve misurare l'approccio al nuovo, non come alternativa, rispetto alla lezione del passato, tantomeno rinchiusi in visioni nostalgiche e liricheggianti.

È necessario porre sulla stessa linea di orizzonte il nuovo e l'antico e cercare una dimensione della contemporaneità più vasta ed inclusiva, sensibile al fascino dell'innovazione, ma capace di inglobare in forma attiva anche il passato.

Il fuoco della tradizione, dunque, consente di guardare al nuovo in maniera corretta, caricati dalla passione e forti della consapevolezza delle potenzialità dell'esperienza dell'abitare nel passato.

Il calcestruzzo, forte della tradizione lecorbusiana e di grandi innovatori, come Pier Luigi Nervi, tanto per citare una pietra miliare, è sempre stato un enunciato tecnologico animato da una tensione graduale verso l'innovazione, a volte un po' "nascosta", ma sempre mirata al progetto delle prestazioni, in misura da ambire all'eccezionalità, più di quanto non apparisse.

E, mentre sembrava aspirare alla stabilità per quanto attiene al sistema tecnologico ed alle applicazioni, la ricerca continuava a guardare avanti. Oggi, col senno di poi, è ben più facile constatare come sia stato soltanto un felice inizio, di portata "rivoluzionaria" nel senso del cambiamento epocale, sia per la rigenerazione dei principi strutturali, che per la poetica di una nuova "pietra".

Le infinite libertà formali che la "nuova pietra artificiale" dispensa fin dall'inizio dell'Ottocento promettevano molto di più. Da traguardo stabile e duraturo destinato a sfidare i secoli, quale sembrava essere, questo sistema tecnologico continua a dimostrare di essere costantemente aperto all'innovazione, sempre più progettato in una visione congiunta di eccezionalità costruttiva e strutturale, ma anche

*circle that closes. This means proceeding to optimize the performance and the construction site. Other special concretes design a future of performance in progress, with even greater potential, certainly more orderly.
Ronchamp was just a beginning.*

How do we look at tomorrow?

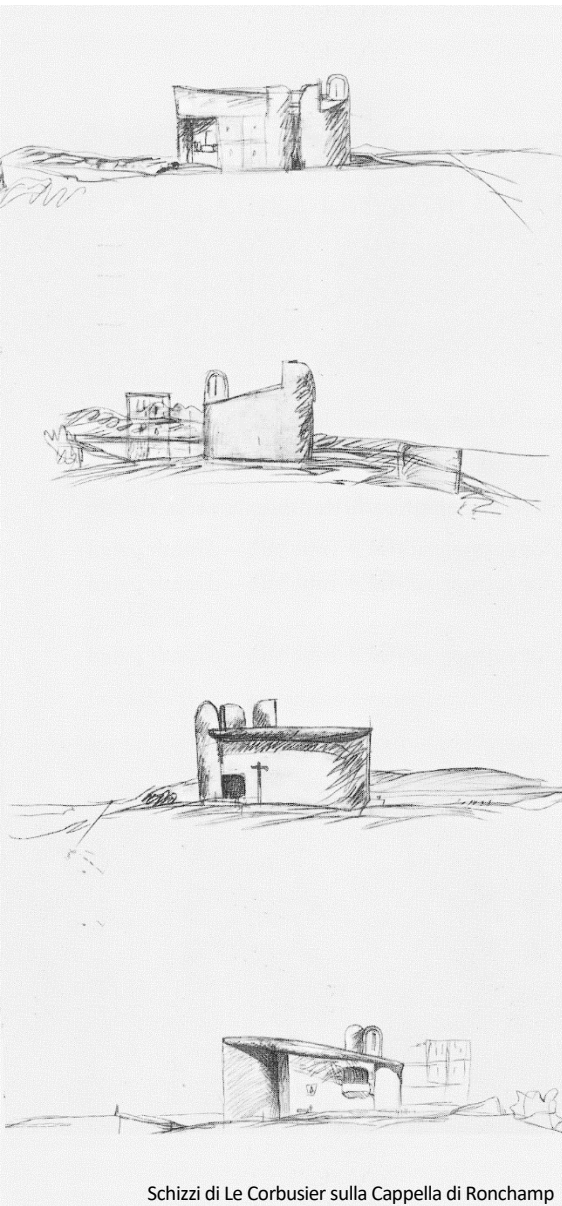
Albert Einstein says "Learning is experience. Everything else is just information", so we start learning. Man communicates with others and then instinctively teaches, transmitting knowledge because "teach is to learn twice" as Joseph Joubert says.

prodigo di potenzialità dal punto di vista delle libertà formali ancora in grado di offrire.

I progressi tecnologici compiuti nel corso del Novecento sono molto più “pesanti” di quanto possa sembrare e vanno ben soppesati, ma sono ancor di più “generosi” nei confronti del futuro e prodighi di sviluppi eccezionali almeno quanto le premesse.

Nel diventare “fluidi” il calcestruzzo ha offerto semplici risposte necessarie a compiere un passo verso l’industrializzazione del cantiere. Eppure, come dice Isaac Newton "La verità si trova sempre nella semplicità, mai nella confusione", e quindi non può fare meraviglia constatare che dalla semplicità nascano nuove e complesse possibilità formali, sulla scia di un orizzonte di libertà che la tecnologia del calcestruzzo nel suo inizio aveva tracciato. Ma è anche vero che è semplice complicare le cose e dietro una verità costruttiva intrinsecamente semplice, che a tratti rasenta la nudità e la converte in qualità estetica, c’è un universo di forme fluide che tratteggia spazi avvolgenti, in una prospettiva di leggerezza nuova per una “pietra” che, seppur artificiale, è pur sempre l’emblema della pesantezza.

Oggi la fluidità è una riscoperta ed è, al contempo un valore aggiunto, nella misura in cui è più facile cantieristicamente ottenerla e riesce ad offrire performance superiori. Come molte innovazioni, allineata tra passato e futuro, la tecnologia del *self compacting concrete* vive in una dimensione di presente che ha bisogno di maggiore sperimentazione attiva. Tuttavia, la fluidità, nella genesi di una pietra creata, implica l’accesso in un dominio conoscitivo eminentemente tecnico, in cui sporcarsi le mani, anche virtualmente, è estremamente necessario. “Il miglior carburante per alimentare il progresso mondiale è la nostra scorta di conoscenze, e il freno è la nostra mancanza di immaginazione”. Questo “messaggio” di Julian Lincoln Simon, economista statunitense, introduce il percorso metodologico da seguire per alimentare le scorte



Schizzi di Le Corbusier sulla Cappella di Ronchamp

conoscitive in materia di calcestruzzo “fluido”. Si tratta di una tecnologia “speciale”, anagraficamente non giovane, che deve ancora guadagnare affermazioni sul campo nella realtà europea, prima di poter essere sistematizzata nella maniera giusta. Soltanto la sperimentazione del tempo, forte della tradizione e dell’identità della cultura europea, può consentire, attraverso le realizzazioni, che si affacciano sulla scena costruttiva del presente, in misura sempre crescente, una crescita nel senso di percorso in avanzamento.

Una logica circolare si delinea: la conoscenza della tecnologia per la diffusione nel campo del costruire, la realizzazione di nuove costruzioni, tra le quali brillano di luce propria opere emblematiche che celebrano l’architettura e l’abitare nella contemporaneità, il ritorno all’enunciato tecnologico da ottimizzare in vista di una stabilità tecnologica ancora in divenire. Un percorso metodologico scandito da tre momenti: *design, constructions and re-design*. Ciascuna delle tre posizioni fa da premessa alla successiva, ma, come un cerchio che si chiude, significa procedere per ottimizzare le prestazioni e il cantiere, ma soprattutto ricominciare dall’inizio significa creare un nuovo inizio. Altri calcestruzzi speciali tratteggiano un futuro di performance in progress, con potenzialità ancor più grandi, certamente di ordine ben più alto rispetto all’immaginabile.

Ronchamp era solo un magnifico inizio.

E, dunque, come guardare al domani?

Cominciando a imparare, come raccomandava Albert Einstein, perché “imparare è un'esperienza; tutto il resto è solo informazione”. E poi, nella naturale attitudine che caratterizza l’essere umano, sempre più teso alla comunicazione con gli altri, e quindi istintivamente insegnante, bisogna trasmettere la conoscenza perché, come dice il filosofo francese Joseph Joubert “insegnare è imparare due volte”.

CAPITOLO PRIMO

FRA TECNOLOGIA E ARCHITETTURA

L'Architettura è un diamante.
Nella natura essa rappresenta l'infinito contro l'indefinito. Nel tempo e nella materia ciò che resta contro ciò che passa; la "perpetuità" (dice Palladio).
[...]
Ma quando è pura pensavo – anche l'Architettura del cemento armato è pura e limpida come un cristallo; è, come un cristallo, puro specchio di leggi fisiche: il mirarla contro il cielo dà lo stesso rapimento di esattezze (esattezza, che incanta).¹

Gio Ponti

1.1 Fluidità ... autocompattabilità

Il calcestruzzo autocompattante è un tipo di calcestruzzo caratterizzato da un'elevata deformabilità allo stato fresco, che consente al composto di essere agevolmente posto nei casseri, senza nulla togliere alle caratteristiche di omogeneità, tantomeno di resistenza. I vantaggi che un prodotto molto fluido offre sono di facile intuizione e convergono nella direzione della velocizzazione delle operazioni in cantiere, obiettivo che da sempre ha caratterizzato il momento della realizzazione. Si delinea, dunque, per la tecnologia dei calcestruzzi, un valore aggiunto, rispetto alla garanzia delle abituali proprietà reologiche, che si estrinseca nella rapidità dell'esecuzione dei getti e nel risparmio che ne consegue.

La reologia è, in effetti, la scienza che studia deformazione e scorrimento della materia e deriva dal greco "reo" che significa *scorrere, fluire*.

In effetti, più che di elevata fluidità sarebbe più corretto

The self compacting concrete is a type of concrete characterized by a high degree of deformability in the wet state without harming the characteristics of homogeneity and resistance. Fluidity allows it possible to speed up construction operations too, bringing considerable savings. Therefore self compacting means that it's a concrete that can autonomously settle in the formwork, thanks to gravity alone, and therefore without vibration of formworks. The self compacting concrete was born during the eighties of the twentieth century thanks to the study of the Japanese Hajime Okamura (university of Tokyo). Before him, in the 1975, Mario Collepari of the Ancona's University develops "rheoplastic" concrete that can be considered an anticipation of self compacting. In conclusion, we can say that the current self compacting concrete, whose acronym is SCC, is the result of the Japanese and Italian research.

In order that the self compacting concrete can settle in the formwork only by gravitational force, it

¹ Gio Ponti, *Amate l'architettura (l'architettura è un cristallo)*, Vitali e Ghianda, Genova, 1957 (ora CUSL, Milano, 2004) pp. 2-3.

must possess the following rheological properties: high fluidity and deformability, in order to be moved easily; Filling ability of the formwork of any geometry; the passing ability, this is referred to the system of passage between the reinforcing bars; the Stability, that it concerns the ability to remain homogeneous during transport and then installation; the homogeneity; and finally the resistance to segregation.

Well, the deformability of a self compacting concrete in the wet state is a characteristic that is conserved over time, much longer than it does in ordinary concretes. The graph (fig n.11) summarizes the comparison with ordinary concretes, characterized by different consistencies. The excellent performance in the wet state corresponds to those in the hardened state, in fact we have high mechanical strength and a remarkable quality. Quality offered by the industrialization of the product, which in this case also means durability. As the matter of fact, the filling ability is guaranteed without adding water, it means having a low relationship w/c. And this is the first guarantee of high mechanical strength, which in the logic of the new legislation is a prerequisite for durability.

From the comparison of the graphs (fig n.15) that relate a self compacting with an ordinary concrete, we can see that the development of the resistance to short curing starts in increments of 25% in the first days up to 15% after seven days.

In Conclusion the advantages in using a self compacting concrete invest more fronts starting from the technical ones, up to the design, economic and environmental ones.

A technical advantage concerns the velocity of the castings and the filling of formworks of articulated geometries, this allows to reduce the time of installation. Moreover the high degree of compaction allows to use little water, eliminating the bleeding phenomenon.

From the economic point of view shorter processing times lead to lower labor costs and the elimination of the vibration operations, this involves the elimination of the noise produced by the machinery of the vibration systems. Therefore, noise pollution is reduced.

Moreover, the fluidity of concrete leads to a new fluid architecture an example is represented by the works of the famous architects Zaha Hadid, Norman Foster and Massimiliano Fuxas which exploit a new technology for a new architecture.

parlare di elevata capacità di scorrimento alludendo all'agevole movimentazione del conglomerato durante le fasi di trasporto e di posa in opera in cantiere, che culmina nella definizione della caratteristica allo stato fresco da cui trae la denominazione, l'autocompattabilità, che si definisce come capacità di disporsi autonomamente nelle casseforme per effetto della sola forza gravitazionale, senza necessità di vibrazione (Figg. 1 e 2).

L'elevata fluidità, che consente al calcestruzzo allo stato fresco di subire elevate deformazioni (Figg. 3 e 4), è il presupposto dell'autocompattabilità, la principale caratteristica reologica di questo tipo di calcestruzzi, che naturalmente non limita le altre caratteristiche, anzi le conserva inalterate al punto da poter considerare il sistema cementizio una miscela stabile. Ciò significa che è garantita l'omogeneità, in quanto costante composizione in tutti i punti, presupposto fondamentale per la qualità e le caratteristiche del prodotto finale.

1.2 Cenni storici

Nel corso degli anni Ottanta del Novecento la ricerca tecnologica, ad opera del giapponese Hajime Okamura dell'Università di Tokyo, mette a punto il calcestruzzo autocompattante, dando stabilità alle sperimentazioni sviluppate nel corso del Novecento sui primi additivi superfluidificanti, quando si comincia a parlare di calcestruzzo *reoplastico*. Con questo termine si sottolinea un'elevata fluidità contemporaneamente ad una plasticità tale da essere garanzia di coesione, senza rischio di segregazione. Un precedente storico è d'obbligo. Nel 1975 il prof. Mario Collepari dell'Università di Ancona mette a punto il calcestruzzo "reoplastico" che, per le caratteristiche, può

considerarsi un'anticipazione degli autocompattanti. Caratterizzato da un'elevata fluidità (classe S5 – slump ≤ 22 cm) e non segregabile, grazie all'impiego dei superfluidificanti a base di naftalensolfonato e all'accurato studio della composizione, questo calcestruzzo inizia ad offrire il duplice vantaggio di essere pompato per lunghe distanze senza segregare e di consentire la realizzazione di getti di sezioni armate complesse, riducendo al minimo il lavoro di vibrazione. L'impiego di questa miscela nella realizzazione del bacino di carenaggio del porto di Trieste rafforza il valore di innovatività della composizione messa a punto da M. Collepari.

Negli anni Trenta, Sessanta e Settanta del Novecento, i superfluidificanti entrano nella composizione del calcestruzzo individuando un percorso evolutivo che attraversa tutto il secolo e confluisce in un momento di ottimizzazione allorché appaiono, sulla scena, i polimeri idrosolubili che richiedono impieghi quantitativamente minori.

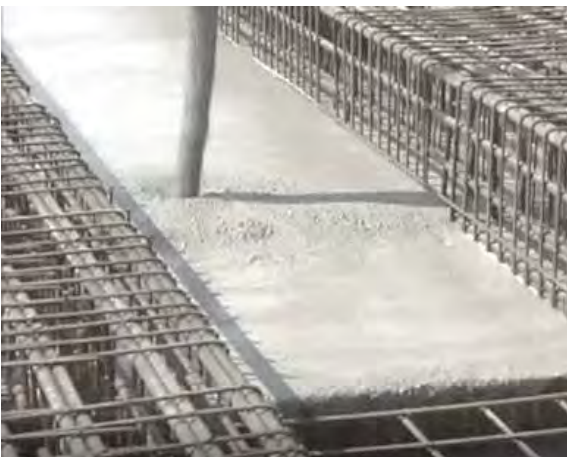
L'attuale calcestruzzo autocompattante, internazionalizzato come *self compacting concrete*, da cui l'acronimo SCC, è dunque frutto della ricerca tecnologica giapponese e delle sperimentazioni italiane condotte da Collepari, che si sono succedute sul finire del Novecento.

In Giappone la scoperta scaturisce da esigenze di razionalizzazione del calcestruzzo connesse a problemi relativi alle realizzazioni strutturali, che si sono palesate fin dall'inizio degli anni Ottanta. L'attenzione ai "difetti" e l'analisi delle possibili cause si orienta verso l'insufficienza delle azioni di vibrazione in fase di posa in opera delle miscele. La consapevolezza che la compattazione non è mai sufficiente a garantire il massimo delle potenzialità è soltanto l'elemento scatenante un'esigenza che coniuga cantierizzazione e qualità. Negli stessi anni, infatti, lo studio della segregazione



Fig. 1 Getto di calcestruzzo autocompattante mediante pompa / *Jet of self compacting concrete by pump*

Fig. 2 Getto di calcestruzzo autocompattante mediante canaletta / *Jet of self compacting concrete by channel*



Figg. 3 e 4 Getti di calcestruzzo autocompattante / *Jets of self compacting concrete*

dinamica dal punto di vista fisico, in relazione alla sospensione degli aggregati nella pasta di cemento, compie interessanti progressi che culminano nella messa a punto dei nuovi superfluidificanti.

A partire dagli anni Novanta in tutta l'Europa, cresce l'attenzione nei confronti del composto molto fluido che riesce a disporsi nelle casseforme per effetto della sola forza gravitazionale, senza necessità di vibrazione, pur conservandosi omogeneo e stabile e, dunque, senza rischio di segregazione.

Questa caratteristica di autocompattabilità è da attribuirsi essenzialmente alla composizione, riveduta e corretta rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario, cui l'apporto degli additivi non sortisce altro che l'effetto di esaltare le caratteristiche derivanti dalla composizione stessa.

1.3 Proprietà reologiche

Le caratteristiche allo stato fresco convergono tutte nell'autocompattabilità, nella misura in cui ciascuna è condizione necessaria perché il calcestruzzo possa disporsi autonomamente nelle casseforme per effetto della sola forza gravitazionale, senza necessità di vibrazione. Affinché il calcestruzzo abbia questa capacità deve possedere le seguenti proprietà reologiche:

- fluidità e deformabilità elevate
- capacità di riempimento dei casseri
- capacità di inserimento tra le armature
- stabilità
- omogeneità
- resistenza alla segregazione

La disamina delle caratteristiche allo stato fresco parte dall'elevata fluidità, in quanto prima condizione perché il composto abbia un'agevole capacità di movimentazione, a fronte di una composizione studiata in modo da conferire al composto una intrinseca attitudine allo scorrimento.

Alla rilevante fluidità si associa la cosiddetta filling ability (Fig. 7), caratteristica che si estrinseca nella capacità di riempire completamente i casseri, anche di forma complessa e articolata, per effetto del solo proprio peso. Ne consegue, la capacità di inserirsi facilmente tra le armature, la cosiddetta passing ability (Fig. 8), e, di riflesso, la possibilità di un utile impiego in sezioni fortemente armate, formalmente complesse, sottili o ristrette. A queste proprietà allo stato fresco si aggiunge, la cosiddetta stability (Fig. 9), cioè la capacità del calcestruzzo di rimanere omogeneo durante il



Fig. 5 Dimostrazione delle proprietà reologiche del calcestruzzo autocompattante presso la Calcestruzzi di Casalnuovo (NA) / *Dimostration of a self compacting concrete rheological proprieties, made at the Calcestruzzi of Casalnuovo (NA)*

Fig. 6 Scorrimento del calcestruzzo autocompattante / *Self compacting concrete sliding*



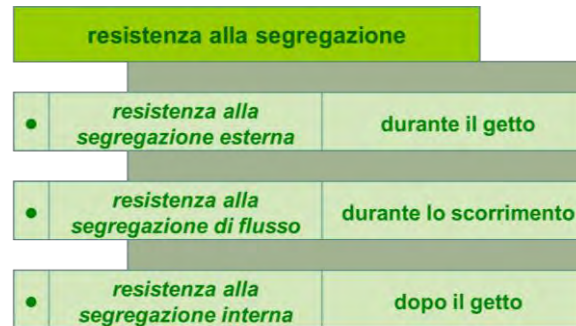


Fig. 7, 8 e 9 Proprietà reologiche del calcestruzzo autocompattante / *Self compacting concrete rheological properties*
a) filling ability; b) passing ability; c) stability

Fig. 10 Resistenza alla segregazione / *Resistance to segregation*

trasporto e la messa in opera. In effetti, l'attitudine allo scorrimento, in quanto presupposto per l'autocompattabilità, deve essere un valore aggiunto rispetto all'omogeneità del composto che, naturalmente deve essere garantita in quanto necessaria premessa per la resistenza meccanica. E se c'è omogeneità, c'è di conseguenza anche resistenza alla segregazione, che significa che si conservano uguali in tutta la miscela la massa volumica e, quindi, le proprietà elasto-meccaniche.

L'obiettivo della resistenza alla segregazione deve essere raggiunto in tre momenti diversi: durante il getto, durante lo scorrimento e dopo il getto (Fig. 10).



In queste tre fasi, che si succedono in tempi brevi l'una rispetto all'altra, e che nel loro insieme realizzano la posa in opera, non si deve verificare la separazione dei componenti. Il rischio di separazione degli ingredienti dipende dalle modalità di posa in opera e dall'altezza di caduta libera in fase di getto, mentre, una volta all'interno della cassaforma, dipende dallo scorrimento della miscela che, nel riempire completamente i casseri, compie percorsi anche di alcune decine di metri. Infine, lo stesso rischio è ben più prevedibile nella fase in cui le condizioni di quiete, in cui si trova il calcestruzzo nei casseri a riempimento avvenuto, possono indurre sedimentazione degli inerti

grossi sul fondo e formazione di acqua di bleeding in superficie.

La stretta connessione tra queste proprietà reologiche porta a concepire l'autocompattabilità come momento di sintesi univoca, in cui ciascuna è presupposto e conseguenza di un'altra e tutte insieme confluiscono in un obiettivo unitario che si configura come una caratteristica ad una scala superiore.

L'autocompattabilità, che sancisce una deformabilità elevatissima allo stato fresco (Fig. 11), è una caratteristica che si conserva nel tempo, molto più a lungo rispetto a quanto non succeda nei calcestruzzi ordinari. Il grafico in Fig. 12 sintetizza il confronto con calcestruzzi ordinari, caratterizzati da consistenze diverse. Si evince con chiarezza che solo quello a consistenza superfluida, classe S5, è comparabile, subito dopo il confezionamento, con la miscela autocompattante, ma dopo alcuni minuti la lavorabilità comincia a calare piuttosto rapidamente. Anche dopo un'ora, invece, la deformabilità dell'autocompattante resta non solo molto elevata, ma risulta addirittura trascurabile la sua riduzione. Di seguito, nella trattazione delle prove per valutare le proprietà reologiche, risulterà ancor più evidente quanto l'autocompattabilità sia abbastanza costante per tempi piuttosto lunghi.

1.4 Prestazioni allo stato indurito

Alle proprietà reologiche corrispondono, allo stato indurito, prestazioni per certi versi eccezionali, a cominciare dalle elevate resistenze meccaniche, fino alla notevole qualità che, in generale, un prodotto industrializzato, oggi, non può che offrire. E, in particolare, qualità significa anche durabilità, in quanto capacità del calcestruzzo di conservare le sue prestazioni di progetto per tutta la durata della vita utile

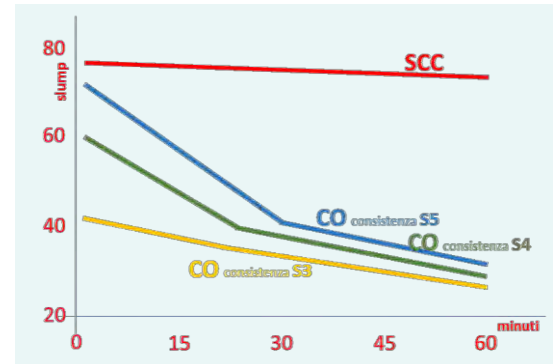


Fig. 11 Spandimento allo stato fresco / Spreading in the wet state

Fig. 12 Riduzione di lavorabilità nel tempo nell'SCC e nei CO a consistenze diverse / Reduction of time for workability of a self compacting concrete and of ordinary concretes to different consistencies

Fig. 13 Elenco delle caratteristiche allo stato indurito / List of characteristics in the hardened state

nominale del calcestruzzo, che, alla luce del recente dettato normativo, si pone, a maggior ragione per un autocompattante, come parametro di progetto della composizione del calcestruzzo stesso. Dunque, i vantaggi che si riscontrano negli autocompattanti allo stato fresco non limitano assolutamente le caratteristiche del prodotto finale, anzi le esaltano, in virtù di una industrializzazione ancor più spinta. A maturazione avvenuta, il calcestruzzo autocompattante possiederà le seguenti proprietà (Fig. 13):

elevate resistenze meccaniche

durabilità

qualità

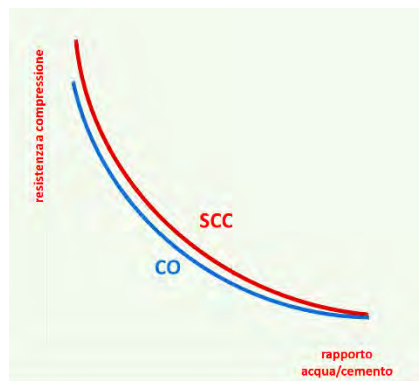
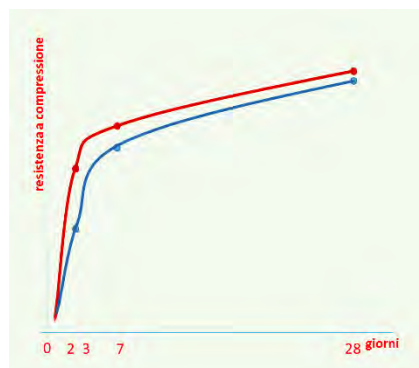


Fig. 14 Incrementi di resistenza al diminuire del rapporto acqua/cemento / Increase in resistance to decrease of water/cement ratio

Fig. 15 Incrementi di resistenza a brevi e lunghe stagionature / Resistance increases at short and long curing times



La disamina delle caratteristiche allo stato indurito trae fondamento, dunque, dalla caratteristica allo stato fresco da cui prende il nome, l'autocompattabilità, che si persegue a fronte di una composizione in cui la considerevole capacità di scorrimento si ottiene senza elevare eccessivamente il quantitativo di acqua, al punto da conservare un basso rapporto acqua/cemento. E questa è la prima garanzia di elevata resistenza meccanica, che, a sua volta, nella logica della nuova normativa è presupposto della durabilità.

L'incremento della qualità della microstruttura all'interfaccia pasta-aggregati, per effetto di una minore porosità, determina una riduzione di microfessurazioni e difetti vari rispetto ai calcestruzzi ordinari, a parità di rapporto a/c, ed è responsabile del miglioramento delle resistenze meccaniche a compressione e a trazione. È naturale che al diminuire del rapporto a/c la resistenza tenda ad aumentare, ma nel confronto tra un calcestruzzo autocompattante e uno ordinario la migliore qualità della microstruttura

all'interfaccia pasta-aggregati è responsabile di un ulteriore incremento di resistenza, in misura più sensibile quanto più basso è il rapporto a/c (Fig. 14). Questo miglioramento include anche un incremento delle tensioni di aderenza tra acciaio e calcestruzzo stimabile intorno al 20%. Inoltre, nel confronto, si evince che lo sviluppo delle resistenze alle brevi stagionature aggiunge altri guadagni prestazionali all'autocompattante, per cui dopo due-tre giorni di maturazione si ottengono incrementi del 25% e dopo una settimana del 15% (Fig. 15). A maturazione completata, si rileva ancora un certo incremento di resistenza, ma è percentualmente ben più modesto.

1.5 Innovazioni e vantaggi

L'innovazione introduce un cambiamento che scopre un suo significato e in questo non può che leggersi in termini di vantaggio.

Eppure se l'innovazione è essenzialmente l'autocompattabilità, i vantaggi investono più fronti a cominciare da quelli tecnici, fino a quelli progettuali, economici e ambientali (Fig. 16).

Sotto il profilo tecnico, il primo guadagno diretto riguarda la velocizzazione dei getti, anche di forma complessa e molto armata, grazie alla fluidità del composto che determina un agevole e veloce riempimento dei casseri, senza richiedere alcuna operazione di vibrazione. Questo requisito è l'autocompattabilità (*self compacting*) ed è la principale peculiarità di questo conglomerato al punto da caratterizzarne la denominazione. È evidente che questo vantaggio tecnico investe anche il prefabbricatore che può avvalersene, altresì, dal punto di vista economico in termini di risparmio di tempo e di mano d'opera (Fig. 17).

Fig. 16 Schema dei vantaggi dell'autocompattante / *Advantages of a self compacting concrete*

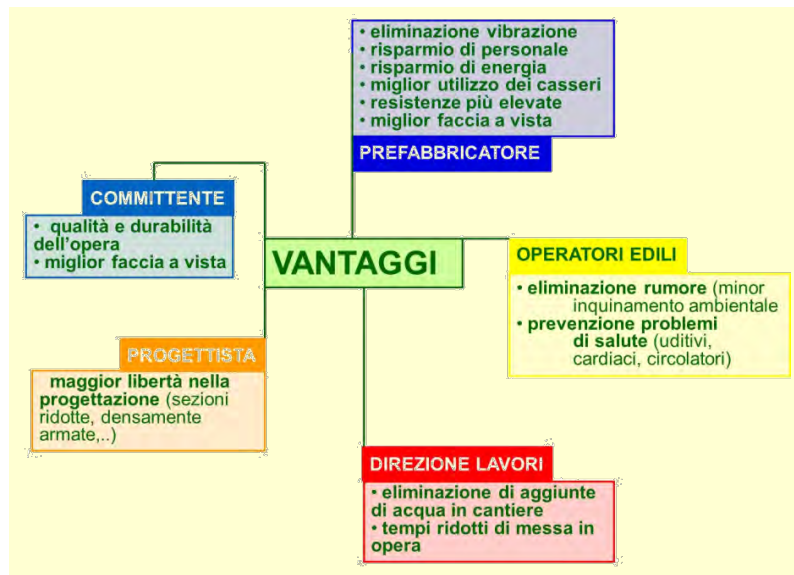
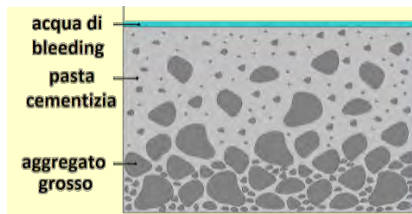


Fig. 17 Getto con SCC per la realizzazione di un tegolo prefabbricato / *Jet by SCC for the construction of a prefabricated tile*

Fig. 18 Schema della segregazione / *Scheme of segregation*



Per queste ragioni, il calcestruzzo autocompattante è, tra i calcestruzzi di nuova generazione, quello che sicuramente, velocizzando le fasi di getto e, più in generale, di posa in opera in cantiere o in stabilimento, troverà, in tempi più brevi di quanto si possa immaginare, sempre più ampia diffusione, fino a sostituire completamente il calcestruzzo ordinario.

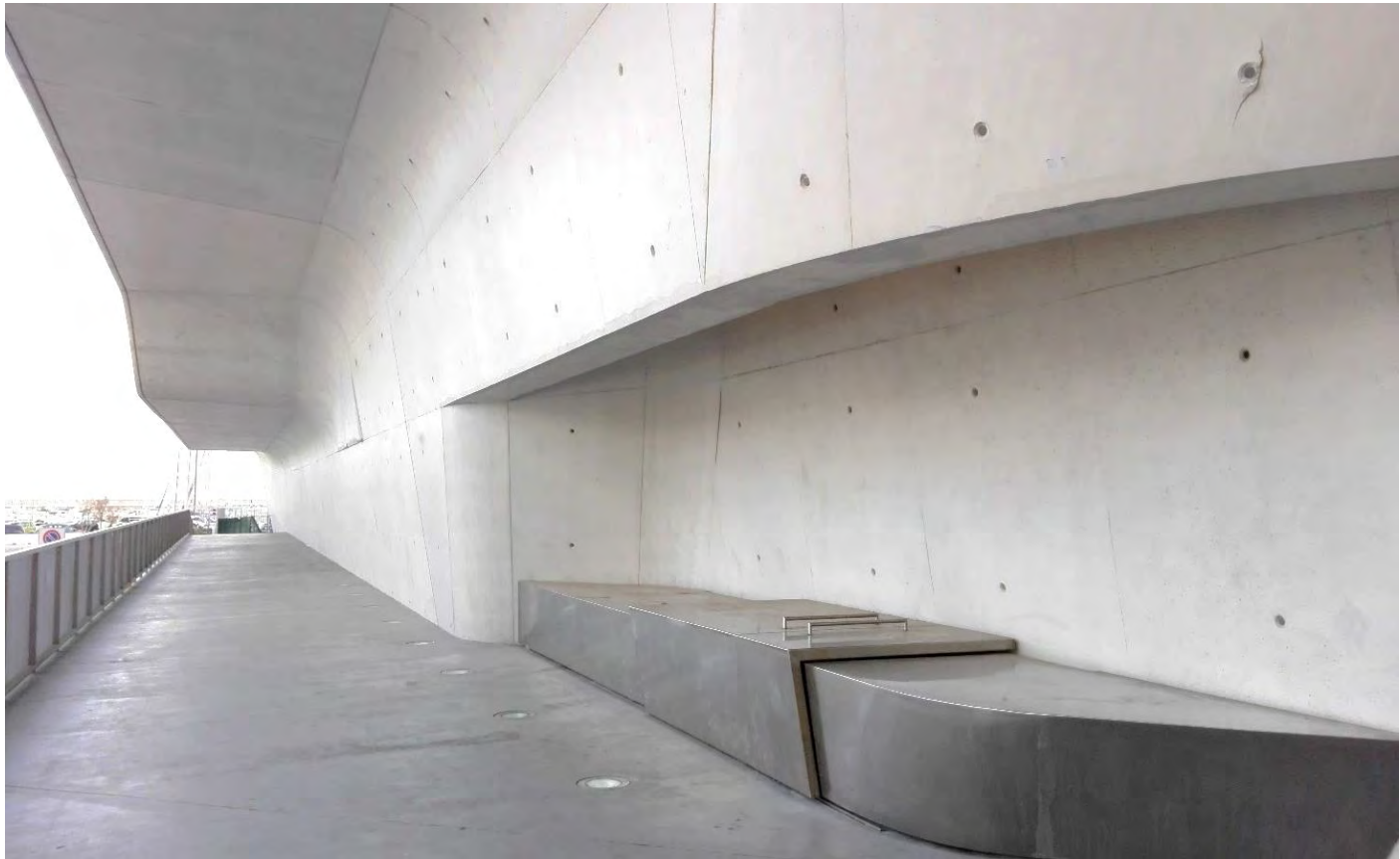
L'elevato grado di compattazione che questi calcestruzzi guadagnano grazie all'elevata fluidità, senza eccessivo incremento di acqua, introduce sotto il profilo tecnico anche un altro rilevante vantaggio che è l'eliminazione dei macrovuoti nel getto. Ciò significa garanzia di omogeneità, di aderenza con le armature e assenza di risalita di acqua in superficie. Quest'ultimo fenomeno, definito *bleeding*, è diretta conseguenza della sedimentazione degli aggregati grossi sul fondo (Fig. 18).

Tra i vantaggi tecnici, merita attenzione anche la riduzione del calore di idratazione, conseguenza diretta della composizione in cui si guadagna in termini di scorrimento non

solo senza particolare incremento di acqua, ma anche senza un apprezzabile aumento della quantità di cemento.

Dal punto di vista progettuale, questo tipo di calcestruzzo concede maggiore libertà formale consentendo un miglior utilizzo dei casseri, che si esplicita in realizzazioni di sezioni di forma particolare, o molto armate (Fig. 19), in quanto l'elevata fluidità gli consente di scorrere tanto agevolmente da scongiurare fenomeni di arresto del suo flusso, il cosiddetto *blocking*, provocato dall'aumento del numero di collisioni dei granuli dell'aggregato grosso.

Fig. 19 Libertà formale nella stazione Marittima di Zaha Hadid a Salerno / *Formal freedom in the realization of the Maritime Station made by Zaha Hadid, Salerno, 2016*



Dal punto di vista economico, l'autocompattabilità, in quanto innovazione, si traduce immediatamente in rapidità di posa in opera, che, in quanto vantaggio, significa risparmio non solo di tempo, ma anche di costi di mano d'opera poiché l'eliminazione della vibrazione dei getti comporta un risparmio sia di tecnici posatori, che di energia.

Inoltre, si riduce l'inquinamento acustico dell'ambiente circostante il cantiere con l'eliminazione del rumore generalmente prodotto dai macchinari degli impianti di vibrazione per i conglomerati cementizi tradizionali.

E, per gli operatori edili l'eliminazione di questo rumore si traduce anche in prevenzione di problemi di salute, da quelli uditivi, a quelli cardiaci e circolatori.

Negli autocompattanti un altro evidente vantaggio, sia di tipo tecnico che progettuale, è quello del miglior facciavista rispetto ad un calcestruzzo comune, determinato da una composizione studiata su rapporti diversi tra i componenti.

La compattezza che ne consegue determina durevolezza e qualità che sono certamente di maggior rilevanza anche ai fini di un buon facciavista.

1.6 Verso nuove architetture fluide

Non sarà certo un caso che alcune opere contemporanee di architettura impieghino calcestruzzi "speciali" tecnologicamente e, in particolare, tutte quelle che prediligono la soluzione del calcestruzzo a facciavista si avvalgono di miscele autocompattanti.

Le prime realizzazioni che utilizzano la tecnologia dei calcestruzzi autocompattanti segnano un inizio, in cui i contributi innovativi dell'enunciato tecnologico travalicano la sfera costruttiva da cui ha origine, innescando un cambiamento.

In generale, ad innescare il cambiamento è l'assunzione di un nuovo materiale, che con il suo accesso alla realtà del costruire istituisce un linguaggio nuovo, ma soprattutto autonomo. In questo caso, invece, è la soluzione tecnologica ad offrire un nuovo grado di libertà all'architettura.

La chiesa di San Pietro Apostolo a Pescara (2000), con la sua vela in calcestruzzo autocompattante bianco, celebra un inizio e inaugura una icona che diviene simbolo di questa nuova tecnologia e della libertà formale che porta intrinsecamente con sé (Figg. 20 e 21).

Ne consegue una convergenza verso una caratterizzazione materica, in cui la "pietra artificiale" riscopre una nuova dimensione tattile e nuove valenze cromatiche, fino a divenire linguaggio.

E quando il linguaggio architettonico si rinnova, il patrimonio dello spazio costruito si arricchisce di una nuova qualità costruttiva che influenza e modifica i meccanismi espressivi dell'architettura.

"Amo gli inizi. Gli inizi mi riempiono di meraviglia. Io credo che sia l'inizio a garantire il proseguimento".¹

E se nella filosofia Kahniana si predica la meraviglia degli inizi, c'è da aspettarsi un prosieguo, che non può che fondarsi su una sistematizzazione della soluzione tecnologica e sulla sperimentazione sul campo, che ancora non è abbastanza spinta da conferire la necessaria stabilità.

Una nuova potenzialità anima il calcestruzzo, lo rigenera tecnologicamente e si impegna a trasmettere il messaggio culturale del presente. La realtà contemporanea continua ad alimentare sperimentazioni formali, che fanno della grande scala un motivo estetico e una logica spaziale dilatata funzionalmente, e, per ribadire e rafforzare una piena affermazione sul contesto, le nuove architetture rivedono proporzioni e dimensioni e le sbilanciano, con forte



Fig. 20 La chiesa di San Pietro Apostolo a Pescara / The church of St. Peter the Apostle in Pescara, 2000

Fig. 21 La vela in calcestruzzo autocompattante bianco della chiesa di San Pietro Apostolo a Pescara / The sail made in white self compacting concrete of the church of St. Peter the Apostle in Pescara, 2000



¹ Louis I. Kahn, *Amo gli inizi*, in Christian Norberg-Schultz, *Louis I. Kahn idea e immagine*, Officina, 1980, p.137.



Fig. 22 Polo direzionale De Cecco a Pescara /
Directional Pole De Cecco in Pescara, 2008

Fig. 23 I “piani bucati” del Polo direzionale De
Cecco / *The “perforated floors” of the
Directional Pole De Cecco*



intenzionalità, a vantaggio della grandezza fisica, facendone un nuovo punto di forza.

E per quanto ci siano soluzioni di continuità tra geometrie più razionali e altre più plastiche, in un obiettivo di spettacolarità che cerca sempre nuove possibilità espressive, sono le straordinarie gigantesche e fluide forme a catturare questa tecnologia, o meglio a esercitare tentazioni per la possibilità di guadagnare un nuovo grado di libertà. E la spettacolarità è in condivisione nel rapporto con il contesto, nella spazialità e nel linguaggio.

La fluidità del calcestruzzo autocompattante alimenta una fluidità formale nelle architetture più smisurate, fino ad essere un elemento generante nuovo, specie in quelle opere alla ricerca della grande scala. Un percorso nuovo che ha sollecitato grandi protagonisti della realtà architettonica contemporanea, da Zaha Hadid, a Norman Foster, a Massimiliano Fuksas, (Figg. 22 e 23) ad altre personalità emergenti, sfruttando una tecnologia nuova per creare una forma nuova.

Geometrie non ancora sfruttate, modelli scultorei impennati sulla plasticità più assoluta, rifuggono la linea retta e si affidano a nuovi sistemi di progettazione tridimensionali, in cui finalmente è lo spazio a prendere forma, in tutta la sua unitarietà di vaso continuo, in cui sperimentare nuove possibilità di abitare. Scompaiono le ricorrenze planimetriche e ha inizio una nuova dimensione spaziale, sia dal punto di vista progettuale, che percettiva.

Ogni grande architettura nasce da un atto creativo di natura fondamentalmente intuitiva, ma è senz'altro figlia della cultura tecnologica, che, nel celebrare un inizio, inaugura una nuova stagione. E questo percorso tende a chiudersi in maniera circolare, rafforzandosi ulteriormente, allorché la tecnologia con cui si realizzano i casseri si avvale di

una singolare modalità di “stampa”, anch’essa in tre dimensioni. In tal modo, si imprime in grossi blocchi di polistirolo la forma da realizzare in getto, creando una sorta di controcalco. E tra grandi opere e grandi costruzioni la tecnologia dell’autocompattante si sperimenta sul campo.

Nel trionfo delle proporzioni smisurate il MAXXI (Figg. 24 e25)

Fig. 24 Il Museo Nazionale delle Arti del XXI secolo (MAXXI) / *National Museum of Arts of the XXI century (MAXXI)*, 2009





Fig. 25 Interno del MAXXI / Interior of MAXXI

prorompe nel contesto universale della realtà odierna della capitale e cerca di garantire il dominio completo dello spazio urbano. Intanto, a pochi passi, il ponte della Musica (2011), che sovrappassa il Tevere tra i quartieri Della Vittoria e Flaminio, con la sua soletta di soli 18 cm, rispetto ai 28 cm delle comuni solette di ponti stradali, cerca la leggerezza nei limiti di un contesto tecnologico tradizionalmente imperniato alla pesantezza. Opera dello studio inglese Buro Happold, vincitore con Powell-Williams Architects del concorso di progettazione bandito dal Comune di Roma nel 2000, il ponte ciclo-pedonale testimonia quanto i linguaggi siano capaci di rigenerarsi e i codici costruttivi di essere riscritti.

L'eccezionalità strutturale è un altro grande valore aggiunto che deriva dalla possibilità di realizzare strutture molto armate e di ottenere elevate resistenze meccaniche, che si traduce in snellezza strutturale nel World Trade Center di San Marino e straordinari sbalzi ondegianti, con luci fino a 3.70 metri, nell'Aqua Tower, opera di Jeanne



Gang, sul fiume Chicago e sul lago Michigan (Figg. 26 e 27).

Nel raccogliere l'eredità dei grandi dell'architettura che si sono espressi in forme geniali, Zaha Hadid sceglie la tecnologia del calcestruzzo autocompattante anche nella Stazione Marittima di Salerno (2016), dove, nel rafforzare la forma fluida, diviene linguaggio portato avanti con grande risolutezza, fino all'ultimo dettaglio funzionale (Figg. 28, 29, 30 e 31). Non cerca geometrie razionali, ma trova sicurezza in una dimensione tecnologica, che cerca di garantire il dominio completo dello spazio. E, nell'aprirsi al contesto all'insegna della continuità, instaura un dialogo con il vetro strutturale, in modo che la forma fluida riesca ad accogliere una spazialità altrettanto fluida, ma capace di uscire fuori dai confini dell'invaso spaziale.

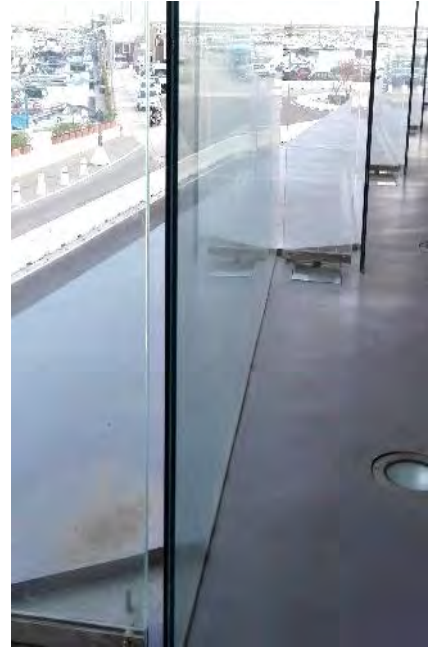
Figg. 26 e 27 Sbalzi ondeggianti per 82 piani nel grattacielo dell'Aqua Tower di Jeanne Gang / *Swaying balconies made for 82 floors of the skyscraper "Aqua Tower" designed by Jeanne Gang*

alla pagina seguente:
Figg. 28 e 29 Stazione Marittima di Zaha Hadid a Salerno / *Maritime Station designed by Zaha Hadid in Salerno*





Anche le costruzioni compatte guadagnano artifici formali fluenti sul perimetro, come la palestra a pianta quadrata del complesso sportivo a Windisch-Mülhimatt, in Svizzera, opera Zimmermann e Wolfensberger del 2010, che si apre al contesto esterno attraverso superfici trasparenti e setti nervati bianchi (Fig. 32) oppure il museo Jean Cocteau (Fig.33),



alla pagina precedente

Figg. 30 e 31 Stazione Marittima di Zaha Hadid a Salerno / Maritime Station designed by Zaha Hadid in Salerno

alla pagina precedente (a destra)

Fig. 32 Palestra a pianta quadrata del complesso sportivo a Windisch-Mülimatt (Svizzera) / Square-shaped gym in Windisch-Mülimatt (Switzerland)

alla pagina precedente (a sinistra)

Fig. 33 Museo Jean Cocteau a Menton / Museum Jean Cocteau in Menton

opera del 2012 del francese Rudy Ricciotti, che lascia evolvere le linee rettilinee perimetrali del quadrilatero irregolare di pianta in tentacoli ondeggianti, in modo da lasciare entrare la luce. Realizzato nel 2011 a Menton sulla costa Azzurra, contiene circa mille opere grafiche di Jean Cocteau, molte delle quali della collezione di Severin Wunderman, ma anche la forma dell'architettura evoca la complessità e i misteri della personalità dell'artista.



Giganteschi modelli scultorei, impernati sempre più spesso sulla plasticità, e ingentiliti da linee fluenti, visualizzano un'affermazione nel contesto universale della realtà odierna. Intanto, in maniera silenziosa e discreta, fondazioni che si avvalgono di questo nuovo calcestruzzo continuano a dare stabilità a costruzioni e infrastrutture.

E qui gli esempi si fanno numerosi, a cominciare dal progetto C.A.S.E. (Complessi Antisismici Sostenibili Ecocompatibili) per la ricostruzione dopo il sisma de L'Aquila del 2009, alle fondazioni del nuovo mulino della cementeria di Barletta e ancora alle fondazioni del ponte di Calatrava a Venezia (Figg. 34, 35 e 36), con isolatori sismici.

Quasi duecento edifici, con più di duecento metri cubi di calcestruzzo, di cui più della metà con calcestruzzo



alla pagina precedente

Fig. 34 Il ponte di Calatrava a Venezia / *The Bridge by Calatrava in Venice*

Fig. 35 Armatura della spalla del ponte di Calatrava a Venezia / *Armor of the Bridge by Calatrava in Venice*

Fig. 36 Il ponte di Calatrava a Venezia / *The Bridge by Calatrava in Venice*





autocompattante, sono stati realizzati in pochi mesi, in fase di ricostruzione dopo il terremoto de L'Aquila, in una generale attenzione all'efficienza energetica e alla sostenibilità ambientale che testimonia quanto anche le emergenze possano diventare occasioni di progetto di riferimento.

Per quanto riguarda le fondazioni del mulino di Barletta, le notevoli dimensioni della struttura monolitica e le armature metalliche molto fitte, oltre alle difficoltà di accesso, rendono difficile anche la vibrazione, creando le condizioni per la scelta del *self compacting concrete*. In tempi da record, meno di 24 ore, il calcestruzzo autocompattante è stato messo in opera, mediante pompa, da un'altezza di caduta di 4 metri, soltanto da due postazioni di getto, sfruttando la capacità di scorrimento laterale.

Alla leggerezza del ponte della Costituzione a Venezia, si contrappone la pesante struttura scatolare rigida della fondazione, costituita da diaframmi profondi oltre venti metri, talmente armata da richiedere necessariamente l'impiego di una miscela capace di disporsi autonomamente nei casseri per effetto della sola forza gravitazionale, in luogo di un normale conglomerato. Interessante è il progetto della composizione del calcestruzzo, che ha seguito un processo di definizione lungo e accurato e che, oggi, si carica anche di rigore metodologico.

E, guardando anche all'esistente, si lascia interagire una ex-distilleria dei primi del Novecento, composta di sette volumi, con tre nuove costruzioni in una complessità formale d'insieme fondata sui contrasti, che realizza la nuova sede milanese della Fondazione Prada a Milano (2015), progetto dello studio OMA (Rem Koolhaa). Il calcestruzzo autocompattante, composto da cemento bianco e aggregati di marmo di Carrara (Figg. 37 e 38), in dissonante interazione con altre superfici materiche, crea efficaci effetti di luce.



Figg. 37 e 38 La nuova sede della Fondazione Prada / The new headquarters of Prada Foundation

CAPITOLO TERZO

VERSO IL CANTIERE

“Mettere in opera” è una bella espressione che nel lavoro di architettura si usa comunemente. Essa indica non solo i problemi connessi al sollevare, posizionare e connettere delle parti e degli elementi ma, più in generale, alla concezione del progetto in quanto esistenza materiale.

Vittorio Gregotti¹

3.1 Il confezionamento

Il confezionamento dell'autocompattante si avvale degli stessi impianti utilizzati per i calcestruzzi tradizionali. La soluzione più frequentemente impiegata è quella di introdurre i componenti direttamente in autobetoniera, ma è possibile utilizzare anche i mescolatori ad asse verticale.

Per quanto attiene al confezionamento in autobetoniera, che è dotata di mescolatore a caduta libera, l'ordine di immissione degli ingredienti segue una procedura simile a quella dei conglomerati ordinari ed è schematizzabile in due fasi. La preparazione della miscela procede introducendo nella betoniera almeno due terzi d'acqua di impasto e poi gli inerti e il cemento. In alcuni casi la quantità d'acqua immessa in questa fase tende a crescere e può arrivare anche al 90%. La miscelazione, a questo punto, richiede tempi maggiori rispetto ad un calcestruzzo ordinario per raggiungere una certa uniformità, necessaria alla dispersione ordinata dei componenti. La seconda fase vede l'inserimento della piccola

The packaging of the self compact concrete is the same as an ordinary concrete. It can be worked directly in the mixer truck or mixers with vertical axis.

The packaging by mixer truck is similar to that of an ordinary concrete. In a first phase, we have to insert two thirds of water into the cement mixer, then the aggregates and the cement. Subsequently, we must insert the remaining water with the addition of superplasticizers. The insertion of the various components in the truck mixer is 4 minutes each.

Instead, packaging with forced action mixers has a different loading mode of the machine. We first have the insertion and mixing of the aggregates and the cement and then the addition of at least two thirds of water with superplasticizers additive. The main difference between the two modes is the increased power of the forced action mixer.

As we said earlier the use of a self compact concrete facilitates and improves processing

¹ Vittorio Gregotti, *Architettura, Tecnica, Finalità*, ed. Laterza, Roma-Bari, 2002, p.81.

times. The jet can be made by pump or channel with a maximum fall of 5 meters and a maximum sliding distance of 15 meters, but cautiously it is better to keep on intermediate levels. The pumps have diameters of 100-125mm and a length not exceeding 300m. High fluidity causes an increase in cement speed in the pump and so also a greater push on the formworks. So we have to proportionate the formworks well according to the push actions. During the maturing phase, we must pay particular attention as it happens more quickly. This phase is called "curing", in which we must maintain the damp surface, protecting it with wet or impermeable sheets.

Rheological properties are measured both in the laboratory and in the building site.

The specific tests are:

- Slump-Flow Test;
- V Funnel Test;
- L-Box box;
- U-Box Test;
- J-Ring Test.

In addition there is another test called *Kajima Test*.

Another effect to be counteract in the curing is the withdrawal. In fact, the greater amount of cement can cause an increase in autogenous withdrawal. Two other parameters, factors that can cause an increase in withdrawal, are the higher water-filler ratio and the higher dosage of superplasticizers additive. Therefore in some cases we can use anti- withdrawal additives.

If we pay attention to the curing of the concrete we obtain an excellent facing with an exceptional surface compactness.

Towards durability, the choice of self compacting concrete is to be preferred because we have a greater compactness and a rather low cement water ratio.

Today thanks to the diffusion of the SCC we can enjoy the continuous helix poles technology. It's an excavation by cochlea infusion in which the concrete is jet during the removal of the machine. Subsequently the preassembled reinforcement cages are immersed in the cement. This technology allows to have very short processing times, some examples are the "Alta Velocità" from Milano to Bologna built in 2001 or the "Alta Velocità" from Rome to Napoli, built in 2005.

quantità d'acqua restante in cui è disperso l'additivo superfluidificante, in modo tale che inserendoli insieme si ottimizzi la diffusione nella massa a vantaggio di un'azione lubrificante tra i componenti, che conferisce omogeneità a tutta la miscela.

L'inserimento di ogni componente in autobetoniera deve richiedere un tempo minimo di miscelazione pari a 4 minuti almeno.

Nei casi di autocompattanti destinati a elevate prestazioni meccaniche, in cui è necessario l'impiego anche dell'agente modificatore di viscosità, l'inserimento nella miscela in preparazione deve avvenire dopo l'immissione del superfluidificante. Quindi l'aliquota di acqua da aggiungere nella seconda fase va suddivisa in due parti, per ciascuno dei due additivi, e l'inserimento avviene in due tempi diversi, ma a stretto giro, in modo da far sì che la miscela trovi il suo equilibrio rispetto agli effetti indotti da ciascun additivo.

A questo punto si eseguono, nella centrale di betonaggio, le consuete prove previste dalla normativa per verificare sia l'autocompattabilità, che le altre proprietà reologiche, che saranno analizzate in seguito.

Il confezionamento con mescolatori ad azione forzata, alternativo all'impianto a caduta libera e autobetoniera, segue modalità diverse per quanto riguarda il caricamento dei componenti. Infatti l'ordine prevede prima l'inserimento e il mescolamento degli aggregati e del cemento e poi l'aggiunta di almeno due terzi di acqua con additivo superfluidificante. Il caricamento degli additivi modificatori di viscosità avviene, se previsti nella composizione, come per il procedimento con autobetoniera, disperdendoli nella restante parte d'acqua.

La principale differenza tra le due modalità sta nella maggiore potenza del mescolatore ad azione forzata, che nel trasmettersi alla miscela, tende ad esaltare la fluidità della

miscela stessa. Pertanto, particolare attenzione va posta alla determinazione della quantità di additivo superfluidificante, che prevedibilmente può essere di poco inferiore.

È sempre importante nell'esecuzione di opere particolari con requisiti prestazionali eccezionali richiesti alla miscela di calcestruzzo autocompattante, prevedere prove preliminari in risposta non solo alle esigenze di verifica delle proprietà reologiche e delle caratteristiche allo stato indurito, ma anche per verificare la metodologia esatta per l'ordine di carico dei componenti, in base al tipo di impianto di miscelazione. Inoltre, è buona regola testare il comportamento della miscela con prove di campo, che simulano con maggiore precisione le condizioni reali, con tutti i limiti che le caratterizzano.

Interessante dal punto vista metodologico, l'esempio del caso della realizzazione delle fondazioni del ponte della Costituzione sul Canal Grande a Venezia, di Santiago Calatrava, in cui le prove di campo hanno evidenziato problemi di pompabilità in fase di getto. Questo dato ha consentito una correzione della composizione della miscela prima dell'inizio dell'esecuzione delle fondazioni con calcestruzzo autocompattante, come già detto nei precedenti paragrafi (Figg. 81 e 82).

Tuttavia, per quanto attiene alla consistenza, l'autocompattabilità individua, per definizione, un livello di lavorabilità infinita, con uno scarto molto rilevante anche rispetto alla consistenza superfluida. Entrambe garantiscono due livelli di compattazione elevati, anche se quello dell'autocompattante tende al 100% (Fig. 83). Ma la differenza è nel principio: la valutazione delle cinque classi di consistenza è affidata alla stima dell'abbassamento (*slump*) al cono di Abrams (Fig. 84), che è direttamente proporzionale alla lavorabilità nel passaggio dalla classe S1 alla S5, mentre la



Figg. 81 e 82 Il ponte di S. Calatrava a Venezia: getto del calcestruzzo autocompattante nelle prove preliminari e dopo la correzione della composizione / The "Bridge by S. Calatrava in Venice: self compacting concrete jet in the preliminary tests and after the correction of the composition



Fig. 83 Tabella valutazione classi di consistenza nei CO e negli SCC / *Table of consistency classes in CO and SCC*

Fig. 84 Abbassamento al cono di Abrams per la valutazione della consistenza / *Lowering to the cone of Abrams for the evaluation of consistency*

Fig. 85 Spandimento al cono di Abrams per la valutazione dell'autocompattabilità / *Spreading to the cone of Abrams for the evaluation of the auto-compactability*

Consistenza	Umida	Plastica	Semi fluida	Fluida	Superfluida	Autocompattante
classe di consistenza	S1	S2	S3	S4	S5	SCC
slump [cm]	10 - 40	50 - 900	100 - 150	160 - 210	> 210	flow
grado di compattazione		0,90-0,93	0,93-0,95	0,95-0,97	0,97-0,98	0,98-1,00

valutazione dell'autocompattabilità è parametrata dallo spandimento (*flow*), da verificare con i test di normativa, di cui si dirà nei prossimi paragrafi (Fig. 85).

3.2 La posa in opera

L'autocompattabilità è la proprietà reologica che per definizione agevola la fase di posa in opera del calcestruzzo. Pertanto, gli obiettivi dell'industrializzazione del getto e del potenziamento della qualità del prodotto si perseguono, in ogni caso, a fronte di alcune attenzioni necessarie per il conseguimento di un risultato in cui convergano il vantaggio della velocizzazione delle operazioni e il pericolo di danni indotti per negligenza o trascuratezza.

Il getto può essere eseguito mediante pompa o canaletta considerando, come potenzialità teoriche, un'altezza di caduta massima di 5 metri ed una distanza di scorrimento massima di 15 metri, con il vantaggio di poter gettare il calcestruzzo da una certa distanza o in posizioni di disagiata accessibilità, sfruttandone l'intrinseca capacità di scorrere sotto l'azione del solo peso proprio. Tuttavia, nella pratica, per cautelarsi dal rischio di segregazione esterna è consigliabile mantenersi al di sotto dei valori indicati, prevedendo un'altezza di caduta libera di 2-3 metri al massimo, che rispetto ai canonici 50 centimetri di un calcestruzzo tradizionale è già ben più vantaggiosa, ed una distanza di scorrimento laterale contenuta nei 10 metri.



L'esecuzione del getto può essere sospesa per brevi intervalli di tempo con il vantaggio di essere praticamente in continuità e garantire una maggiore monoliticità.

Il pompaggio si esegue con tubazioni del diametro di 100-125 millimetri, di lunghezza non superiore a 300 metri, mediante operazioni effettuabili anche dal basso, in modo che l'impasto tenda ad inglobare meno aria. Diversamente, per contenere questo effetto in caso di getti con rilevante altezza di caduta è buona regola tenere l'estremità della pompa annegata nel calcestruzzo.

L'elevata fluidità del calcestruzzo autocompattante determina un aumento della velocità con cui la miscela transita all'interno delle tubazioni di pompaggio, con relativa riduzione di pressione sulle tubazioni stesse. Eseguito il getto, si registrano altre due fenomeni conseguenti, l'aumento della velocità di posa in opera e l'incremento delle spinte sui casseri.

Per quanto attiene all'aumento della velocità, si passa da valori che non superano i 4-5 m/h per i calcestruzzi tradizionali, a valori che, non soltanto superano i 5-7 m/h, ma si attestano intorno ai 10 m/h per gli autocompattanti, con il vantaggio di ottenere significativi risparmi di tempo nell'esecuzione dei getti.

L'incremento delle spinte sulle casseforme indotto dalla maggiore scorrevolezza dell'autocompattante, invece, impone la necessità di proporzionare i casseri in modo da resistere alle azioni orizzontali, il cui andamento è molto prossimo a quello di un fluido idrostatico. In effetti, la spinta è funzione crescente della fluidità, della velocità con cui il calcestruzzo autocompattante viene gettato nelle casseforme, dell'altezza di caduta del getto nei casi di esecuzione dall'alto e dai tempi di presa della miscela. Anche l'altezza dei casseri è influente non soltanto in quanto incide



Fig. 86 I casseri del MAXXI di Roma /
Formworks of the MAXXI in Rome

direttamente sui valori di pressione, ma anche perché diventa necessaria per il calcolo delle casseforme l'approssimazione alla spinta idrostatica di un fluido di peso specifico pari a 2500 Kg/m^3 , come indicato dalle norme UNI. Diversamente è possibile, per casseri di altezza inferiore ai 3 metri, trascurare l'aumento di pressione e considerare un valore pari a quella di un calcestruzzo ordinario.

Le casseforme, inoltre, devono essere verificate a tenuta per evitare possibili fuoriuscite di boiaccia verso l'esterno per effetto della fluidità della miscela, concentrate specialmente in corrispondenza dei giunti alla base dei casseri stessi (Fig. 86).

Per quanto riguarda l'impiego dei disarmanti e la pulizia delle casseforme, le operazioni da eseguire e i prodotti da utilizzare sono gli stessi che consuetamente caratterizzano i getti di calcestruzzi tradizionali.

3.3 La stagionatura

La stagionatura è una fase molto importante durante la maturazione dei getti dei calcestruzzi in generale, che acquista negli autocompattanti ancora maggiori valenze per non rischiare di vanificare alcuni benefici allo stato indurito. Il contenimento del fenomeno del *bleeding* determina una maggiore tendenza al rapido essiccamento della superficie degli autocompattanti, che rende necessario proteggere la superficie esterna dei getti. Malgrado questi calcestruzzi siano molto più compatti, e quindi maggiormente rispondenti al progetto durabilità, la minor quantità di acqua di *bleeding* rispetto ai calcestruzzi ordinari accelera l'asciugatura dello strato corticale che, pertanto, richiede opportune operazioni di stagionatura. Questa fase, che si sviluppa dopo lo scassero, è internazionalizzata con la denominazione *curing*.

Le attenzioni da poter eseguire per contrastare il più

possibile il ritiro sono le stesse che valgono per i calcestruzzi normali, anche se acquistano maggiore importanza e si rendono ancor più necessarie. A cominciare dalla rimozione dei casseri, che può essere procrastinata di due o tre giorni, fino all'attenzione a mantenere la superficie umida, proteggendola con teli bagnati o impermeabili. È anche possibile un'altra modalità con cui procedere che consiste nell'impiegare prodotti stagionanti, al fine di creare un'interfaccia esterna piuttosto impermeabile e dunque più resistente agli agenti aggressivi. Il meccanismo con cui agiscono è quello di rallentare l'evaporazione dell'acqua e lasciar sviluppare le reazioni chimiche il più lentamente possibile in modo da controllare il ritiro plastico. Tra queste operazioni che caratterizzano la stagionatura protetta, a parte quelle usuali per tutti i calcestruzzi, la più innovativa appare quella dell'applicazione, dopo un preventivo lavaggio della superficie da trattare con acqua pulita, di un'emulsione liquida, a base di particolari resine, che, spruzzata a bassa pressione, forma una membrana antievaporante a struttura microcristallina. Questa "pellicola", da porre in opera sulla superficie non appena risulti asciutta, non deve interagire con i successivi trattamenti di finitura. Inoltre, trattandosi di prodotti idrosolubili, può essere rimossa con semplici azioni di lavaggio.

3.4 La valutazione delle proprietà reologiche

L'autocompattabilità, in quanto lavorabilità di un calcestruzzo con capacità di scorrimento così elevata da disporsi autonomamente nelle casseforme senza rischi di segregazione, va verificata attraverso una serie di prove specifiche da eseguirsi in tempi diversi per constatare che questa proprietà reologica si conservi in tutte le fasi che

caratterizzano la movimentazione del conglomerato, fino all'esecuzione del getto. Durante il confezionamento, il trasporto e la posa in opera in cantiere il calcestruzzo deve conservarsi autocompattante e l'azione di verifica, regolamentata da specifiche normative e linee guida deve essere eseguita sia in laboratorio, appena conclusa la miscelazione, sia in cantiere, nel momento dell'esecuzione del getto, quando l'obiettivo autocompattabilità deve esplicitare i suoi vantaggi.

Le specifiche prove, preposte a questo tipo di verifica, sono le seguenti:

- prova di spandimento o *Slump-Flow Test*;
- prova di svuotamento dell'imbuto a V o *V Funnel Test*;
- prova di svuotamento della scatola a L o *L-Box Test*;
- prova di svuotamento della scatola a U o *U-Box Test*;
- prova dell'anello J o *J-Ring Test*;

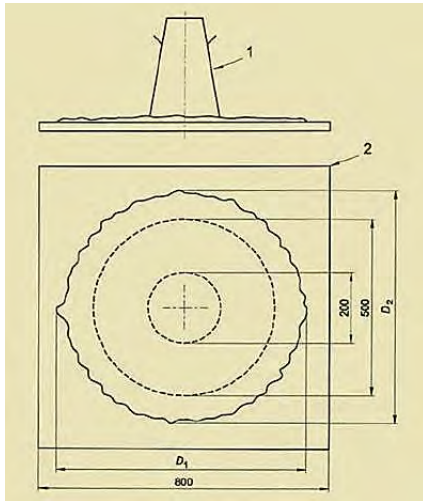


Fig. 87 Prova di spandimento / *Slump-Flow Test*

alla pagina seguente

Figg. 88, 89 90 Prova di spandimento di una miscela di SCC nel laboratorio della Calcestruzzi di Casalnuovo (NA): fasi di caricamento, sollevamento del cono e misurazione della focaccia / *Slump-Flow Test of SCC mixture in the laboratory of "Calcestruzzi" in Casalnuovo (NA): loading phases, cone lifting and focaccia measurement*

La prova di spandimento o *Slump-Flow Test* è la prima prova che si esegue, quella più semplice e, comunque, quella che immediatamente consente di verificare l'autocompattabilità del calcestruzzo, con particolare attenzione sia all'autonoma capacità di riempimento dei casseri (*filling ability*) in assenza di ostacoli, sia alla constatazione dell'assenza di segregazione (*stability*).

L'esecuzione della prova richiede l'impiego del consueto cono di Abrams e di una lastra quadrata di acciaio inossidabile di almeno 75-80 cm di lato, ben compianata posta in orizzontale. Il riempimento del cono avviene in un unico tempo, senza pistonare, poi si raso la superficie superiore del getto, si solleva il cono e si procede allo svuotamento (Figg. 87 e 88). Il calcestruzzo assumerà una configurazione molto ribassata, definita consuetamente focaccia, in cui si misura l'allargamento (Fig. 89), non avendo più alcun senso rilevare

un abbassamento al cono. Nel procedere allo svuotamento si aziona anche un cronometro per misurare quanti secondi sono necessari affinché la focaccia di calcestruzzo raggiunga un diametro di 500 mm. La seconda misurazione ha per oggetto due diametri della stessa focaccia di calcestruzzo, su cui eseguire la media, e si compie quando il flusso del conglomerato si è arrestato (Fig. 90).

Le due verifiche che ne conseguono devono constatare che:

- $D_m = [D_1 + D_2] / 2 > 600 \text{ mm}$, ovvero che quando il calcestruzzo ha cessato di fluire il diametro finale della focaccia supera i 600 mm;
- $T_{500} \leq 12 \text{ sec}$, cioè la focaccia di calcestruzzo raggiunge un diametro pari a 500 mm in un tempo inferiore ai 12 sec.

La prima relazione verifica l'autocompattabilità in relazione alla deformabilità, in quanto capacità di riempimento dei casseri per azione del solo proprio peso e capacità di scorrimento laterale. Inoltre, quando il conglomerato ha cessato di fluire si esegue una verifica qualitativa in relazione alla tendenza del conglomerato alla segregazione di flusso. Infatti, se c'è segregazione gli inerti più grossi per effetto del maggior peso tendono a collocarsi più al centro della focaccia, mentre la boiaccia, essendo la fase più fluida del composto, tende a posizionarsi maggiormente sul perimetro. E questo effetto è particolarmente evidente quando la segregazione è più spinta.

La seconda relazione verifica che l'autocompattabilità sia garantita in tempi non eccessivamente lunghi da limitare la capacità di scorrimento, in modo che il composto sia abbastanza viscoso da non subire segregazione. Di contro, quando la focaccia di calcestruzzo raggiunge un diametro di 500 mm in tempi molto brevi, il composto è così fluido da aver maggior rischio di segregazione. È evidente che oltre all'autocompattabilità si verifica la segregazione e, anche se



prestazioni SCC - S. Pietro Apostolo (PE)		
massa volumica a fresco		2417 Kg/m ³
aspetto calcestruzzo		coesivo
slump flow test nel tempo a 30° C	0'	740 mm
	30'	680 mm
	60'	680 mm
resistenza meccanica a compressione a 20° C	1 g	17,2 N/mm ²
	7 gg	35,3 N/mm ²
	14 gg	39,4 N/mm ²
	28 gg	43,0 N/mm ²
penetrazione acqua ISO-DIN 7031		6 mm

Fig. 91 Prestazioni SCC chiesa di S. Pietro Apostolo (PE) / SCC performance for the Church St. Peter the Apostle (PE)

la valutazione è soltanto visiva e non parametrica, possiede un'elevatissima attendibilità, essendo un fenomeno visivamente molto macroscopico.

È naturale che questa prova venga eseguita sia in laboratorio, a miscelazione avvenuta, sia in cantiere, cioè immediatamente prima di gettare la miscela. Il significato della duplice esecuzione per la stessa miscela è quello di verificare che si conservi la caratteristica dell'autocompattabilità per tutto il lasso di tempo in cui avviene il trasporto in cantiere e fino all'atto del getto.

Questa è la prova più importante perché verifica le proprietà principali della miscela allo stato fresco e consente di specificare anche la loro evoluzione temporale, in modo da poter testare la conservazione delle stesse in relazione anche al tempo che intercorre tra la miscelazione nelle centrali di betonaggio, l'arrivo in cantiere e l'inizio dei getti.

Ad esempio, per il calcestruzzo autocompattante della chiesa di S. Pietro Apostolo a Pescara, l'analisi delle prestazioni allo stato fresco ed indurito (Fig. 91), oltre a porre l'attenzione sul rispetto delle verifiche imposte dalla normativa, tende ad evidenziare l'evoluzione nello sviluppo delle resistenze, ma soprattutto come l'autocompattabilità va prima progettata attraverso la definizione della composizione, ma costantemente verificata attraverso lo *Slump-Flow Test*, affinché sia garantita nel tempo e non subisca decrementi tali da limitare la pompabilità della miscela. Inoltre, la valutazione della penetrazione d'acqua, come da normativa vigente, dimostra la resistenza all'aggressione dell'ambiente marino, configurando una "pietra artificiale" che possiede un ulteriore requisito a garanzia della durabilità.

Anche nella realizzazione del World Trade Center di San Marino di Norman Foster, la composizione progettata, come da normative, è stata verificata attraverso lo *Slump Flow Test*,

evidenziando, all'arrivo in cantiere, valori di spandimento variabili da 730 mm di diametro dopo 5 minuti e a 600 mm dopo un'ora (Fig. 92). Ne consegue al trascorrere del tempo un decremento che porta al limite le condizioni di autocompattabilità della miscela.

La prova di svuotamento dell'imbuto a V o V Funnel Test si esegue con un imbuto metallico di sezione molto schiacciata in cui si versa il calcestruzzo da testare, un recipiente per la raccolta da porre alla base, e un cronometro per misurare il tempo di svuotamento (Figg. 93 e 94). Diffuso in Italia, l'imbuto è a forma di V con uno spessore di soli 75 mm rispetto a un'apertura di 510 mm che, insieme alla riduzione di sezione finale, individua un percorso piuttosto limitante rispetto al passaggio della miscela. In altri paesi, si utilizza in alternativa un imbuto di sezione circolare, *O-Funnel*, con cui si esegue lo stesso test.

L'esecuzione della prova si esplicita nel riempimento dell'imbuto e nella conseguente misurazione del tempo necessario al calcestruzzo per fuoriuscire completamente, in due momenti diversi, a confezionamento appena ultimato e dopo 5 minuti di permanenza all'interno dell'imbuto stesso.

Segue la verifica che:

- $4 < T_e \leq 12 \text{sec}$

e cioè il tempo di svuotamento sia compreso tra i 4 e i 12 sec.

In sostanza, con questi tempi di svuotamento, si accerta che la capacità di scorrimento è garantita a fronte di una viscosità tale da non indurre segregazione. È evidente che a brevi tempi di svuotamento corrispondono condizioni di elevata deformabilità, e, di contro, minore viscosità plastica e minore resistenza alla segregazione. Invece, con tempi più lunghi ci si può attendere un composto meno scorrevole, ma più plastico e con maggiore resistenza alla segregazione.

prestazioni SCC - Word Trade Center		
slump flow test nel tempo a 30° C	5'	730 mm
	60'	600 mm
resistenza meccanica a compressione su cubetti	1 g	50 N/mm ²
	28 gg	95 N/mm ²
ritiro da essiccamento a 60 gg		6 μm/m

Fig. 92 Prestazioni SCC del World Trade Center di San Marino / SCC performance for the World Trade Center in San Marino

Fig. 93 Prova di svuotamento dell'imbuto a V / V Funnel Test

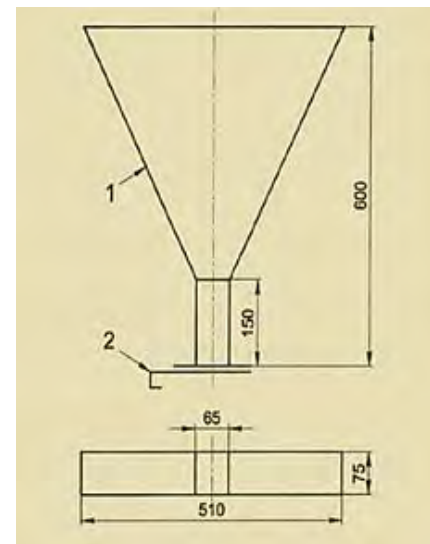




Fig. 94 V Funnel Test di una miscela di SCC nel laboratorio della Calcestruzzi di Casalnuovo (NA) / V Funnel Test of SCC mixture in the laboratory of "Calcestruzzi" in Casalnuovo (NA)

Certamente la verifica dell'autocompattabilità è assicurata, ma rispetto alla prova precedente, si riesce ad ottenere anche una valutazione della capacità di scorrimento in forme ristrette, o per singolari geometrie o per la presenza di armature molto serrate. In condizioni di questo tipo si possono indurre fenomeni sia di segregazione che di *blocking*, cioè di arresto del flusso per effetto di collisioni tra inerti grossi.

In relazione alla misurazione del tempo di svuotamento dopo 5 minuti di permanenza del conglomerato all'interno dell'imbuto a V, il significato è quello di eseguire una verifica di resistenza alla segregazione interna che il getto deve possedere, ad avvenuto riempimento delle casseforme. Pertanto, lo scarto tra la misura a tempo zero e quella dopo 5 minuti di quiete del conglomerato nell'imbuto, non deve essere che di qualche secondo, in modo da prefigurare caratteristiche di calcestruzzo confrontabili in termini di capacità di scorrimento in sezioni ristrette e soprattutto di resistenza alla segregazione non soltanto durante il getto (esterna), ma anche a getto compiuto (interna).

La prova di svuotamento della scatola a L o L-Box Test è una prova mirata a verificare la *passing ability*, cioè la capacità del calcestruzzo di fluire attraverso ferri di armatura o più in generale spazi molto stretti, senza bloccarsi o segregare (Figg. 95 e 96). La scatola è costituita da due parti, una parallelepipedica verticale chiusa ed una orizzontale aperta superiormente come una canaletta, separate tra loro da una saracinesca apribile. In corrispondenza di quest'ultima è posta una griglia di ferri di armatura.

L'esecuzione della prova prevede l'introduzione del getto di calcestruzzo, che a saracinesca chiusa non può fuoriuscire. Sollevando una leva, la saracinesca si apre ed il calcestruzzo

deve fluire da una parte all'altra della scatola attraversando le armature, che fungono da ostacolo al movimento del composto. Lo scopo della prova, dunque, è quello di verificare non soltanto la *filling ability* ma anche la *passing ability*.

La capacità di attraversamento viene valutata misurando l'altezza del conglomerato a monte a valle della saracinesca e verificando che la seconda sia almeno 80 % della prima, e cioè sia:

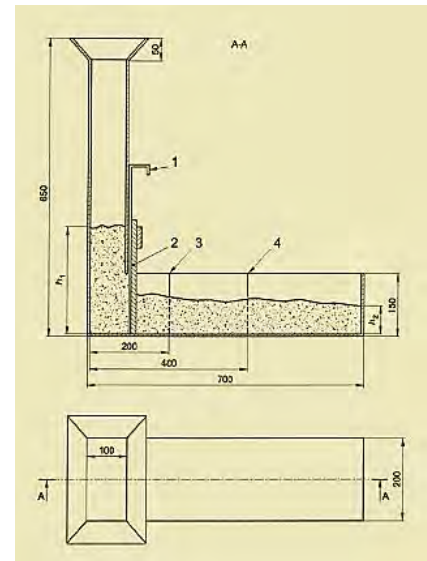
- $H_1/H_2 > 0,8$

Se questo rapporto è prossimo all'unità, la *passing ability* è molto elevata.

Generalmente l'armatura è costituita da 3 ferri ϕ 12 mm disposti verticalmente, a interasse di 34 mm rispetto ai 200 mm di base, ma le barre possono essere posizionate anche in orizzontale individuando, dunque, condizioni più svantaggiose, in relazione alla mobilità del calcestruzzo. Di contro, consentono di verificare anche la resistenza alla segregazione di flusso del getto e il verificarsi di fenomeni di collisione tra inerti grossi (*blocking*). La scelta di ferri di armatura diversi di diametro maggiore o con interferro più fitto, in casi particolarmente penalizzanti, consente di effettuare una verifica specifica ove ci siano condizioni di armature particolarmente congestionate.

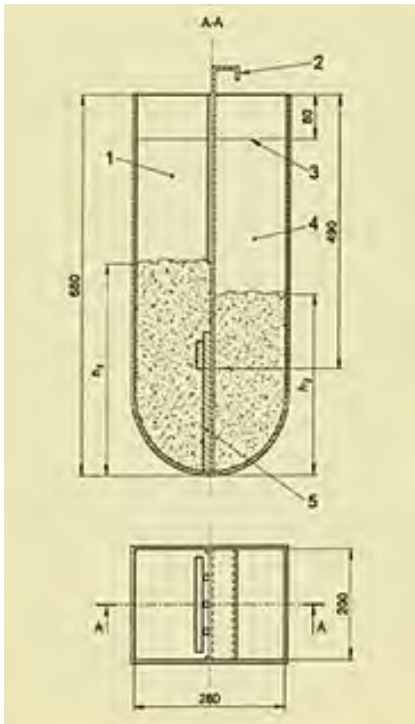
Inoltre, con questo metodo si può misurare anche la distanza corrispondente alla posizione di arresto del calcestruzzo rispetto al punto di apertura, che tende a valutare la mobilità del calcestruzzo, in relazione alla capacità di scorrimento laterale, che è funzione del limite di scorrimento e della viscosità plastica della miscela.

La prova di svuotamento della scatola a U o U-Box Test è una prova simile a quella precedente a meno della forma della scatola che è ad U, costituita da due camere parallelepipedo verticali uguali raccordati alla base e separati da una



Figg. 95 e 96 Prova di svuotamento della scatola a L / L box Test





Figg. 97 e 98 Prova di svuotamento della scatola a U / U box Test



saracinesca apribile, in corrispondenza della quale è sistemata una griglia di armatura (Figg. 97 e 98).

La miscela, versata in una camera della scatola, deve fluire dall'altra parte dopo aver azionato la saracinesca, ed in questo movimento non deve soltanto attraversare l'ostacolo delle armature, ma risalire nella sezione a valle. Una volta raggiunta una condizione di equilibrio, il conglomerato raggiungerà un'altezza maggiore quanto più elevata è la capacità di scorrimento.

Misurate le altezze del calcestruzzo a monte e a valle si verifica che sia:

- $\Delta H = H_1 - H_2 < 30 \text{ mm}$

Lo scopo della prova è ancora una volta quello di verificare la capacità di scorrimento del calcestruzzo sia in termini di *filling ability* che di *passing ability*. Ma la capacità di risalire nella sezione a valle consente di verificare le possibilità di impiego in sezioni con parti geometricamente complesse. Quindi se la miscela raggiunge maggiori altezze di riempimento a valle e in tempi brevi, dimostra di possedere, allo stato fresco, non solo un'elevata deformabilità, ma anche buone caratteristiche di mobilità in spazi ristretti.

Inoltre, se la miscela è così deformabile da riuscire a salire nella scatola ad U, si verifica anche l'esistenza delle caratteristiche tali da eseguire getti dal basso, posa in opera che aggiunge anche il vantaggio di inglobare ancora meno aria.

La prova dell'anello J o J-Ring Test è da considerarsi un completamento della prova di spandimento, in relazione alla verifica della capacità del calcestruzzo di attraversare anche armature e ostacoli in genere.

L'esecuzione della prova, oltre al consueto cono di Abrams e alla lastra di acciaio inossidabile, richiede l'impiego di un anello giapponese (J ring), costituito da aste verticali per

simulare i ferri di armatura, che viene posizionato intorno al cono (Fig. 99).

Il calcestruzzo fresco viene versato nel cono di Abrams, a sua volta posto al centro dell'anello J. Lo stampo del cono viene sfilato verso l'alto e, a spandimento avvenuto, si esegue la misura del diametro della focaccia di calcestruzzo considerando che, attraverso l'ostacolo dell'anello, il flusso subisce un certo rallentamento. La differenza tra le misure dei diametri, in condizioni di spandimento libero e in presenza dell'anello J, ciascuno calcolato come media di due diametri ortogonali tra loro, deve essere:

- $\Delta \phi < 50 \text{ mm}$

In tal modo, si verifica la capacità di scorrimento in presenza di armature, anche se il metodo si applica a calcestruzzi con aggregato grosso di dimensioni non maggiore di 20 mm.

Specifiche normative UNI, richiamate dalla norma generale UNI 11040, disciplinano l'esecuzione delle prove descritte per valutare le proprietà reologiche del calcestruzzo allo stato fresco, disponendone l'accertamento, sia in laboratorio che in cantiere, tranne per le prove della scatola a L e della scatola a U che si eseguono soltanto in laboratorio (Fig. 100). Le recenti Norme UNI EN e le linee Guida Europee dispongono, per le stesse prove, maggiori misurazioni per una valutazione delle proprietà reologiche più proporzionata alle specifiche esigenze di autocompattabilità e di *passing ability* (Fig. 100). In particolare lo slump-flow test valuta due classi di viscosità e tre classi di spandimento misurando rispettivamente tempo di svuotamento e diametri; il *V Funnel Test* valuta due classi di viscosità misurando il tempo di efflusso dall'imbuto; la *L Box Test* e il *J Ring Test* valutano, con due classi diverse, la *passing ability*, in relazione alla capacità di attraversamento di due o tre barre di armatura.

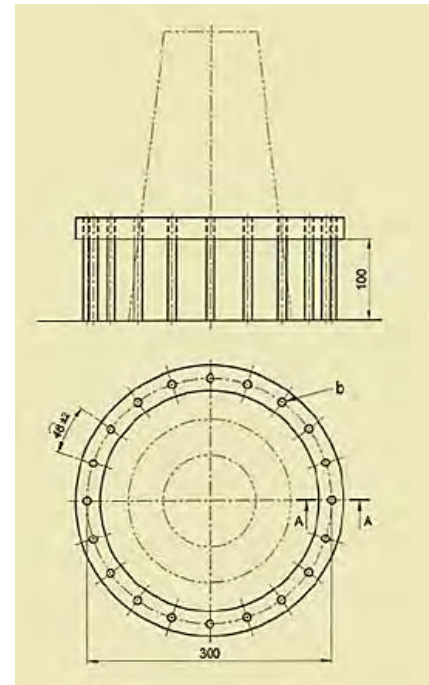
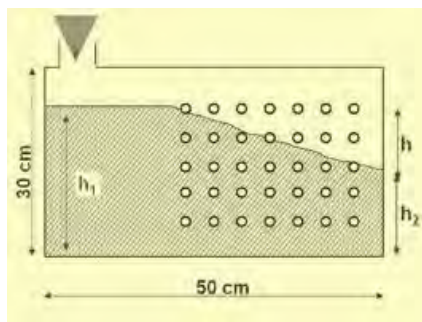


Fig. 99 Prova dell'anello J / J Ring Test

riferimento precedente	test	riferimento attuale
UNI-11041	slump flow	UNI-EN 12350-8
UNI-11041	slump flow (D 50 mm)	UNI-EN 12350-8
UNI-11042	V funnel	UNI-EN 12350-9
UNI-11042	V funnel (a 5 min.)	UNI-EN 12350-9
UNI-11043	L box	UNI-EN 12350-10
UNI-11044	U box	---
UNI-11045	J ring	UNI-EN 12350-12

Fig. 100 Sintesi dei Test e delle relative normative / Test and regulatory summary



Figg. 101 e 102 Kajima Test



La *U Box Test* non è contemplata né dalle Linee Guida Europee, né dalla UNI EN 206-9, mentre si introduce con la Norma UNI EN 12350-11 la prova di resistenza alla segregazione con setaccio, che valuta due livelli di resistenza alla segregazione.

A queste prove se ne aggiunge un'altra, ancora una volta di scuola giapponese, che è il *Kajima Test* (Figg. 101 e 102).

L'apparecchiatura è costituita da una scatola parallelepipedica in plexiglass, contenente barre orizzontali molto fitte. La prova si esegue introducendo il calcestruzzo dal lato sinistro attraverso un'apertura posta in alto e lasciandolo defluire verso la parte destra attraversando queste barre. A prova ultimata, si misurano le altezze a monte e a valle h_1 e h_2 e si verifica che il 90% della miscela sia defluita. Deve risultare pertanto:

- $\frac{(H_1 + H_2)}{2H_1} \times 100 > 90\%$

Inoltre, si verifica che la differenza tra le due altezze sia minore o uguale a 6 cm, e cioè:

- $\Delta = (H_1 - H_2) \leq 6 \text{ cm}$

La valutazione che la prova tende ad effettuare è la capacità di fluire del calcestruzzo anche in corrispondenza di armature orizzontali che costituiscono l'ostacolo più penalizzante.

3.5 Ritiro

Il ritiro, in quanto riduzione di volume che accompagna l'intera fase di maturazione del calcestruzzo, prevale nella prima fase del processo di maturazione, quella plastica, per tendere poi gradualmente a stabilizzarsi man mano che si compie la fase di indurimento.

Il ritiro cosiddetto plastico, quello più accentuato che

interessa il calcestruzzo durante la fase plastica, avviene per effetto di due azioni combinate: la reazione chimica, che accompagna l'idratazione del cemento e l'evaporazione dell'aliquota di acqua di impasto non coinvolta alla reazione stessa. Questi due fenomeni inducono rispettivamente ritiro autogeno e ritiro igrometrico.

La reazione chimica di idratazione del cemento è a "debito di volume", in quanto la trasformazione genera un prodotto di volume minore rispetto alla somma dei volumi dei componenti reagenti, determinando il ritiro autogeno. Nei conglomerati cementizi convenzionali il ritiro autogeno è trascurabile, ma è comunque inevitabile essendo "imposto" dalla reazione chimica, per cui non è possibile esercitare, durante la maturazione, nessuna azione per contenerlo.

L'evaporazione dell'acqua non coinvolta nella reazione, quella di bagnatura degli inerti e quella di lavorabilità, è responsabile del ritiro igrometrico. Pertanto, con bassi rapporti acqua-cemento, e con azioni mirate a rallentare il più possibile l'evaporazione si riesce a contenere al massimo il ritiro igrometrico.

Anche se gli autocompattanti sono caratterizzati da una elevata compattezza e un basso rapporto acqua-cemento, i dati sperimentali dimostrano che in questi calcestruzzi il ritiro è maggiore e a volte, tende addirittura a raddoppiare rispetto ai conglomerati cementizi convenzionali. Le cause da evidenziare sono più d'una e si sommano le une alle altre condizionando il risultato.

A parità di valori di resistenza, la composizione di un autocompattante è responsabile di un maggior ritiro essendo essenzialmente dettata da un aumento del volume di pasta cementizia rispetto ad un calcestruzzo tradizionale (Fig. 103). La maggiore quantità di cemento è sia un dato assoluto che un dato relativo rispetto alla riduzione dell'aggregato, a parità

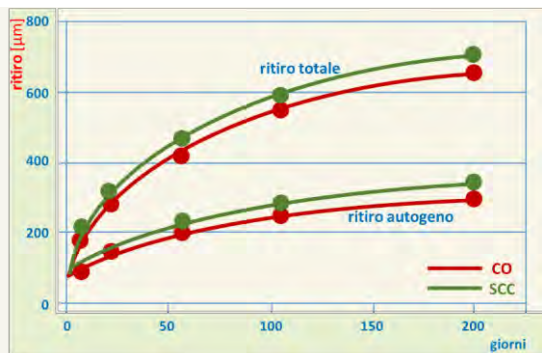


Fig. 103 Confronto ritiro (totale e solo autogeno) tra un SCC e un CO a parità di resistenza / *Withdrawal comparison (total and only autogenous) between an SCC and an CO, with the same resistance*

di volume. E maggiore quantità di cemento interessato dalla reazione di idratazione significa maggior ritiro autogeno. È naturale che a bassi rapporti acqua-cemento e bassi dosaggi di cemento corrispondano valori di ritiro degli autocompattanti di poco superiori rispetto a quelli del conglomerato tradizionale, al punto da essere trascurabili.

Inoltre, l'aumento del dosaggio di cemento impone un relativo aumento della quantità di acqua di impasto che, in relazione alla reazione chimica significa maggior ritiro autogeno e, per le restanti aliquote, maggior ritiro.

Infine, considerando che all'aumento del volume di pasta cementizia corrispondono la diminuzione della quantità di aggregato grosso e la riduzione del diametro massimo di quest'ultimo, si può constatare che, venendo a mancare l'azione di contrasto esercitata dagli inerti, non può che aumentare il ritiro igrometrico.

La riduzione del fenomeno del *bleeding* che contraddistingue i calcestruzzi autocompattanti diviene causa del maggior ritiro plastico, poiché il velo d'acqua che generalmente si forma sulle superfici dei getti costituisce una certa protezione, rispetto all'incipiente evaporazione dell'acqua di impasto. La miscela presenta nella fase immediatamente successiva alla posa in opera una maggiore coesione interna che manifesta un comportamento leggermente tixotropico alla base della riduzione del *bleeding*. Ne consegue una superficie di interfaccia con l'aria che tende ad essere più secca e quindi maggiormente deputata alla formazione di fessurazioni da ritiro. Questo effetto giustifica la necessità di controllare la fase di maturazione con accorgimenti mirati al rallentamento dell'evaporazione, specialmente per le superfici non cassate.

Altri due parametri intrinseci alla composizione degli

autocompattanti che inducono un aumento del ritiro sono il maggior rapporto acqua-finissimo ed il maggior dosaggio di additivo superfluidificante. Il primo comporta un incremento di acqua destinata ad evaporare durante il processo di maturazione, mentre il secondo determina il protrarsi della fase plastica per effetto dell'allungamento dei tempi di presa. Ne deriva, in entrambi i casi un conseguente aumento del ritiro igrometrico. Si rende pertanto necessario provvedere ad un'attenta stagionatura.

Dunque, tenendo conto delle diverse cause evidenziate, i cui effetti agiscono in sommatoria, nel calcestruzzo autocompattante, che generalmente presenta un basso rapporto acqua/cemento, il ritiro igrometrico tende a diminuire e quello autogeno tende ad aumentare. In alcuni casi, in cui questa differenza aumenta può verificarsi anche che l'aliquota di ritiro igrometrico sia superata da quella di ritiro autogeno.

Tuttavia, in questa sommatoria dei pesi diversi degli effetti generanti il ritiro, gli equilibri possono riservare sorprese inattese. Molto interessante, infatti, è il valore del ritiro della miscela del World Trade Center di San Marino, intrinsecamente molto modesto, che con il valore di $380 \mu/m$ si dimostra confrontabile, se non addirittura inferiore, a quello di un calcestruzzo ordinario. Del resto si spiega con la composizione, (riportata in Fig. 73, cap.2), in cui è evidente un bassissimo rapporto a/c, che riduce al minimo l'aliquota di ritiro idraulico, rispetto a quella di ritiro autogeno che è inevitabile.

Oltre alle attenzioni in fase di *curing*, che sono assolutamente fondamentali per evitare o limitare la microfessurazione superficiale, è possibile usare un additivo anti-ritiro (*Shrinkage Reducing Admixture*, SRA) che offre la libertà di una semplice maturazione all'aria.

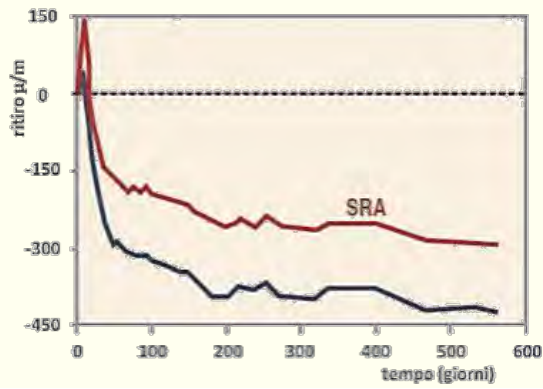
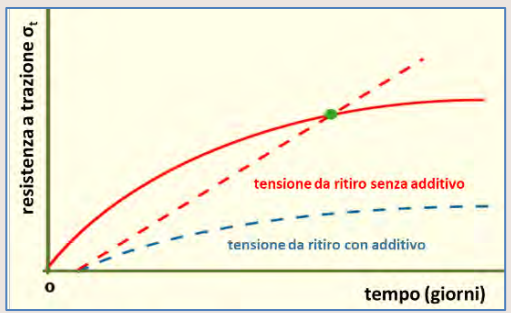


Fig. 104 Valutazione dell'effetto dell'additivo antiritiro nel tempo / Evaluation of the anti-withdrawal additive over time

Fig. 105 Confronto tra resistenza a trazione del conglomerato e le tensioni di trazione indotte dal ritiro / Comparison between the tensile strength of the conglomerate and the tensile stresses induced by shrinkage



L'azione di questo prodotto a base di eteri poliglicoli, determina un consistente aumento dell'espansione iniziale in fase plastica, con una certa prevedibilità dell'effetto benefico nell'immediato. Dopo qualche settimana l'azione, in termini di riduzione della contrazione da ritiro, è ancora abbastanza apprezzabile. Tuttavia, nel tempo, l'effetto tende a diminuire sempre più e il valore del ritiro, seppur ridotto dimensionalmente, conserva un'aliquota residuale. Dunque, il suo effetto non è risolutivo (Fig. 104).

Per ben comprendere l'azione dell'additivo anti-ritiro, è fondamentale comprendere la dinamica fessurativa del ritiro. Questo fenomeno non è controllabile né con il basso rapporto a/c, né con un'elevata compattezza, che agiscono soltanto sulla resistenza a compressione del conglomerato, mentre la fessurazione da ritiro dipende dalla modesta resistenza a trazione, per cui il calcestruzzo non riesce a sopportare le tensioni di trazione indotte dal ritiro stesso.

Pertanto è importante, non sottovalutare l'azione benefica dell'additivo antiritiro in fase plastica, che va a tutto vantaggio del copriferro e della sua durabilità, con l'ulteriore beneficio della libertà di scassare anche dopo un solo giorno. La riduzione della microfessurazione della superficie e del copriferro si spiega con un significativo abbattimento delle tensioni di trazione indotte dal ritiro prevalentemente in fase plastica e ancora apprezzabile nella prima settimana, in misura tale da essere sopportabili dalla resistenza a trazione che si va maturando nel conglomerato (Fig. 105). Questo stato tensionale preserva la matrice cementizia, e il copriferro in particolare, dalla fessurazione da ritiro, massimizzando la funzione di protezione delle armature che, diversamente rischierebbero l'ossidazione.

Il principio in questo meccanismo di controllo è quello di abbassare la tensione di trazione indotta dal ritiro, rispetto

alla soluzione con impiego di fibre, che, al contrario, innalza la resistenza a trazione del conglomerato.

Dunque, alternativa di tutt'altro tipo, per una significativa azione di contrasto al ritiro, è l'azione delle fibre. In particolare, le fibre di polipropilene, economiche ed efficaci, determinando un aumento di resistenza a trazione della miscela cementizia (Fig. 106), riducono i rischi di fessurazione. Inoltre, rendendo il calcestruzzo un materiale composito, aggiungono altri due comportamenti, quello di intercettare le microfessure arrestandone lo sviluppo e quello ultimo di ripristinare la continuità strutturale tra i lembi di una fessura formatasi, in quanto le fibre (Fig. 107) creano un reticolo tridimensionale che esercita un'azione di cucitura.



Il ritiro, invece, è addirittura negativo nel calcestruzzo a facciavista del MAXXI di Zaha Hadid a Roma. Non si tratta di un semplice autocompattante, ma di una miscela molto più performante progettata in risposta a due esigenze congiunte, una di tipo estetico ed un'altra di tipo cantieristico. Da una parte, l'architetto anglo-iracheno pretende per le flessuose superfici, lunghe più di cento metri, una continuità incontrastata che non lascia spazio ai giunti di dilatazione, dall'altra l'impresa che deve eseguire i lavori teme l'onerosità, in fase di stagionatura, dei trattamenti di *curing* necessari a farsi (Fig. 108). Il prof. Mario Collepari mette a punto un

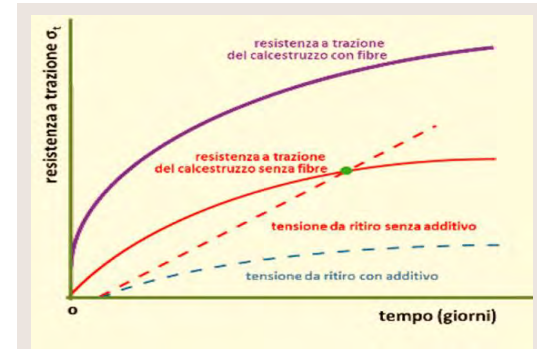


Fig. 106 Confronto tra resistenza a trazione del conglomerato (con fibre e senza fibre) e le tensioni di trazione indotte dal ritiro / Comparison between tensile strength of the conglomerate (with fibers and without fibers) and tensile stresses induced by shrinkage

Fig. 107 Macrofibre, microfibre e fibre fibrillate in polipropilene / Macrofibres, microfibrils and fibrillated fibers in polypropylene



Fig. 108 Rimozione dei casseri nel MAXXI di Roma / Formworks removal in the MAXXI in Rome

Fig. 109 Parete del MAXXI di Roma appena scasserata / MAXXI wall after the formworks removal



autocompattante che non si ritira e quindi non necessita di giunti tecnici e può liberamente stagionare dopo la rimozione dei casseri. Sinteticamente individuata con l'acronimo 3SCC, la miscela è una “sommatoria” di tre calcestruzzi speciali, ciascuno con la propria innovatività, che sintetizza tre automatismi (*self*) insieme. Si tratta di un autocompattante, che è anche autostagionante e autocompresso.

L'autostagionante è un calcestruzzo in cui l'additivo antiritiro SRA, aggiunto all'autocompattante, conferisce un certo contrasto dell'azione di ritiro, come già detto, inaugurando una seconda generazione di autocompattanti. L'autocompresso, infine, è un calcestruzzo in cui un additivo espansivo contrasta il ritiro, con un aumento di volume che crea uno stato tensionale per fronteggiare la riduzione di volume effetto del ritiro, soltanto se si eseguono con attenzione le rituali azioni di *curing*, dopo la scasseratura. Senza nulla togliere all'autonomia applicativa di ciascuna delle tre miscele, in casi specifici, queste tre, in sinergia, guadagnano molto in termini di prestazioni, per l'azione combinata dell'additivo SRA con l'agente espansivo, che, in una felice congiunzione, agiscono allo stato fresco alla scala molecolare. Il risultato è non soltanto la totale assenza di ritiro, ma un residuo di espansione, che è piuttosto uno stato di coazione interna che inibisce fenomeni fessurativi. L'ordine di grandezza di questo “ritiro negativo” è circa la metà del valore medio di ritiro nel semplice autocompattante.

Certamente l'efficacia espressiva delle lunghe superfici in calcestruzzo a facciavista del MAXXI, sia all'esterno che all'interno del grande vaso spaziale, si deve a questa miscela, tre volte innovativa, (Figg. 108 e 109), che fornisce una risposta al problema del ritiro certamente importante non solo per la ricerca teorica, ma anche nella logica circolare di *design, constructions and re-design*.

3.6 Facciavista

Nella realizzazione di superfici a facciavista l'impiego del calcestruzzo autocompattante consente di guadagnare in qualità. In tal senso, sono le stesse caratteristiche del composto allo stato fresco a garantire un risultato più elevato, sia sotto il profilo esteriore, che della durabilità. In particolare, il buon facciavista è da attribuirsi essenzialmente all'aumento del volume di pasta cementizia grazie all'impiego del filler, che contestualmente alla prevalenza di aggregato fino, a scapito di quello grosso, costituisce il presupposto di una compattezza eccezionale. Questo parametro tecnico è autore di un requisito estetico, che associato a scelte formali, fluide e morbide, guadagna singolari caratterizzazioni nel panorama dell'architettura contemporanea (Figg. 110 e 111).

Eppure questa caratteristica è condizionata qualitativamente dall'interazione con il ritiro e indirettamente con la specifica composizione cui si relaziona. Appare, pertanto, quanto mai necessario provvedere ad un'attenta stagionatura.

Un altro parametro che assicura un buon facciavista è, come per un conglomerato tradizionale, la modalità di esecuzione del getto, che, se effettuato dal basso tende ad inglobare meno aria. Di contro, gettando dall'alto la miscela per l'altezza di caduta e la velocità tende maggiormente ad inglobare una certa quantità d'aria che arriva all'interfaccia con i casseri e crea antiestetiche bolle sulla superficie. Questo fenomeno, che è più considerevole nei calcestruzzi ordinari con incidenza dimensionale compresa tra un millimetro ed un centimetro, è di per sé ridotto negli autocompattanti non essendo necessaria né pistonatura, né vibrazione. Inoltre, se la miscela è posta in opera dal basso mediante pompa, la superficie del facciavista si presenta ancor più continua.

Analogamente a quanto accade nei conglomerati



Fig. 110 Il Phaeno Science Centre di Zaha Hadid a Wolfsburg, patria della Volkswagen / *The Phaeno Science Center of Zaha Hadid, home of the Volkswagen*

Fig. 111 Dettaglio parete in SCC in costruzione / *SCC wall detail under construction*





Fig. 112 Parete in SCC della Stazione Marittima di Salerno / SCC wall of the Maritime Station

Fig. 113 Il cantiere della Stazione Marittima / The building site of the Maritime Station



tradizionali, la qualità del facciavista è influenzata anche dal tipo di cassero e, in particolare dalle caratteristiche della relativa superficie. In tal senso, influiscono la qualità del disarmante e l'impiego di strati di materiale assorbente sulla superficie di controcassero, che devono essere prudentemente testati. Questi strati sulla superficie interna del cassero attenuano sensibilmente la formazione di bolle superficiali, che, insieme all'attenzione di eseguire il getto dal basso, sono certamente due accorgimenti che fanno la differenza per l'estetica del risultato.

Nella realizzazione di superfici a facciavista complesse, caratterizzate da forme plastiche e tridimensionali, il cassero è in polistirolo espanso ad alta resistenza e viene stampato con sistemi di fresatura attraverso il taglio a controllo numerico, in modo da garantire la qualità formale del risultato finale. La finitura della superficie in calcestruzzo, invece, è sempre più affidata all'interazione con fibrorinforzi, in modo da garantire maggiore qualità materica, in risposta ai requisiti di durabilità.

Nella nuova Stazione Marittima di Salerno (Fig. 112), prima opera di Zaha Hadid nel sud d'Italia, sono state impiegate soltanto per la copertura 1.540 casseforme di polistirolo espanso (Fig. 113). La curvatura irregolare di 2300 mq di superficie è stata discretizzata in pannelli quadrati di lato 1,25 m, ciascuno diverso dall'altro, il cui spartito si legge sull'intradosso nel calcestruzzo a facciavista. In un contesto formale di tale variabilità appare come un modo per scandire la spazialità interna e, al contempo, un elemento che struttura l'ordine.

A questo esempio, che documenta l'esperienza del getto in opera, si affianca quello del MMM Coronas, il museo della montagna dello studio Zaha Hadid Architect, in cui i pannelli, montati con la soluzione della facciata ventilata, sono

prefabbricati (Figg. 114 e 115). Le forme morbide e complesse sono progettate in tre dimensioni e poi impresse nel polistirolo mediante fresatura, in modo da creare i casseri. Per agevolare la rimozione delle casseforme si è posata sulla faccia interna un rivestimento in fibre di vetro, mentre nella realizzazione di getti dei pannelli sono stati eseguiti strati alterni di fibre di carbonio e di calcestruzzo armato con reti di alluminio, in modo da ottenere componenti di elevata durabilità.



“La verità è troppo nuda per interessare gli uomini”. Sono parole di Jean Cocteau, poeta, scrittore, drammaturgo e artista, che, trasposte in materia di calcestruzzo a facciavista, sembrano sigillare un concetto della verità costruttiva. Il facciavista del calcestruzzo è esplicitamente dichiarato in una *nudità*, che è qualità architettonica, in un linguaggio di verità semplice e diretto, che la tecnologia dichiara in maniera palese

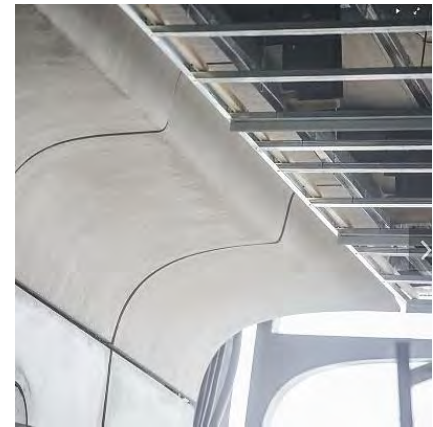


Fig. 114 MMM Corones, il Museo della Montagna a Plan de Corones (BZ) / MMM Corones, the Mountain Museum in Plan De Corones (BZ)

Fig. 115 Dettaglio di fissaggio dei pannelli prefabbricati interni / Fixing detail of the internal prefabricated panels



Fig. 116 Il calcestruzzo a faccia vista sulla superficie esterna del MAXXI / *The concrete to face on the external surface of the MAXXI*

Fig. 117 Interno del MAXXI con travi a lamella in calcestruzzo a faccia vista / *MAXXI interior with reed beams in concrete to face*



(Figg. 116 e 117). La lezione di Louis. I. Kahn e quella di Nervi sono così immediatamente percepibili, se non addirittura troppo evidenti in questo concetto, in cui “sporcandosi le mani” con il cemento, o meglio con il calcestruzzo, si riesce a ottenere un facciavista durabile.

Tuttavia, la scelta del facciavista appare in collisione con le problematiche del risparmio energetico, in quanto, l’elevata conducibilità che caratterizza i composti cementizi in generale, determina un comportamento energivoro, che oggi non è più sostenibile. La prima riflessione a farsi è che la crescita dell’attenzione ai comportamenti più virtuosi energeticamente tende gradualmente a mettere al bando una finitura di memoria lecorbusiana, molto cara anche a Louis I. Kahn e a Tadao Ando.

L’alternativa di più immediata proponibilità è quella del cappotto interno, con tutti gli effetti collaterali che ne conseguono, a cominciare dal rischio di condensa. Ma il problema più irrisolvibile, in tal caso, oggi, sono i ponti termici che la “teoria del pennarello rosso”, sempre più attenta, non consente di trascurare, in nome di una continuità dell’isolamento estrema. E ancora una volta la tecnologia, alleata con la visione strutturale più avanzata, offre una risposta di grande eccezionalità, dal punto di vista della qualità del risultato raggiungibile. La soluzione del cappotto interno deve essere necessariamente concepita in termini di continuità per non avere ponti termici in corrispondenza degli innesti degli orizzontamenti. Ne consegue la formulazione della soluzione cosiddetta con i solai sospesi, vincolati tramite tiranti all’impalcato di copertura (Fig. 118). Quindi, ai piani intermedi, le strutture degli orizzontamenti sono sconnesse dalla parete d’involucro in calcestruzzo a facciavista, lasciando correre sulla faccia interna di questa chiusura d’ambito lo strato di isolante termico, eliminando, e non

semplicemente riducendo, i ponti termici localizzati. Gli esempi sono strutturalmente eccezionali in quanto, in una visione del cantiere alquanto industrializzata. Dopo aver realizzato la struttura di copertura si procede, in maniera seriale, dal basso verso l'alto, con il getto delle solette di solaio, una per volta, e, a maturazione avvenuta, si esercita un'azione di trazione del cavo di sospensione. Questa tensione di post trazione va ad equilibrare il carico di ciascun solaio non appena entra in esercizio (Figg. 119 e 120).

Il caso dell'ampliamento della sede della Bocconi di Milano (2007) impiega questa soluzione con una struttura verticale fatta di pareti portanti in calcestruzzo che lavorano in coppia e definiscono, al contempo, gli spazi di servizio (Fig. 121).

Il caso dell'edilizia residenziale di sostituzione a Bergamo (2011), con la soluzione dei solai sospesi (Figg. 122 e 123) consente di ottenere livelli di isolamento così elevati da guadagnarsi la classe energetica A.

3.7 La durabilità

Nell'arco della loro vita, il calcestruzzo e le strutture in calcestruzzo sono esposti, in condizioni di esercizio, ad agenti esterni presenti nell'ambiente, quali aria, liquidi aggressivi, terreno, acque ricche di cloro e acque soggette a cicli di gelo e disgelo, che determinano nel tempo fenomeni di degrado, il cui avanzamento compromette la durabilità dello stesso calcestruzzo e delle strutture. Ne consegue la formulazione della durabilità in quanto prestazione, che si estrinseca come capacità del calcestruzzo di conservare le sue caratteristiche meccaniche di progetto per tutta la durata della sua vita utile nominale. Ciò significa definirla quale prestazione da spendere per resistere agli attacchi dell'ambiente, che, potenzialmente, possono indurre fenomeni di degrado.



alla pagina precedente

Fig. 118 Nuova sede dell'Università Bocconi di Milano / *New headquarters of the Bocconi University*

Figg. 119 e 120 Cavi per la sospensione dei solai e ancoraggio / *Cables for suspension of floors and anchorage*

Fig. 121 Struttura verticale con coppie di pareti portanti in calcestruzzo / *Vertical structure with pairs of load-bearing walls in concrete*



Nel corso della loro vita le strutture sono a contatto, attraverso l'aria, con anidride carbonica, anidride solforosa, ossidi di azoto e altre sostanze che si assimilano allo smog e all'inquinamento ambientale. Attraverso i liquidi, il calcestruzzo è a contatto con cloruri, solfati, ammoniaca e altre sostanze aggressive che tendono ad attaccare la matrice cementizia e le armature. In particolare, attraverso l'acqua di mare si struttura l'attacco di cloruri, solfati, magnesio e bicarbonati, che esasperano l'azione aggressiva. Anche attraverso il terreno si manifesta l'azione di cloruri e di solfati, che possono essere presenti anche negli inerti e che esercitano, in misura estrema, l'attacco alla matrice cementizia compromettendo i legami idraulici.

La durabilità dei calcestruzzi è affidata alle normative UNI EN 206-1/2006 e UNI 11104/2004 e successivi aggiornamenti (UNI EN 206/2016 e UNI 11104/2016), che devono assolvere al compito di rimodulare alcuni requisiti della composizione in relazione alle classi di esposizione. Queste interpretano le potenzialità del degrado attraverso l'aggressività degli agenti atmosferici. Il principio è quello di garantire la conservazione delle prestazioni del calcestruzzo in specifici luoghi per tutta la vita utile nominale dell'opera, progettandone a monte la composizione, in modo da creare le condizioni per neutralizzare le azioni del degrado nel loro verificarsi. E la composizione va progettata nel rispetto di alcuni valori limite, che, in un crescendo di contesti potenzialmente sempre più aggressivi, pongono limiti sempre maggiori.

Ciascuna delle sei classi di esposizione individua l'aggressività del contesto ambientale in cui vivrà il calcestruzzo e quindi rappresenta il rischio di degrado cui è soggetto il calcestruzzo stesso e la relativa struttura da esso costituita. Ed è proprio il rischio di degrado, specifico di quel contesto, che va controllato con una progettazione della

miscela con caratteristiche capaci di contrastarlo ed impedirne la formazione. Questa “prevenzione” del degrado è ottenuta progettando la composizione per ciascuna classe o sottoclasse di esposizione, e cioè in relazione al rischio di degrado, fino a definire le quantità dei singoli componenti in maniera proporzionata.

La durabilità, in quanto “attitudine di un'opera a sopportare attacchi di agenti aggressivi di diversa natura mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche e funzionali”, secondo le definizioni del CEB (*Comité Européen du Béton*) e del FIP (*Federation Internationale de la Precontrainte*), è una prestazione da garantire per tutta la vita utile dell'edificio. Questo valore è pari a 50 anni per le strutture in classe 1, quali normali costruzioni viarie o ferroviarie, la cui eventuale interruzione non provoca situazioni di emergenza, costruzioni per industrie con attività non pericolose, edifici e costruzioni con normali affollamenti e costruzioni senza funzioni pubbliche e sociali di rilevante importanza. Mentre è pari a 100 anni per costruzioni con affollamenti significativi in esercizio, reti ferroviarie e viarie le cui interruzioni possano provocare situazioni di emergenza, industrie con attività pericolosa per l'ambiente.

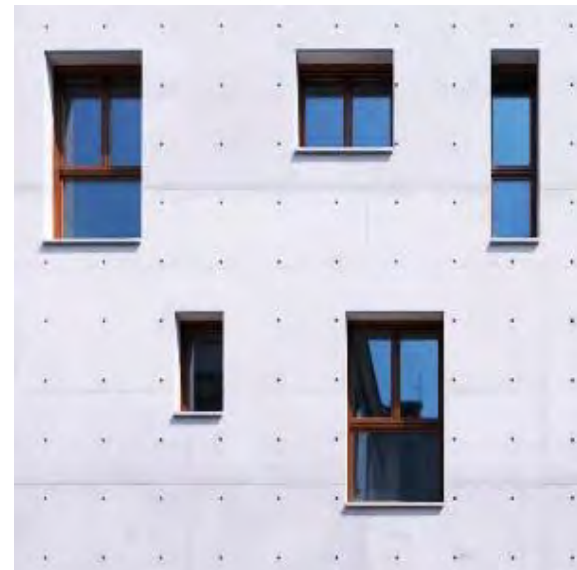
L'approccio di prevenzione del degrado del calcestruzzo armato, gettato in opera, prefabbricato e precompresso, si articola in tre fasi.

La prima incentrata sul progetto della miscela e della struttura in relazione al contesto ambientale e alla relativa analisi. La seconda fondata sulla realizzazione della struttura a partire dalla predisposizione dei casseri fino alla maturazione del calcestruzzo. La terza, infine, è la fase relativa manutenzione, che si articola in interventi programmati nel corso della vita utile, tra protezione e ripristino.



Fig. 122 Edificio residenziale e terziario in calcestruzzo a faccia vista a Bergamo (classe A) / Residential and tertiary building made by concrete to face situated in Bergamo

Fig. 123 Dettaglio di facciata in calcestruzzo a faccia vista / Facade detail of a concrete to face



In relazione alla fase di progetto, la prima garanzia della durabilità si ottiene richiedendo classi di resistenza sempre più elevate all'aumentare dell'aggressività dell'ambiente, in modo da fondare su valori di compattezza sempre maggiori la capacità del calcestruzzo di difendersi dagli attacchi esterni. Elevata resistenza e rilevante compattezza rendono la matrice cementizia fisicamente impenetrabile alle aggressioni dell'ambiente, essendo la porosità sempre più ridotta. Il secondo step di garanzia della durabilità è il controllo del rapporto acqua-cemento, che deve essere in generale piuttosto contenuto e, nella logica della normativa, inferiore a un valore limite. Il rapporto acqua-cemento, se contenuto, è il parametro della composizione di un calcestruzzo più importante per garantire un'elevata resistenza, che, a sua volta, si struttura sulla riduzione dei pori e sulla compattezza. Il terzo momento di verifica si affida ad un incremento, sia pur misurato, di cemento, per avere ulteriori chance di elevata compattezza.

I calcestruzzi di nuova generazione puntano le loro prestazioni elevate proprio sulla compattezza, leggibile in particolar modo alla scala della matrice cementizia, come si riscontra negli autocompattanti, in cui il filler, in quanto nuovo componente, determina, allo stato indurito, una maggiore compattezza, che è anche il presupposto per una maggiore durabilità, essendo la massa più compatta e quindi meno permeabile e meno attaccabile dagli agenti aggressivi. Inoltre, l'eccezionale compattezza non è solo presupposto di resistenza meccanica, ma anche di impermeabilità (Fig. 124), proprietà che garantiscono una straordinaria durabilità. Anche il miglior faccia vista dell'autocompattante, di superiore qualità da non richiedere ulteriori finiture, offre un contributo nei confronti dell'obiettivo durabilità, in quanto per effetto della superficie più levigata e continua limita

Fig. 124 Confronto della permeabilità tra un SCC e un CO / Comparison of the permeability between an SCC and a CO



l'accesso agli agenti esterni degradanti.

Il calcare macinato è un filler completamente inerte dal punto di vista chimico, che, essendo di dimensioni micrometriche, migliora le caratteristiche reologiche esercitando un'azione soltanto fisica. Le cosiddette pozzolane artificiali, come la cenere volante, la microsilice e la loppa d'altoforno, invece, aggiungono anche un'azione chimica stabilizzante a bassa velocità. In particolare, queste aggiunte minerali, oltre al semplice ruolo di filler, innescano una reazione pozzolanica, tardiva rispetto a quella del cemento, con limitato sviluppo di calore. Come già detto, ai silicati e ai silico-alluminati idrati primari, prodotti dalla reazione del cemento, si affianca la calce che, solo in un secondo momento, è coinvolta in una reazione pozzolanica con i filler, formando silicati e silico-alluminati idrati secondari, con un certo incremento di resistenza meccanica conseguente. Come per una qualsiasi pozzolana, si innesca la formazione di composti idraulici, con una velocità molto minore rispetto a quella cementizia, con il vantaggio di ottenere anche un'azione stabilizzante nei confronti della calce libera e, di conseguenza, accrescere anche la durabilità.

Si rileva un duplice meccanismo difensivo che esplica una difesa attiva, stabilizzando la calce libera, ed una, per così dire, passiva fondata sulla ridotta porosità che limita l'accesso degli agenti aggressivi. Nell'impiego di questi filler ad attività idraulica latente, si delinea un approccio che rilegge scientificamente l'esperienza dei romani e fonda la durabilità sui presupposti che hanno garantito la durabilità delle costruzioni romane nei secoli. L'innovazione, in continuità con la tradizione costruttiva del passato, rilegge meccanismi già noti e li rende ancor più attivi, strutturandoli alla scala micrometrica, secondo un vero e proprio obiettivo progettuale.

Nelle miscele autocompattanti il rapporto acqua-cemento, piuttosto basso rispetto a quello di un calcestruzzo ordinario, determina prevedibili e immediati guadagni in termini di resistenza e quindi di compattezza e di durabilità. All'azione del filler pozzolanico si aggiunge quella del superfluidificante, in quanto riduttore d'acqua. Dunque, il rispetto del rapporto acqua-cemento, tra i requisiti minimi imposti dalla normativa per la durabilità, è garantito. Anzi, a volte tale valore riesce ad essere ancor più contenuto, creando ulteriori riserve da spendere.

Inoltre la durabilità si deve anche ad un incremento della qualità della microstruttura all'interfaccia pasta-aggregati, per effetto di una minore porosità del conglomerato. Ne consegue, a parità di rapporto acqua/cemento, una riduzione di microfessurazioni e di difetti vari rispetto ai calcestruzzi ordinari. L'apparecchio, più serrato e con una maggiore azione legante, determina, da un lato, un miglioramento delle resistenze meccaniche a compressione e a trazione e dall'altro un incremento delle tensioni di aderenza tra acciaio e calcestruzzo.

3.8 La tecnologia dei pali a elica continua

I calcestruzzi autocompattanti e anche quelli semplicemente reoplastici hanno già da alcuni anni inaugurato la tecnologia dei pali a elica continua, che velocizza significativamente la realizzazione di paratie di sostegno e che, nelle applicazioni nei contesti costruiti, moltiplica ulteriormente i vantaggi di questi conglomerati (Fig. 125). La soluzione "CFA (*Continuous Flight Auger*)", delinea una "tecnologia nella tecnologia" del calcestruzzo SCC, che si sta diffondendo perché il livello di semplificazione che la caratterizza è tale da bilanciare ampiamente i costi

alla pagina seguente:

Fig. 125 Paratia di pali / *Bulkhead*

Fig. 126 Palo a elica continua: a) perforazione; b) estrazione del terreno e getto SCC; c) inserimento gabbia di armatura / *Continuous Flight Auger pile: a) drilling; b) soil extraction and SCC jet; c) insertion of reinforcement cage armor*



maggiori della miscela autocompattante.

L'esecuzione ha inizio con la realizzazione dello scavo del palo mediante infissione di una coclea ad elica continua, costituita da un piatto in acciaio a forma elicoidale che si avvolge intorno ad un'asta cava centrale (Fig. 126). L'estremità presenta una chiusura, per impedire l'ingresso nel cavo centrale del terreno, ed è dotata dei denti, per rendere più agevole la perforazione. Raggiunta la profondità desiderata, il terreno rimane tra le spire dell'elica e si comanda l'apertura dell'asta centrale per eseguire il getto del calcestruzzo, che avviene in maniera continua (Fig. 127). Contemporaneamente la trivella perforatrice viene sollevata gradualmente verso l'alto e libera il terreno estratto. Il calcestruzzo riempie il cavo lentamente e questa fase è controllata contestualmente all'estrazione della trivella, verificando dalla cabina di manovra della perforatrice il regime delle pressioni, mediante monitoraggio con strumentazione elettronica. A getto compiuto, è possibile inserire la gabbia di armature preassemblata, che, sollevata da una gru o dall'argano della stessa trivella, può essere agevolmente infissa nel getto già

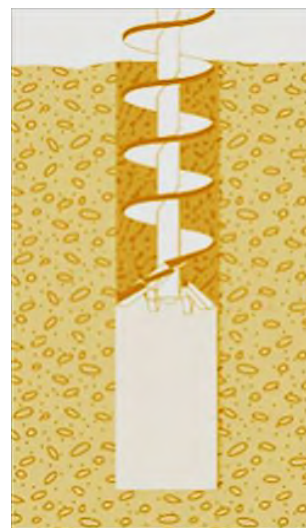




Fig. 127 Estrazione del terreno nella realizzazione dei pali a elica continua / Soil extraction in the construction of Continuous Flight Auger piles



Fig. 128 Infissione armatura in un palo a elica continua / Armor infixion in a Continuous Flight Auger pile

Fig. 129 Pali a elica continua con SCC nel cantiere dell'Alta Velocità tratta di Roma / Continuous Flight Auger piles with SCC in the building site of Alta Velocità in Rome



realizzato, stante le sue eccezionali caratteristiche di massima lavorabilità, sia che si tratti di una miscela autocompattante, sia di un composto con consistenza superfluida (Figg.128).

La possibilità di esecuzione in terreni di qualsiasi natura, anche di scarsa resistenza, o in presenza di acqua di falda, allarga l'orizzonte applicativo anche al costruito, in cui i tempi di gestione dei cantieri, spesso, sono lunghissimi.

Questa tecnologia evita la decompressione del terreno a trivellazione avvenuta e vanifica l'impiego sia di opere di sostegno, che di fanghi bentonitici, oltre a velocizzare l'esecuzione dei pali, nella misura in cui cresce la produzione giornaliera, a fronte di un'economia senza precedenti. A questi vantaggi si aggiungono nei centri urbani o densamente edificati la riduzione delle perturbazioni indotte alle strutture degli edifici preesistenti, per effetto dell'assenza di vibrazione, e la riduzione delle emissioni acustiche nell'ambiente per la silenziosità dell'intervento in fase di getto. Inoltre, l'operazione è più sostenibile per quanto riguarda la gestione dei materiali di risulta, essendo il volume di terreno asportato decisamente minore.

Le prime applicazioni di questa soluzione tecnologica si relazionano all'esecuzione di pali nell'ambito dei lavori della linea ferroviaria ad Alta Velocità tratta Milano-Bologna nel 2001, all'esecuzione di pali di grande diametro nell'ambito dei lavori della linea ferroviaria ad Alta Velocità tratta Roma-Napoli nel 2005 (Fig. 129) e ancora ai lavori di consolidamento e rafforzamento della banchina di levante del Molo Pisacane nel Porto di Napoli nel 2005. Oggi non si contano più le esecuzioni delle numerosissime paratie nelle realizzazioni degli scavi delle metropolitane nelle grandi città, in cui la tecnologia del palo ad elica continua coniuga velocità di realizzazione e qualità delle miscele.

CAPITOLO QUARTO

PERFORMANCE IN PROGRESS

Il fatto di poter creare pietre fuse, di qualunque forma, superiori alle naturali poiché capaci di resistere a tensione, ha in sé qualche cosa di magico [...]

Con tale materiale i campi della fantasia costruttiva vengono allargati quasi senza limiti, e non è molto soddisfacente il constatare come, per ora, queste possibilità siano state poco esplorate e sfruttate. [...]

Si può affermare che l'architettura del cemento armato è assolutamente ai suoi inizi per quanto il sistema sia in uso da oltre cinquanta anni.

Pier Luigi Nervi

4.1 Un'aspirazione all'eternità o alla performance?

L'innovazione determina una partecipazione del traguardo raggiunto, vissuto con tale entusiasmo e coinvolgimento da lasciar supporre che il tempo si fermi e che sia "per sempre".

Fin dal principio il calcestruzzo si inserisce nella scena del costruire come una scoperta epocale, destinata a creare una svolta senza precedenti, ma appare, al contempo, per l'intrinseca eccezionalità, come un traguardo stabile e duraturo destinato a sfidare i secoli. E, anche se all'inizio sembra ambire a condizioni di eternità, e ancora oggi in una percezione generalmente condivisa incarna un obiettivo stabile nel tempo, tende, di contro, a dimostrare tacitamente di essere costantemente aperto all'innovazione, sempre più orientata al progetto delle prestazioni.

Le infinite libertà formali, che la "nuova pietra artificiale" dispensa a dispetto di altre tecnologie, liberano dai vincoli anche la struttura e ne riscrivono i principi regolatori. La possibilità di assumere le forme più varie, con getto in

The concrete seems to aspire to eternity conditions in relation to the traditional technological system and the applications. Nevertheless, since 1800 it has opened up to innovation for reaching better performance. The ecological concretes are obtained with the addition of fly ash and silica fume because they are an industrial waste consisting of micrometer-size particles, such as those of the cement. In the second half of the twentieth century, these mineral additives have given the concrete a significant fluidity, to the benefit of the workability of the jet. In the end of the century, mineral additives have made self compacting concrete (SCC). It means that concrete is able to settle in the formwork without vibration, only thanks to the force of gravity.

Also synthetic micrometer-sized fibers give the concrete a uniformly distributed reinforcement.

Pier Luigi Nervi, Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato, Edizioni della bussola, Roma, 1945, pp.77-78.

The polymeric fibers represent the new fiber-generation and they give fiber reinforced concrete (FRC) a prevention from cracking, but also a better durability in relation to an increase in mechanical properties, toughness and ductility.

Finally, there is a smaller scale with unparalleled performance: the nanometer-size, which is based on titanium dioxide nanoparticles and carbon nanotubes.

The first interaction allows you to concretely access smart materials, giving the concrete self cleaning and anti-pollution effect.

On second thoughts, the concretes reinforced by carbon nanotubes (CNTSCC) are stronger and more tenacious. They are used for applications where a great structural resistance is required.

The most singular fiber-reinforced is the optical fiber, in glass or plastic. This gives life to translucent concrete or Light Transmitting Concrete (LiTraCon), a new concrete capable of showing shadows and shapes on the opposite face. The cement matrix is made from an ordinary or self compacting concrete in which we add the optical fiber. The optical fiber has a percentage equal to 4-5%, with diameters ranging from 30 to 100 micrometers for glass and from 0.5 to 2.5 mm for plastic ones. The mechanical action is that of the common fiber-reinforced concrete, with significant increases in tensile strength.

Concrete becomes an intelligent material if active nanoparticles of titanium dioxide appear in its matrix. In fact, the nanoparticles of titanium dioxide trigger a self cleaning and anti-polluting effect with light.

Another type of concrete, born in the seventies of the twentieth century, is the Lightweight Structural concrete. This borns thanks to the introduction on the market of a new artificial inert: the expanded clay, characterized by superior mechanical performances and from a very careful and controllable production which it constitutes a guarantee of quality.

Many other innovations are on the horizon according to a more and more performing technology.

casseforme opportunamente predisposte, garantisce, attraverso membrature perfettamente solidali tra loro, una monoliticità strutturale in cui tensioni e sforzi si trasmettono con continuità da un elemento strutturale all'altro.

Intanto, la tensione che alimenta la ricerca, in un crescendo sempre più incalzante, continua a rincorrere traguardi di maggiore performance.

In tutto il mondo le opere di Pierluigi Nervi suonano quasi come un riconoscimento all'innovazione e, nel contempo, in quanto sperimentazioni sul campo, materializzano la filosofia di Nervi, in cui le sottili relazioni tra ingegneria e forma architettonica trovano convergenza e si fondono, senza soluzione di continuità, in nuovi e grandiosi schemi strutturali ed eccezionali architetture.

E mentre si consolida una nuova dimensione strutturale, la ricerca avanza con un crescendo inarrestabile. Si succedono nella prima metà del Novecento gli studi sui primi additivi fluidificanti, in quanto riduttori di acqua, e nella seconda metà del Novecento gli studi sulle aggiunte minerali, che agiscono migliorando la lavorabilità allo stato fresco e la resistenza meccanica allo stato indurito. Ma è proprio con l'introduzione dei filler, calcarei o pozzolanici, che il calcestruzzo insegue livelli prestazionali ancor più elevati, inaugurando un approccio mirato all'ottimizzazione del meccanismo su cui si fonda la durabilità del cosiddetto *calcis structio* dei romani. La storia ritorna e fa scuola. E la lezione dei romani appare in tutta la sua gigantesca innovatività, in cui il ruolo della sabbia pozzolanica struttura legami idraulici. Ma anche i Greci utilizzarono la cenere vulcanica dell'isola di Santorini per conferire idraulicità alle miscele. Il passato ritorna con una nuova veste e ritorna anche il termine *concretum*, da cui discende l'elegante vocabolo inglese *concrete*, all'insegna di una continuità etimologica che va ben oltre la semplice

curiosità storica. Oggi, le pozzolane artificiali riappaiono in forma di rifiuti provenienti dall'industria e, dando luogo ai calcestruzzi cosiddetti *ecologici*, trasformano un materiale insostenibile per antonomasia in ecologico, secondo una logica di sostenibilità, sia pur misurata.

Nel materializzare un principio di industrializzazione gli autocompattanti, oggi, costituiscono il punto di partenza di qualsiasi calcestruzzo "speciale", ancora più avanti per quanto attiene alle prestazioni raggiungibili. La seconda e la terza generazione di autocompattanti sono gli autostagionanti (*self curing concrete*) e gli autocompressi (*self compressing concrete*), cui segue il cosiddetto 3SCC, che vede l'azione combinata dei tre automatismi. Inaugurato nella realizzazione delle lunghe superfici a facciavista esterne e interne del Museo Nazionale di Arte del XXI Secolo, opera romana di Zaha Hadid e Patrik Scumaker, sperimenta il compendio dei tre *self*, che si traduce non soltanto nel massimizzare le performance, sia allo stato fresco che allo stato indurito, ma, nel velocizzare in misura eccezionale le operazioni in cantiere, per dimostrare il raggiungimento di un livello di industrializzazione senza precedenti.

4.2 I calcestruzzi fibrorinforzati

L'ingresso delle fibre nel calcestruzzo accende un meccanismo interattivo tipico del materiale composito, pur essendo il calcestruzzo già intrinsecamente composito, in quanto costituito da uno scheletro litico disperso in una matrice di pasta di cemento idrata. Il materiale fibroso, di varia natura, svolge la funzione di rinforzo nel calcestruzzo, strutturando una combinazione tridimensionale tra due materiali differenti chimicamente, per ottenere proprietà non conseguibili singolarmente da ciascuna delle fasi, né dalla



Fig. 130 Fibre metalliche e polimeriche /
Metallic and polymeric fibers

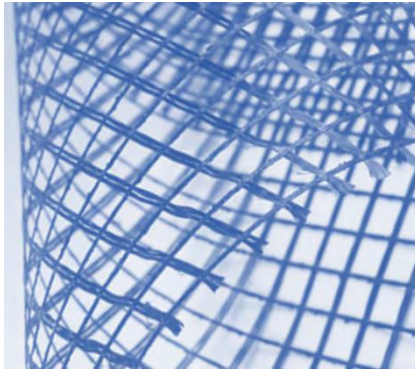


Fig. 131 Rete in fibra di vetro / *Fiberglass
network*

somma delle due fasi, secondo un'azione composita.

Il principio nasce dalla necessità di conferire al calcestruzzo, resistente ma fragile, una maggiore duttilità per contrastare e ridurre il più possibile il comportamento fragile che ne limita notevolmente le prestazioni. Il dato piuttosto rilevante è che, indipendentemente dal tipo di fibra (Figg. 130 e 131), strutturale o antiritiro, la resistenza a trazione per flessione subisce un incremento del 100% circa, passando dai 2-2,5 N/mm² ai 4,5-5 N/mm² (Fig. 132).

E anche se l'idea di armare i conglomerati impiegando le fibre è piuttosto antica, sicuramente è molto recente, dal punto di vista applicativo, la scelta di impiegare le fibre in sostituzione o in aggiunta dell'armatura tradizionale. E questo impiego si relaziona maggiormente alle fibre metalliche, che sono certamente tra le fibre moderne quelle più vecchie, a partire dagli anni Sessanta in poi, dopo l'abbandono delle fibre di amianto. L'impiego delle fibre metalliche, eminentemente di tipo strutturale, è mirato ad ottimizzare le prestazioni meccaniche, ma manifesta fin dall'inizio una riduzione delle fessurazioni da ritiro plastico ed un'azione di cucitura a fessurazione avvenuta. In effetti, l'aumento della duttilità, in quanto capacità del calcestruzzo di deformarsi sotto carico prima di giungere a rottura, è una proprietà fortemente connessa al miglioramento delle prestazioni meccaniche anche in fase post-fessurativa.

Ma è l'interazione con le fibre sintetiche, di dimensioni micrometriche, che consente di dotare il calcestruzzo di una microarmatura così diffusa da poter finalmente offrire la prima risposta veramente efficace al contenimento del ritiro.

Tra le fibre ausiliarie antifessurative più diffuse sono quelle in polipropilene, costituite da sottili filamenti, leggeri, flessibili, resistenti e chimicamente inerti, economiche e di facile lavorazione, molto valide per l'azione antiritiro. Dopo i

progressi compiuti nello studio delle catene polimeriche per le fibre, nel 1976, ad opera di Rudolf Enzler, ha inizio un percorso tutto in salita per il calcestruzzo fibrorinforzato. L'effetto è quello di ridurre la formazione di microfessurazioni, garantendo un'eccezionale aderenza tra gli inerti e la matrice cementizia grazie alla loro notevole superficie specifica, parametrabile attraverso il rapporto lunghezza/diametro che indica, quanto più è elevato, che la fibra è "sottile". E sono proprio le piccole dimensioni, di alcuni micron per il diametro, a costituire un rinforzo aggiuntivo, così omogeneamente diffuso all'interno della massa del conglomerato, da accrescere ulteriormente l'interazione tipica del materiale composito.

Tra le prestazioni aggiunte non vi è soltanto un incremento dell'azione antifessurativa, ma anche della durabilità del manufatto, in relazione al potenziamento delle caratteristiche meccaniche, della tenacità e della duttilità. E senza dubbio, le fibre in polipropilene costituiscono la prima efficace soluzione per contrastare il ritiro, ancora oggi punto nevralgico del calcestruzzo. L'azione di contrasto e di contenimento è triplice. Infatti, limitano l'insorgere del ritiro plastico riducendo la formazione di microfessurazioni, in quanto la resistenza a trazione del conglomerato, di poco superiore per effetto delle fibre, riesce a contrastare le sollecitazioni di trazione indotte dal ritiro stesso. Inoltre, la presenza delle fibre svolge un'azione di intercettazione e arresto rispetto al propagarsi della fessura. Infine, a fessurazione avvenuta, riesce a esplicare un'azione di cucitura tra i lembi delle fessure, ripristinando la continuità strutturale (Fig. D).

Oggi si è di fronte ad una pagina di storia che è solo un inizio e prelude all'ascesa dei polimeri che, a tutt'oggi, si affacciano nel campo del costruire come materiali *avanzati*, così proiettati verso il futuro da accendere l'innovazione più

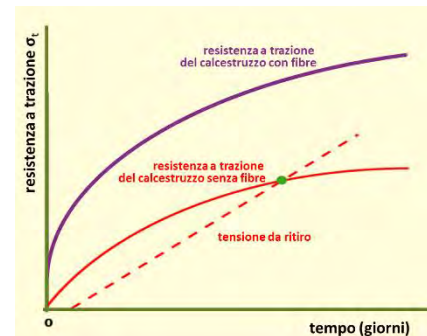


Fig. 132 Incremento di resistenza a trazione per effetto delle fibre / *Tensile strength increase due to the fibers*

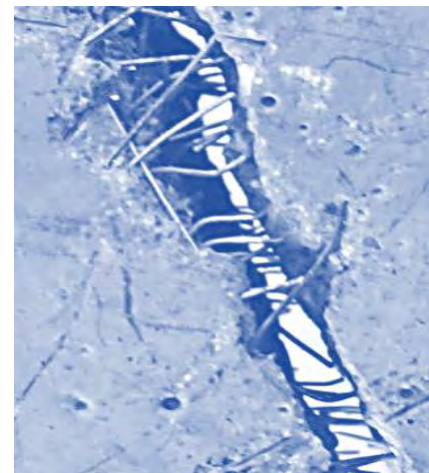


Fig. 133 Azione post fessurativa delle fibre / *Post crack cracking action*

promettente. Si tratta di polimeri ad alta densità, con funzioni sia strutturali che antiritiro, che riescono, in certi casi, a garantire, oltre ai numerosi vantaggi, prestazioni pari o addirittura superiori alle fibre in acciaio e ad essere competitive in termini di costi.

4.3 I calcestruzzi nanorinforzati

L'interazione tra calcestruzzo e rinforzo fibroso si struttura ad una scala ancor più piccola, quella nanometrica, con i nanotubi al carbonio, in un crescendo di prestazioni senza confronti.

Considerando la spinta che la nanotecnologia, conosce nel corso degli anni Ottanta, il calcestruzzo raggiunge livelli di eccellenza per quanto attiene alle prestazionali con l'impiego del rinforzo fibroso più resistente mai realizzato. L'ingegnerizzazione conosce un traguardo senza precedenti, in relazione al progetto della materia, in maniera tanto "nascosta" quanto più eccezionale dal punto di vista performante.

Il ruolo della fibra di rinforzo acquista la massima efficacia possibile e schiude un nuovo orizzonte applicativo in cui i calcestruzzi, che sono di fatto armati alla nanoscala, si orientano verso un comportamento molto più isotropo. Rispetto all'acciaio, i principali fattori che rendono possibile il raggiungimento di questo traguardo sono una resistenza meccanica cento volte superiore ed il peso di almeno sei volte più piccolo, che insieme alle dimensioni estremamente ridotte rendono possibile una dispersione molto uniforme nella massa della miscela.

I nanotubi al carbonio sono costituiti da un foglio di carbonio a struttura cristallina, arrotolato in modo da assumere la forma di un cilindro. Più nanotubi a parete

singola, ordinati in strutture concentriche, individuano la tipologia a parete multipla, che in tal modo acquista una superficie di interfaccia molto maggiore (Fig. 134).

La lunghezza, se pur inferiore al millimetro, è rilevante rispetto alla dimensione del diametro, variabile da 0,5 ai 10-20 nanometri. Ne consegue un considerevole rapporto lunghezza-diametro che permette di considerare i nanotubi come una fibra monodimensionale, anche se mille volte più piccola. A questa caratteristica, fondamentale sotto il profilo della funzione di microarmatura, si aggiungono l'elevata resistenza alla trazione e l'alta flessibilità.

I calcestruzzi che si avvalgono di questo nanorinforzo sono eccezionalmente resistenti e tenaci, rispetto a quelli semplicemente fibrorinforzati, e si relazionano, pertanto, ad applicazioni di notevole impegno strutturale. L'incremento di resistenza a trazione, in misura ancora maggiore rispetto alle altre fibre (6-7 N/mm²), garantisce non soltanto una riduzione del rischio di fessurazione, ma anche un eccezionale comportamento *post-cracking*, allorché la fessurazione è innescata, attraverso azioni di cucitura particolarmente efficaci per l'elevata aderenza tra nanofibre e matrice cementizia.

L'attenzione della ricerca sui materiali compositi cementizi con nanotubi al carbonio ha già superato la fase della semplice sperimentazione. Pertanto, entra in interazione con i calcestruzzi autocompattanti. E in quanto materiale composito, il *carbon nanotubes self compacting concrete* (CNSCC) presenta dei vantaggi che vanno ben oltre la semplice sommatoria. In tal modo, ai vantaggi in fase di posa in opera degli autocompattanti, si sommano gli incrementi di resistenza, tenacità e duttilità dovuti al nanorinforzo, in un comune traguardo di rafforzamento della durabilità.

Si delinea un principio nuovo che sancisce il futuro del calcestruzzo come materiale composito, in cui

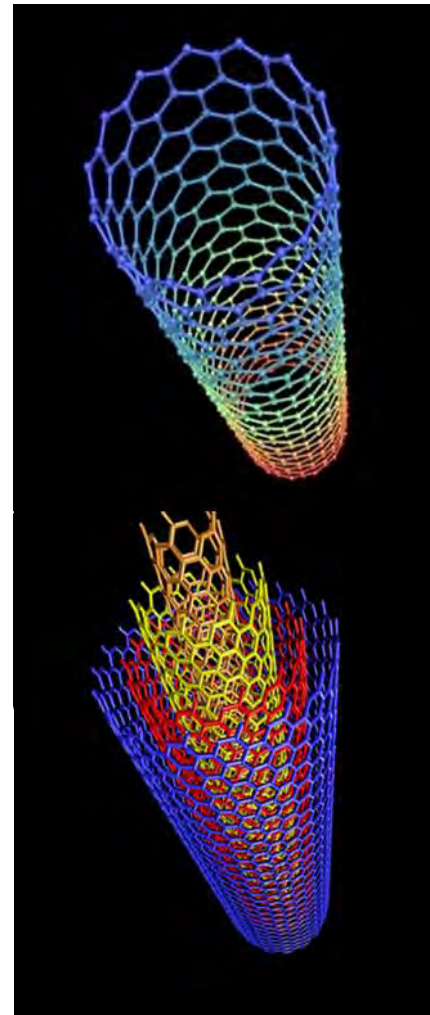


Fig. 134 Nanotubi al carbonio a parete singola e multipla / *Single and multiple wall carbon nanotubes*

l'autocompattabilità è una proprietà reologica che fa da minimo comun denominatore rispetto ad altre specificità della miscela, che scaturiscono da altri meccanismi interattivi. L'autocompattante, dunque, è un calcestruzzo di base che guadagna, in relazione alla seconda fase, ulteriori valori aggiunti.

Per i calcestruzzi nanorinforzati, doppiamente innovativi, l'aumento della resistenza a trazione per flessione, alquanto prevedibile, è un dato percentualmente piuttosto rilevante, che tende a superare significativamente l'incremento del 100%. Ma quello che è più sorprendente è che si raggiungano valori molto elevati di resistenza a compressione, non solo a stagionatura avvenuta, ma fin dai primi giorni di maturazione.

Per quanto attiene alla duttilità, che si estrinseca nella capacità di dissipare energia, i *carbon nanotubes self compacting concrete* raggiungono valori di eccellenza rispetto ai calcestruzzi con tradizionali rinforzi fibrosi. Inoltre, l'incremento di duttilità prevale nella fase iniziale della stagionatura e all'aumentare del tempo si prefigurano le condizioni di un comportamento più fragile proprio del calcestruzzo. Il sensibile incremento di resistenza a compressione prefigura dunque un calcestruzzo ad alte prestazioni, mentre l'aumento di duttilità apre la strada ad applicazioni di grande impegno strutturale, per le notevoli potenzialità in risposta alle sollecitazioni sismiche. La scelta del *self compacting concrete* consente di realizzare strutture con geometrie complesse, difficili da armare, oppure con alte percentuali di armatura, mentre l'aggiunta delle fibre di rinforzo, da immettere in parziale o totale sostituzione dell'armatura secondaria, determina capacità di resistenza molto elevate alle sollecitazioni composte. Eppure nella corsa verso prestazioni sempre più sorprendenti si profilano altri obiettivi, sfruttando la capacità dei nanotubi al carbonio di

essere conduttori di elettricità. Infatti, la loro presenza può far guadagnare ai calcestruzzi delle opere infrastrutturali anche un comportamento “attivo”, rendendole capaci di disgelarsi autonomamente. Ed è la chiralità, cioè il diverso orientamento degli esagoni costituenti il foglio di carbonio, a diversificare la conduttività del nanotubo al carbonio, facendo variare il comportamento da conduttore a semiconduttore.

4.4 I calcestruzzi traslucidi

La fibra ottica, in vetro o in materiale plastico, è certamente il fibrorinforzo più singolare, che, nell’interazione con un conglomerato ordinario, dà origine al calcestruzzo traslucido e, nel 2001, segna un altro passo evolutivo nella storia dei calcestruzzi di nuova generazione. La massa impenetrabile e pesante del calcestruzzo è scalfita della luce, che riesce a far intravedere ombre e sagome sulla faccia opposta (Fig. 135).

La matrice cementizia è costituita da un calcestruzzo ordinario, oppure da una miscela innovativa, e cioè di maggiore lavorabilità, in cui è presente la fibra ottica, fibra lunga, di tipo continuo, cioè caratterizzata da una dispersione ordinata. La quantità di fibre ottiche è dell’ordine del 4-5% per metro cubo, con diametri variabili dai 30 ai 100 micrometri per quelle in vetro e dagli 0,5 ai 2,5 mm per quelle in plastica. La migrazione dal campo delle comunicazioni, in cui appaiono negli anni Sessanta del Novecento, a quello dell’edilizia apre nuovi spiragli di luce, dopo circa quarant’anni, per le potenzialità ottiche che aggiunge.

L’azione meccanica è quella del comune calcestruzzo fibrorinforzato, con significativi incrementi di resistenze a trazione (7 N/mm^2), per effetto dell’azione delle fibre. Ad esso



Fig. 135 Blocchetti di calcestruzzo traslucido /
Blocks of translucent concrete

Fig. 136 Il padiglione italiano all'Expo di Shanghai / *The Italian Pavilion at the Shanghai Expo*



si aggiunge l'effetto di elevata suggestione, la traslucenza, che lascia proiettare soltanto i contorni sfumati degli oggetti posti dalla parte opposta, anche se le fibre in plastica trasmettono un po' meglio anche i colori. E, dopo le applicazioni nel campo del design con lampade e oggetti di arredamento, il calcestruzzo incontra una nuova valenza estetica nel campo del costruire.

Il concetto di solidità, tradizionalmente interpretato matericamente attraverso l'opacità e la pesantezza, viene contraddetto dalla luce che guadagna una propria penetrabilità, senza limitare il meccanismo strutturale. I concetti di eternità e di stabilità, che la vecchia pietra artificiale aveva ereditato da quella naturale, sono aggiornati e riveduti attraverso un nuovo equilibrio tra materia e trasparenza. Le potenzialità da spendere in campo architettonico sono immisurabili.

Conduttore della luce, sia naturale che artificiale, indipendentemente dallo spessore, il calcestruzzo traslucido, ovvero *Light Transmitting Concrete*, da cui l'acronimo LiTraCon, è un conglomerato cementizio di elevate prestazioni meccaniche, capace di illuminare di giorno gli spazi interni e di notte l'ambiente esterno, con caratterizzazioni spaziali nuove e suggestive.

Brevettato contemporaneamente da due architetti, l'ungherese Aron Losonczi e il texano Bill Price nel 2001, dopo anni dedicati alla definizione di questo singolare connubio tra pietra e luce, il calcestruzzo traslucido accede al campo dell'architettura con la materializzazione del padiglione italiano all'Expo di Shanghai del 2010 (Figg. 136 e 137).

Un'architettura definita da un vaso spaziale compatto, attraverso superfici irregolari opache, traslucide e trasparenti, declina il tema della complessità delle città italiane, in maniera innovativa.

La promessa di cambiamento che annuncia quest'opera dell'architetto italiano Giampaolo Imbrighi è fondata sull'impiego di una miscela cementizia, molto additivata, in modo da presentarsi particolarmente fluida, e doppiamente fibrorinforzata, mediante fibre in acciaio e in polipropilene, in relazione alla risposta strutturale e all'azione antiritiro. Con questa composizione, estremamente innovativa, da materiale composito, sono stati prodotti quattromila pannelli di dimensioni 100 x 50 centimetri e spessore 5 centimetri, con due diversi gradi di traslucenza, rispetto ai pannelli opachi, per un totale di duecento tonnellate di calcestruzzo traslucido.

L'attuale produzione, dopo pochi anni dalla realizzazione del padiglione di Shanghai, è riuscita a guadagnare uno spessore di 2.5 centimetri, che, riducendo di metà anche il peso totale di ciascun pannello, rende possibile un maggior numero di applicazioni, anche con tecnologie a secco per quanto riguarda il montaggio (Fig. 138).

La produzione, fin dall'inizio del brevetto, si è attestata su blocchetti prefabbricati parallelepipedi di dimensioni diverse e continua in questa direzione, anche se le aspettative tecnologiche sono ancora tante.

La ricerca di una varietà formale si arricchisce di ulteriori effetti ottici, per quanto attiene all'intensità della diffusione della luce, fino a sperimentare la produzione di moduli prefabbricati di svariate forme. La possibilità di montaggio con soluzioni a secco delinea un'applicabilità nella realizzazione di elementi di partizione interna, che, per i delicati effetti di luce, possono caratterizzare anche la spazialità interna nel costruito storico.

La ricerca guarda già oltre il traguardo raggiunto e si orienta verso lo studio delle possibilità del getto e di cromatismi anche diversi da quelli propri del cemento.

Fig.137 Il padiglione italiano all'Expo di Shanghai / *The Italian Pavilion at the Shanghai Expo*

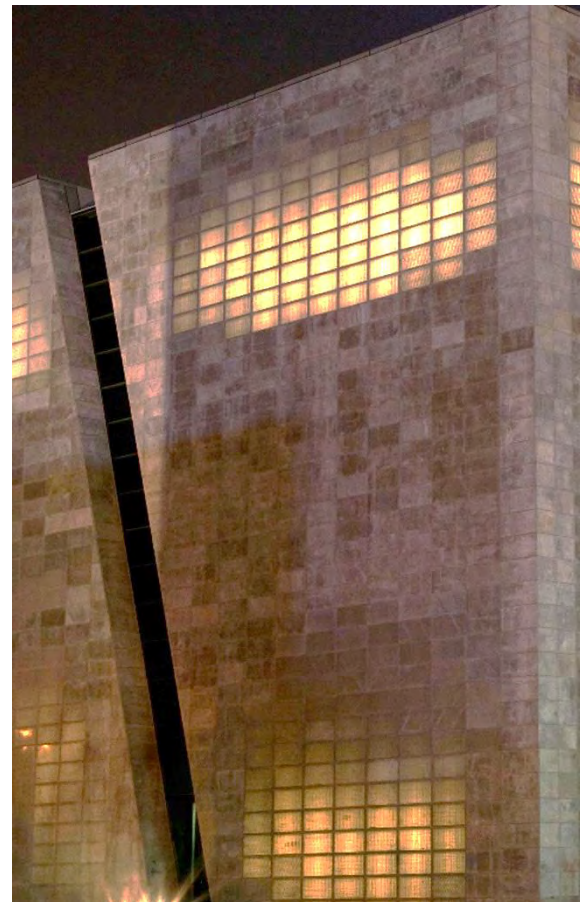




Fig. 138 Pannello del padiglione italiano all'Expo di Shanghai *Panel of the Italian Pavilion at the Shanghai Expo*

Eppure, l'approfondimento tecnologico più futurista guarda al guadagno di una capacità di isolamento termico, che non limiti la traslucenza. Infatti, è allo studio una soluzione di modulo stratificato con calcestruzzo traslucido sulle due facce esterne, tra le quali è interposto un materiale isolante, come l'aria, il polistirene o l'aerogel, in modo da garantire la conduzione della luce.

4.5 I calcestruzzi autopulenti e antinquinanti

Nell'interazione con le nanoparticelle attive di biossido di titanio, il calcestruzzo guadagna l'accesso al dominio dei materiali intelligenti.

La chiesa di Roma, progettata da R. Meier nel 1996 e realizzata nel 2003, si è posta come applicazione emblematica di un nuovo calcestruzzo, in cui quantità infinitesime di nanoparticelle di biossido di titanio presenti nel cemento innescano meccanismi fotoattivi, conferendogli l'effetto autopulente e antinquinante (Figg. 139 e 140). In quest'opera, la scelta del bianco da semplice scelta linguistica diviene una richiesta all'innovazione tecnologica di rigenerare il progetto del calcestruzzo alla scala nanometrica. In tal modo, il calcestruzzo accede, nel contempo, sia tra i materiali intelligenti che tra quelli sostenibili.

Infatti, innovativi sono soprattutto gli effetti autopulente e antinquinante, ottenuti con l'azione di nanoparticelle di biossido di titanio presenti nel cemento. Quantità infinitesime di questo semiconduttore, per effetto dell'assorbimento di energia luminosa, innescano reazioni fotochimiche, partendo da cristalli nanometrici che si comportano come particelle fotoattive dell'ordine del micron, cioè amplificate di mille volte. Di dimensioni variabili dai 5 ai 30 nanometri, si aggiunge nel cemento con percentuali del 5-10%.

La paternità si deve al chimico giapponese Akira Fujishima dell'Università di Tokyo, che, nel 1967, scopre le proprietà autopulenti del biossido di titanio. Ma soltanto dopo almeno venti anni di studi sulla fotocatalisi, le sperimentazioni si concentrano sull'impiego del pigmento nanometrico nella polvere di cemento. Ne consegue che i calcestruzzi e tutti i rivestimenti cementizi, pitture e intonaci contenenti queste nanoparticelle, pur conservando un aspetto stabile nel tempo, assumono un comportamento attivo in termini prestazionali, guadagnando l'attributo "intelligente". Seguono applicazioni per rendere autopulenti e antinquinanti anche prodotti industriali, quali pannelli di facciata prefabbricati e pavimentazioni a base cementizia per esterni e per interni. E l'essere intelligente non allude al prodigio, quanto alla proprietà di offrire prestazioni diverse nel tempo.

Per quanto attiene alla capacità di essere autopulente della superficie irradiata dalla luce, l'azione fotochimica indotta dal fotocatalizzatore si traduce nella modificazione alla scala nanometrica della "rugosità" della superficie stessa. La formazione di un sottile film di biossido di titanio è responsabile di una trasformazione con cui la superficie raggiunge condizioni di super-idrofilicità, che hanno inizio dopo trenta minuti di esposizione alla luce e terminano dopo circa due ore. Con la cessazione dell'irraggiamento si ripristinano gradualmente le condizioni di super-idrofobicità. In effetti, questa pellicola è come un reticolo a scacchiera di 60-80 nanometri di lato, formato da quadrati alternativamente idrofili e idrofobi. Ancora una volta, si imita la natura recependo a pieno la logica di Leonardo, secondo il quale "inventare non significa infatti altro che saper riprodurre". Infatti la capacità di "autopulizia" viene denominata "effetto loto", in relazione al comportamento



Figg. 139 e 140 La chiesa di R. Meier a Roma /
The Church by R. Meier in Rome, 2003

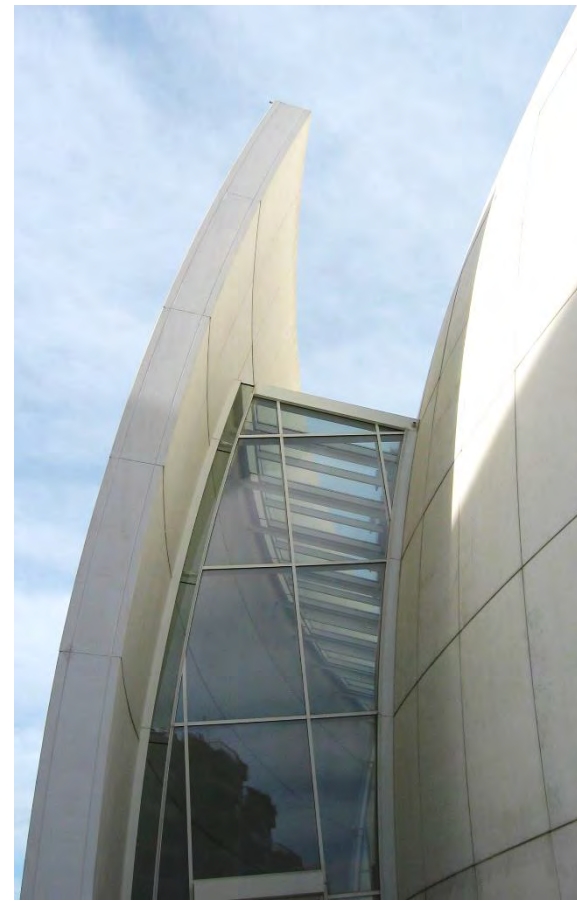




Fig. 141 Piante e fiori di loto *Lotus plants and flowers*



Fig. 142 e 143 Gocce d'acqua sulla foglia di loto e ingrandimento delle setole / *Water drops on lotus leaf and bristles enlargement*



naturale delle foglie di questa pianta che, immerse in acque fangose, si presentano sempre lucide e pulite (Fig. 141). Il meccanismo fotoindotto spontaneamente dalla luce solare si basa sulla presenza di nanoparticelle naturali sporgenti, che definiscono la superficie della foglia e impediscono alle gocce d'acqua di distendersi. La goccia rimane a rilievo e poggia soltanto sulle minutissime setole (Figg. 142 e 143), poi scorre sulla foglia trascinando con sé polveri e insetti, che in tal modo vengono naturalmente rimossi. La superficie delle foglie di loto, che è superidrofoba, funge da vari anni da modello per sperimentare il comportamento del biossido di titanio.

Numerosi sono state le realizzazioni in Francia, a cominciare dalla Cité de la Musique et des Beaux Arts a Chambéry nel 2001 (Fig. 144).

A questo effetto si somma un altro processo fotochimico che non si limita a rimuovere lo smog, ma riesce a ridurlo, evitandone l'accumulo e la proliferazione. In effetti, il biossido di titanio induce una reazione fotochimica che si estrinseca in un forte processo ossidativo. Si favorisce una più rapida decomposizione di sostanze organiche e inorganiche nocive in composti assolutamente innocui, in quanto il biossido di titanio si comporta come un acceleratore dei processi di ossidazione che esistono in natura. Monossidi e biossidi di azoto e composti organici volatili reagiscono con il pigmento fotoattivo e si trasformano in acido nitrico che la pioggia allontana. Quest'ultimo raggiunge il sottosuolo in cui agisce da fertilizzante oppure continua a reagire per formare sostanze stabili ed innocue, quali sali e calcari. Questi prodotti fotoindotti, di ridottissime dimensioni e misurabili in poche parti per milione, non soltanto non sono nocivi, ma sono già presenti in natura anche nelle acque minerali. Il vento e il movimento dell'aria influiscono favorevolmente sulla fotocatalisi, nella misura in cui le sostanze inquinanti sono

sospinte sulla superficie fotoattiva per essere decomposte.

Entrambi i comportamenti sono la trasposizione di processi naturali che anche la luce artificiale, mediante sorgenti luminose a radiazione UV può attivare fino a decomporre agenti inquinanti, batteri, funghi, muffe, microrganismi e gas tossici.

Enormi sono le potenzialità offerte da questi calcestruzzi nelle città e nei piccoli centri, con elevate possibilità di combattere problemi legati all'inquinamento ambientale e al degrado di edifici, opere infrastrutturali e monumenti, coinvolgendo tutte le superfici intercettate dalla luce, pavimentazioni comprese, in un meccanismo di partecipazione *smart*. E dopo tante opere internazionali, di cui molte francesi, il padiglione Italia dell'Expo 2015 (Figg. 145, 146, 147 e 148) si pone come un'altra pietra miliare, con i suoi 750 pannelli tra piani e curvi, tutti diversi l'uno dall'altro, realizzati impiegando circa l'80% di aggregati riciclati, in parte provenienti dagli sfridi di lavorazione delle cave di marmo bianco di Carrara, con una miscela tre volte più fluida, che aggiunge l'attributo dinamico alla componente *bio* del calcestruzzo con cemento fotoattivo.

Il futuro riserva, a breve, un altro eccezionale traguardo, consistente nell'interazione con un biossido di titanio, modificato al plasma, attivabile con luce naturale, all'insegna di reazioni fotocatalitiche ancor più spinte.

4.6 I calcestruzzi leggeri strutturali autocompattanti

Il calcestruzzo leggero strutturale si affaccia nel campo dell'edilizia negli anni Settanta del Novecento, quando appare sul mercato un nuovo inerte artificiale, l'argilla espansa. Quella destinata a scopi strutturali è caratterizzata da prestazioni meccaniche superiori e segue un processo



Fig. 144 La Cité de la Musique et des Beaux Arts a Chambéry / The City of Music and Fine Arts in Chambéry, 2001



Fig. 145 Il padiglione Italia all'Expo 2015 / *The Italian Pavilion at the Expo of 2015*

produttivo molto rigido e controllabile, che costituisce garanzia di qualità costante.

Sin dall'inizio il calcestruzzo leggero strutturale (*Lightweigh Structural Concrete*) si pone come alternativa rispetto a quello ordinario. In questa tipologia di conglomerati, l'innovazione guarda alla soluzione dei problemi in fase di getto e, nel contempo, aspira ad una miscela autocompattante, proiettando questa sinergia nella direzione della sostenibilità ambientale.

Generalmente, l'argilla espansa, come aggregato grosso, va integrata con un quantitativo di sabbia naturale, come

inerte fino, allo scopo di controllare la lavorabilità, la compattezza e la resistenza meccanica. Inoltre, la granulometria e la qualità della sabbia, con la loro varianza, condizionano sia le proprietà del calcestruzzo allo stato fresco, per quanto attiene alla consistenza e alla stabilità della miscela, sia le prestazioni allo stato indurito.

Il controllo della lavorabilità e della stabilità si relaziona al rischio del verificarsi del cosiddetto fenomeno di segregazione inversa dell'argilla espansa, che nelle miscele più fluide tende a "galleggiare" rispetto alla sabbia. In generale, il fenomeno della segregazione è legato alla differenza tra la densità della pasta cementizia e quella dell'aggregato, con la differenza che l'inerte naturale è più pesante, mentre l'argilla espansa è più leggera.

E se è vero che l'industrializzazione dei conglomerati persegue il fine della qualità, la ricerca più recente si è posta l'obiettivo di impiegare soltanto l'argilla espansa, come inerte artificiale di qualità costante, ed evitare lo sfruttamento delle cave di sabbia naturale. L'obiettivo dell'autompattabilità, come massimo requisito di lavorabilità allo stato fresco, tende ancora una volta a porsi come requisito di base nei calcestruzzi speciali, essendo così deformabile da riempire i casseri soltanto sotto l'azione del solo peso proprio.

La scelta di non impiegare inerti naturali, pur essendo sostenibile per l'ambiente, determina il verificarsi della segregazione inversa. E per essere perseguibile richiede l'impiego di additivi mirati ad esercitare un'azione stabilizzante all'interno della miscela. Pertanto, oltre al superfluidificante e al modificatore di viscosità si introduce un agente aerante, che genera la formazione di una microporosità all'interno della miscela. In tal modo, da un lato si riesce a compensare, almeno in parte, all'assenza della sabbia, ma di conseguenza si ottiene una riduzione della

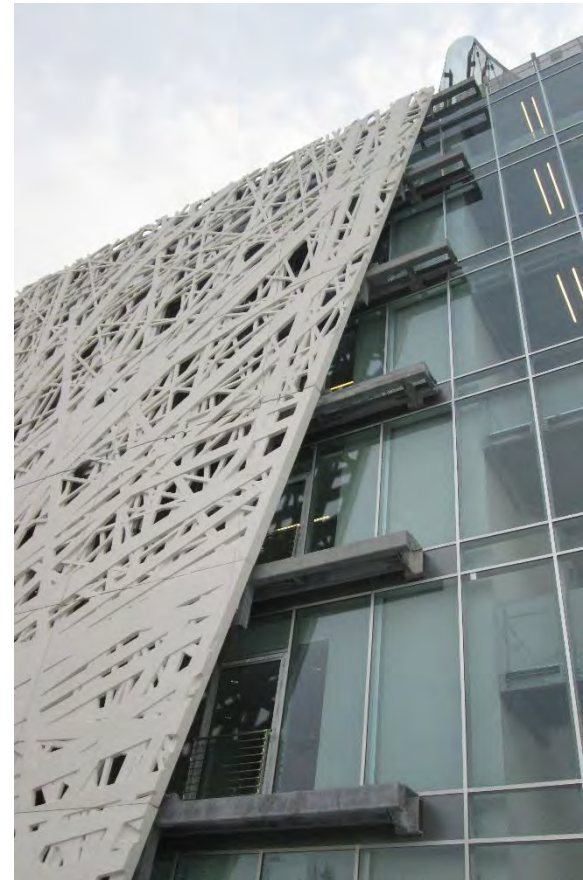


Fig. 146 Il padiglione Italia all'Expo 2015 / *The Italian Pavilion at the Expo of 2015*



Fig. 147 Sottostruttura di fissaggio dei pannelli
/ Substructure for fixing the panels

densità della pasta cementizia, in modo da renderla più confrontabile con quella dell'argilla espansa ed evitare la segregazione inversa. Si tratta di un vero e proprio progetto della stabilità della miscela. Inoltre, la formazione di alveoli d'aria agisce da stabilizzante, in quanto riesce ad aumentare la viscosità della miscela, a tutto vantaggio del controllo del rischio di segregazione inversa e di garanzia dell'autocompattabilità.

Questi presupposti sovrintendono la composizione del *Self Compacting Concrete Lightweight Structural (LSSCC)* rispetto a quella del *Lightweight Structural Concrete (LS)*. Altre differenze nella definizione del mix design sono la presenza di un filler, che, pur avendo una densità maggiore, sia della pasta che dell'argilla espansa, non destabilizza la miscela essendo di dimensioni micrometriche.

Uno dei parametri di maggiore debolezza della composizione è il dosaggio di cemento alquanto elevato, cui si potrebbe ovviare scegliendo un filler pozzolanico e dosandone il quantitativo in relazione alla riduzione del peso di cemento. E questo è il prossimo step che la ricerca si è prefissa.

Per quanto riguarda le caratteristiche allo stato fresco, in generale, questo calcestruzzo si presenta come un comune autocompattante, la cui stabilità è impostata su valori di densità dell'argilla espansa satura d'acqua, che sono confrontabili con quelli della pasta cementizia additivata. I risultati della resistenza meccanica a compressione rilevano un abbassamento prevedibile abbastanza contenuto, valutabile al massimo intorno al 5 % e controllato dal basso rapporto acqua/cemento. A questi risultati confortanti si aggiungono migliori caratteristiche termoisolanti che, insieme al mancato depauperamento delle cave di sabbia naturale, contribuiscono ad uno sviluppo sostenibile.

Questa tipologia di calcestruzzi, in conclusione, possiede

un maggiore livello di industrializzazione rispetto agli altri conglomerati speciali perché i componenti sono tutti prodotti “industriali”, che, soggetti a rigorosi controlli di produzione, garantiscono una qualità costante.

4.7 Futuri scenari di sostenibilità

Scandendo ritmi sempre più accelerati con cui si potenzia il progetto delle prestazioni, il calcestruzzo continua a rigenerarsi costantemente. E si riscopre sempre attuale e innovativo nel senso più profondo del termine, secondo una dimensione “nascosta” che rifugge la percezione, ma sostanzia comportamenti sempre più performanti.

Innovativo è l’impiego di pigmenti inorganici in polvere, ossidi di ferro da aggiungere nei filler per colorare in pasta le miscele autocompattanti. All’azione fisica che esercitano corrisponde un aumento della coesione che rende possibile la riduzione della quantità di aggiunte minerali.

E nella logica della progressiva e generalizzata sensibilizzazione verso le problematiche ambientali, il calcestruzzo riesce anche a guadagnare dinamismi non percepibili nella sfera del visibile che ne connotano l’intelligenza e le elevatissime prestazioni, aprendo lo sguardo verso la sostenibilità. E su questa scia già si schiudono nuovi orizzonti con l’intento di limitare il consumo di risorse naturali e valorizzare l’impiego della “materia prima seconda”. Infatti, come aggiunta minerale è anche impiegata la cenere da biomassa, proveniente dalla combustione di fanghi di cartiera che, in quanto sottoprodotti della produzione della carta, contengono minerali, sali inorganici e anche piccole fibre di cellulosa. Anche la polvere di scarto in vetroresina, costituita da fibra di vetro e matrice polimerica in resina poliesteri, può essere impiegata come filler nella produzione del calcestruzzo



Fig. 148 Sottostruttura di fissaggio dei pannelli
/ Substructure for fixing the panels

autocompattante, con lieve diminuzione della resistenza meccanica a compressione e, di contro, una incoraggiante riduzione della deformazione da ritiro.

Un'altra potenzialità nella produzione sostenibile del calcestruzzo è il riciclo dell'acqua di lavaggio delle autobetoniere, in sostituzione di quella potabile.

Segue l'impiego di aggregati di riciclo provenienti o da rifiuti di costruzione e demolizione oppure da solo calcestruzzo riciclato, in grado di sostituire parzialmente o totalmente l'uso di inerti naturali, materie prime non rinnovabili, secondo una duplice logica di risparmio energetico e di controllo della produzione dei rifiuti edili.

La produzione di materia prima seconda guarda anche al riciclo di pneumatici, da cui si producono inerti artificiali che, in parziale sostituzione di inerti ordinari, consentono la realizzazione di un singolare conglomerato, il cosiddetto "*rubbercrete*". E ancora al riciclo delle plastiche, da cui, mediante processi di triturazione delle bottiglie di plastica riciclate, si producono inerti leggeri per il confezionamento di calcestruzzi alleggeriti strutturali e non strutturali. E ancora al riciclo di scarti dell'industria delle ceramiche e dei laterizi, che determinano un effetto viscosizzante in fase di getto delle miscele autocompattanti. E ancora il cemento con il batterio *Bacillus* che si autorigenera ... La strada è ancora molto lunga e tutta in salita.

CAPITOLO SECONDO

LA COMPOSIZIONE

Materia prima in tutta la sua inerzia, la tecnica è anzitutto il complesso delle invenzioni schiette, spontanee, libere e disinteressate, nate dal caso o dai laboratori; è poi l'avanzata senza fine verso uno scopo anch'esso illimitato, che trascina le cose verso mete inattese e a volte sconvolgenti. Non esistono invenzioni grandi o piccole, ma soltanto grandi o piccole conseguenze.

*Le Corbusier*¹

2.1 Il principio della composizione

La composizione dei calcestruzzi autocompattanti è ben diversa da quella del calcestruzzo ordinario ed è studiata variando le quantità degli ingredienti costituenti la miscela cementizia.

La differenza principale sta nell'introduzione di materiale finissimo, il cosiddetto filler, che va ad integrare il cemento, senza influenzarne la reazione di idratazione. Diversamente l'aumento di cemento, pur migliorando la lavorabilità allo stato fresco, aggiungerebbe i tipici problemi connessi ai maggiori gradienti termici in fase di idratazione, quali fessurazioni dei getti, attribuibili all'accresciuto sviluppo di calore. Non avendo senso questa scelta, l'inserimento del filler nella composizione risponde all'esigenza di aumentare la quantità delle particelle micrometriche, con l'obiettivo di agevolare l'azione meccanica di scorrimento con cui la miscela viene movimentata. Le dimensioni del filler, ben minori del millimetro, sono infatti abbastanza confrontabili

The composition of self compacting concrete is very different from that of ordinary concrete and it is studied by varying the quantities of the ingredients making up the cement mixture. The real innovation is the addition of the filler in the cement mixture.

From a comparison with an ordinary concrete, the big aggregate undergoes greater variations, which consequently affects the quantity of the fine one. In fact, the volume of big aggregate decreases, while the fine one instead has small increases. The amount of water doesn't increase significantly and it remains proportional to the amount of cement to be hydrated and the aggregates to be wetted, otherwise the workability water is kept as low as possible. In the composition there is a modest increase in the amount of cement that we must read rather in proportion to the greater amount of inert end to be bonded. In addition, there is the inclusion of additives including superplasticizers. If the real news is the use of filler then this

¹ Le Corbusier, *Maniera di pensare l'urbanistica*, (Ed. preced. Universale Laterza, 1965), Ed. Economica Laterza, Bari, 1991, p. 13.

significantly characterizes the compound. In fact, its role is to have a compound that can easily settle in the formwork.

We can find two kind of filler: off or active. The main difference is the chemical structure, as the matter of fact in the pozzolane (with latent hydraulic activity) it determines further reactions and it manages to increase the sliding limit without changing the viscosity in the plastic state. The filler can be for example minced limestone, flying ash, silica smoke, blast furnace slag, micined pozzolana, all products characterized by nothing or slow speed of hydration during the reaction of the cement.

The pozzolanic fillers are recycled materials containing the same minerals present in the natural pozzolan, so we can define them as "ecological materials".

The correct proportion between the transport fluid and the transported phase is obtained through the definition of the quantities of the components and the control of the relationships between these.

The paste, a mixture of water, cement and very fine powders of about 350-380 liters per cubic meter of concrete, is obtained with about 400 kg/m³ of cement, a volume of mixing water between 170 and 210 liters/m³ and a volume of very fine material between 160 and 190 l/m³.

The water/cement ratio is rather low compared to ordinary concrete, although it varies between 0.45 and 0.50. If we decrease the water/cement ratio, we obtain high resistance values, but it is also true that cohesion and plastic viscosity increase.

New is the water/filler ratio that varies between 0.85 and 1.10. If this is higher than the limit value then the mixture is too fluid and it risks segregation, because the size and quantity of the filler raises the amount of wetting water, whereas if the value is below 0.85 the mixture is too viscous to be easily pumped.

We can distinguish three types of SCC according to the different resistance characteristics required.

The first are the Normale self compacting concrete (NSCC) that they identify self compacting concrete to be cast in place where a typical resistance between 25 and 40 N/mm² is required.

The second one are the precast self compacting

con i 6.5 μm dei granuli di cemento e sono abbastanza piccole da esercitare un'azione fisica in grado di agevolare la movimentazione del conglomerato allo stato fresco.

Per quanto attiene all'aggregato, è quello grosso a subire maggiori variazioni che, a loro volta, si ripercuotono sulla quantità di quello fine.

Il volume di inerte grosso diminuisce drasticamente, pur variando a seconda della composizione studiata. Nei casi più estremi tende addirittura a dimezzarsi.

L'inerte fine invece subisce incrementi quantitativamente più o meno significativi, nel senso che generalmente è soggetto a piccoli aumenti, che tendono a diventare più rilevanti a seconda della composizione messa a punto. Infatti, se l'inerte grosso non subisce drastici decrementi, l'inerte fine aumenta così poco quantitativamente, da poter essere trascurabile il suo incremento. Di contro, quanto maggiore è la riduzione di inerte grosso tanto maggiore sarà la quantità di inerte fine al punto da non poter essere trascurabile il suo incremento.

Il quantitativo d'acqua non aumenta significativamente, nella misura in cui resta proporzionato alla quantità di cemento da idratare e agli inerti da bagnare, a discapito dell'aliquota di acqua di lavorabilità, che si contiene il più possibile. Quindi, anche se in valore assoluto si registra un lieve incremento per metro cubo di calcestruzzo, in relazione agli altri componenti la quantità di acqua diminuisce. Infatti, l'elevata fluidità si ottiene sia dall'introduzione del filler, che dall'impiego di additivi superfluidificanti, la cui funzione è quella di contenimento dell'acqua, specie di quella di lavorabilità, usualmente definita con l'espressione riduttore dell'acqua. Ne consegue un rapporto acqua-cemento più basso, rispetto a quello di un calcestruzzo ordinario, e comunque piuttosto basso, con conseguenti immediati

guadagni in termini di resistenza e di durabilità.

La quantità di cemento non aumenta significativamente, stante l'inserimento nella composizione del materiale finissimo che ne costituisce integrazione per quanto concerne l'azione fisica allo stato fresco. Tuttavia, si nota nella composizione un modesto aumento della quantità di cemento che è da leggersi piuttosto in proporzione alla maggior quantità di inerte fine da legare. Piuttosto è il maggior grado di finezza del cemento che influisce sulla reologia del calcestruzzo, aumentandone il limite di scorrimento. Inoltre, anche la qualità del cemento ha un suo ruolo: infatti, i cementi ricchi di silicati di calcio e quelli d'altoforno riescono ad esaltare le capacità di scorrimento del composto (Fig. 39).

L'introduzione di materiale finissimo è la vera innovazione nei calcestruzzi autocompattanti perché tende a realizzare un sistema cementizio costituito prevalentemente da particelle molto minute, capace, dunque, di trasportare gli inerti grossi. In tal senso, si possono riconoscere due fasi nel composto d'insieme: il fluido trasportatore e la fase trasportata. Pertanto, il principio che governa la composizione degli autocompattanti è aumentare il fluido trasportatore e diminuire la fase trasportata.

Il fluido trasportatore altro non è che la pasta, cioè la miscela di cemento, materiale finissimo ed acqua, che, in quantità maggiore, rende la miscela più scorrevole e quindi più capace di trasportare gli inerti. Il filler aumenta anche la coesione senza incrementare troppo il quantitativo di cemento.

La fase trasportata è l'insieme di materiale lapideo, essenzialmente grosso, che, in quantità minore, è più facilmente trasportabile e riduce il rischio di collisioni tra inerti grossi e tra inerti ed armature. Inoltre, per quanto

concrete (PSCC), these are concretes to be used prevalently for prefabricated structures, whose resistance must be between 45 and 60 N/mm². Finally the last ones are the high-strength self compacting concrete (HSSCC) for structures with resistance resistances greater than or equal to 65 N/mm².

We must remember that the use of additives in SCC is very important. These are superplasticizers or viscosity modifiers. The first one allow for greater fluidity without increasing the amount of water, otherwise the second one allows to increase the sliding capacity and the cohesion in the conditions in which a great stability is required.

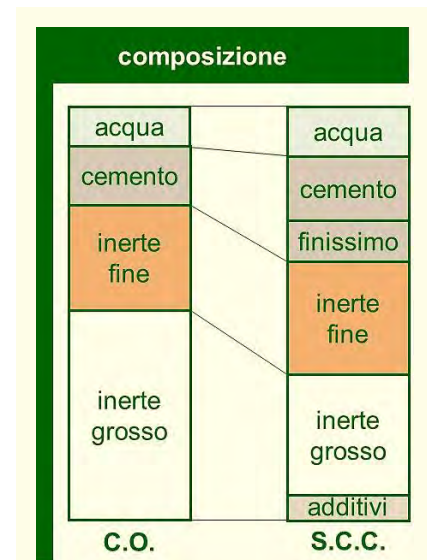


Fig. 39 Schema del principio della composizione nel confronto tra un CO e un SCC / Scheme of comparison between the composition of an OC and a SCC



Fig. 40 Restrizioni nella scelta del diametro massimo / Limits in the choice of the maximum diameter

riguarda l'aggregato grosso, anche il diametro massimo è limitato per cautelarsi dal rischio di segregazione di flusso ed agevolare il movimento della fase trasportata. Ne consegue che le restrizioni nella scelta del diametro massimo sono funzione della geometria dell'elemento da gettare, e quindi del grado di autocompattabilità, e della distanza di scorrimento laterale.

Infatti, variando dai 20 ai 16 mm, il diametro massimo è inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso che il calcestruzzo deve compiere (Fig.40).

Di fatto, cautelativamente, il diametro massimo che si sceglie è quello di 16 mm, anche nei casi in cui non sono richieste lunghezze di scorrimento particolarmente rilevanti, a tutto vantaggio della *stability*. Naturalmente, anche la distanza tra i ferri di armatura influisce sulla scelta del diametro massimo, con conseguenti maggiori limitazioni nelle sezioni fortemente armate.

2.2 Il materiale finissimo

Il ruolo del materiale finissimo, in relazione al principio che governa la composizione degli autocompattanti, è quello di lasciar aumentare il fluido trasportatore ed avere un composto capace di scorrere agevolmente nei casseri. Ma, se si aumentasse la quantità di cemento per raggiungere questo scopo si determinerebbe un maggior gradiente termico, con conseguenti fessurazioni dei getti per l'elevato ritiro. Dunque, l'intento di aumentare il fluido trasportatore può essere perseguito integrando il cemento con materiale finissimo, il cosiddetto filler. Si tratta, ad esempio, di calcare macinato, cenere volante, fumo di silice, loppa d'altoforno, pozzolana macinata, in quanto prodotti caratterizzati da nulla o lenta velocità di idratazione durante la reazione (Fig. 41). Queste

polveri finissime, che rispondono all'obiettivo di aumentare il fluido trasportatore, conferiscono all'impasto caratteristiche leggermente diverse, a seconda della natura chimica che le contraddistingue.

componente	filler	aggregato finissimo	
	polveri finissime di dimensioni inferiori a 0.125 mm		
	velocità di idratazione	caratteristiche	quantità
calcare macinato	nessuna	qualità reologiche costanti	> 70%
	struttura cristallina poco reattiva		
pozzolane artificiali	lenta	> limite di scorrimento > lavorabilità impasto migliore posa in opera	in funzione degli effetti
	struttura vetrosa più reattiva		

Fig. 41 Tipologie di filler / *Typology of fillers*

Il termine filler deriva dall'inglese e si traduce letteralmente con "riempimento", nella logica che lo identifica in quanto aggregato di dimensioni estremamente ridotte. Infatti, il ruolo che ricopre nei calcestruzzi, in generale, è quello di migliorare l'assortimento granulometrico degli aggregati, incrementando la frazione fine con lo scopo di limitare i rischi di segregazione e di ridurre il *bleeding*. Il conseguente incremento del fabbisogno di acqua rende, comunque, necessaria una certa attenzione nella definizione della composizione e nella scelta del tipo di filler.

L'azione fisica che svolgono nella miscela allo stato fresco è prevalentemente quella di costituire un virtuale incremento della quantità di cemento, ma, non partecipando alla reazione di idratazione, non determina allo stato indurito i problemi indotti da un eccessivo sviluppo di calore.

Ne consegue che le proprietà reologiche delle miscele sono incrementate dal punto di vista della lavorabilità, che è affidata maggiormente al fluido trasportatore, a discapito

della distribuzione granulometrica degli aggregati. Nel confronto con gli altri conglomerati, dunque, riveste la massima importanza il volume composto da cemento, acqua, filler, additivi ed aria inglobata. Tuttavia, nell'ambito della tradizionale tecnologia dei calcestruzzi, specie per quelli superfluidi, e soprattutto nelle applicazioni in opere di un certo pregio, comprese quelle infrastrutturali, si tende a impiegare il filler come componente aggiunto in relazione al potenziamento delle caratteristiche, sia reologiche, che prestazionali.

Il ruolo del filler, infatti, permette non soltanto di migliorare, controllare e progettare la reologia delle miscele cementizie, in relazione alla viscosità del fluido trasportatore, ma anche di potenziare le caratteristiche fisico-meccaniche, sia per quanto attiene alla compattezza, resistenza e durabilità, che al miglioramento della microstruttura all'interfaccia pasta-aggregato.

Le tipologie di filler sono due, quelle spente e quelle attive, e la principale differenza risiede proprio nella struttura chimica, che, nelle pozzolane artificiali, cosiddette ad attività idraulica latente, determina ulteriori reazioni, per cui aggiunte ai composti, riescono ad aumentare il limite di scorrimento senza modificare la viscosità allo stato plastico.

In relazione alle dimensioni del filler, invece, va precisato che la UNI 11040 del 2003, specifica per gli SCC, definisce finissimo il passante allo staccio di 0.125 mm. Invece, la normativa europea UNI EN 12620 del 2008, relativa agli aggregati per calcestruzzi in generale, definisce filler l'aggregato che nella maggior parte passa allo staccio 0.063 mm e può essere aggiunto in diverse miscele per attribuire particolari caratteristiche. Inoltre, definisce polveri o fini la classe granulometrica di un aggregato che passa allo stesso staccio di 0.063 mm.

La differenza tra i due termini non è tanto dimensionale, quanto funzionale, nel senso che il filler è un aggregato di dimensioni inferiori a 0.125 mm, la cui maggior parte passa anche allo staccio 0.063 mm, che entra nella miscela come componente aggiunto. In effetti, anche il finissimo è caratterizzato da una curva granulometrica, che nel suo assortimento dimensionale, paragonabile alla finezza del cemento, ricalca la stessa logica della distribuzione continua dell'aggregato solido. Le polveri, invece, sono già presenti negli aggregati e devono soddisfare i controlli in relazione alla eventuale presenza di sostanze nocive, come prescritto dalla citata normativa. Piuttosto, al momento, la UNI 11040 del 2003 è stata ritirata nel 2015 e non sostituita.

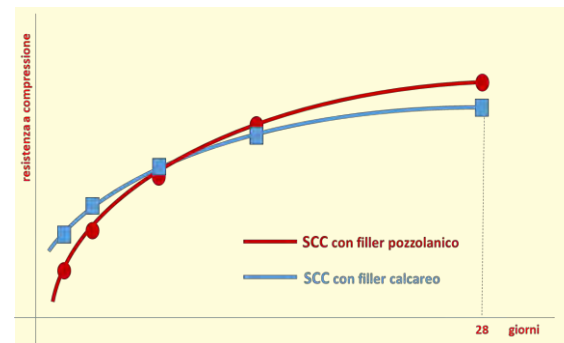
2.2.1 I filler calcarei

Il calcare macinato, che viene utilizzato correntemente negli SCC, è una polvere inerte granulometricamente passante a 0.125 mm di diametro (0.063 mm passante nella misura del 70 % minimo) che, avendo velocità di idratazione nulla rispetto alle altre polveri, offre il vantaggio di un miglior controllo delle caratteristiche reologiche e, in generale, di maggiore costanza in termini di qualità (Fig. 42). I filler calcarei, rispetto a quelli pozzolanici, conferiscono all'impasto una minore resistenza alla segregazione. Di contro, però, il loro impiego determina, rispetto ai filler pozzolanici, fenomeni di presa e di indurimento più celeri, con conseguente incremento di resistenza alle brevi stagionature (Fig. 43). Inoltre, si fanno preferire nei casi in cui è richiesto un buon facciavista, essendo di colore chiaro, tra bianco e bianco sporco, con il risultato di calcestruzzi chiari, privi di macchie in superficie o colorabili con pigmenti naturali. Senza dire, che molti cementi prodotti nel nostro paese presentano già all'interno una certa quantità di filler calcareo.



Fig. 42 Filler calcareo / Calcareous filler

Fig. 43 Confronto resistenze a compressione tra autocompattanti con filler diversi / Comparison of compressive strength between self compacting concrete with different fillers



2.2.2 I filler pozzolanici

I filler di tipo pozzolanico, impiegati oggi nella realizzazione di miscele autocompattanti, sono materiali di riciclo contenenti gli stessi minerali presenti nella pozzolana naturale, quindi la struttura vetrosa che li caratterizza determina reazioni integrative che migliorano le caratteristiche. L'impiego di sottoprodotti industriali, quali cenere volante, fumo di silice e loppa d'altoforno, nei calcestruzzi consente loro di essere definiti "ecologici", in quanto contribuiscono al reimpiego di rifiuti generalmente di difficile smaltimento.

In effetti, anche in passato l'aggiunta di pozzolana nelle vecchie malte, al di là degli effetti ben noti di idraulicità e di incremento di resistenza, riusciva ad accrescere la lavorabilità della miscela, con diretti vantaggi nella fase di impasto e nella posa in opera. Pertanto, nei calcestruzzi autocompattanti, i filler pozzolanici migliorano le proprietà reologiche, sia per quanto attiene alla capacità di fluire più facilmente nei casseri e nelle pompe, cioè all'autocompattabilità, sia alla stabilità del sistema cementizio.

Alle pozzolane antiche, rocce piroclastiche e cocchiopesto, si affiancano, oggi, quelle moderne, le cosiddette pozzolane artificiali, sottoprodotti derivanti da processi industriali, tra cui la cenere volante, il fumo di silice e la loppa d'altoforno (Fig. 44).

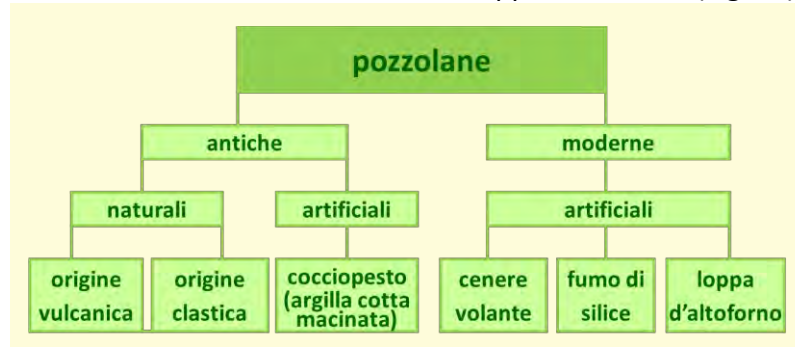


Fig. 44 Classificazione delle pozzolane antiche e moderne / *Classification of ancient and modern pozzolans*

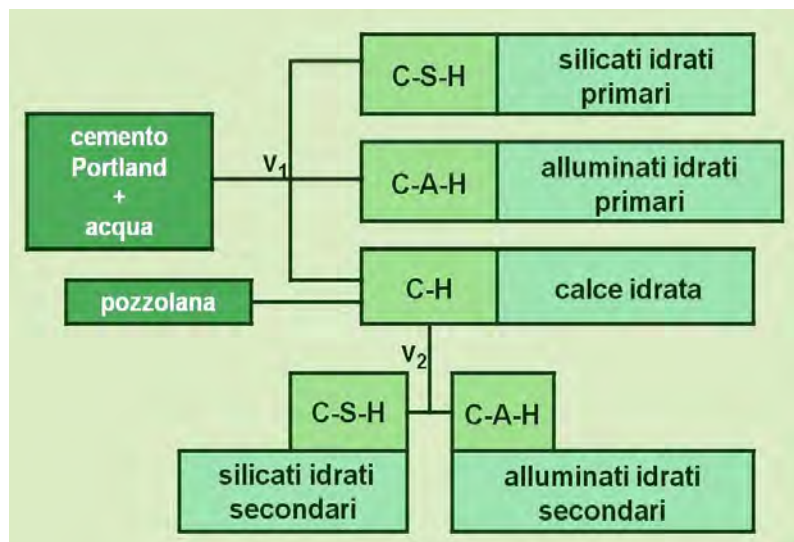
Questi materiali finissimi, di natura silicea o silico-alluminosa, sono caratterizzati da una struttura vetrosa o amorfa, e cioè più reattiva rispetto a quella cristallina, responsabile dell'attività idraulica latente. La loro composizione mineralogica vede presenti, in quantità diverse, la silice, l'alluminina e una certa quantità di calce (Fig. 45).

filler pozzolanici	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
cenere volante	37-47 %	25-30 %	2.5-6.5 %
fumo di silice	75-98 %	0.2-5 %	0.1-1 %
loppa macinata	30-45 %	5-23 %	30-45 %

Fig. 45 Composizione mineralogica dei filler pozzolanici / *Mineralogical composition of pozzolanic fillers*

Questi tre tipi di filler innescano una reazione pozzolanica, tardiva rispetto a quella del cemento, con limitato sviluppo di calore. Ai silicati e ai silico-alluminati idrati primari, prodotti dalla reazione del cemento con una velocità v_1 abbastanza rapida, si affianca la calce che, solo in un secondo momento, è coinvolta in una reazione pozzolanica con i filler, da cui si formano silicati e silico-alluminati idrati secondari. Come per una qualsiasi pozzolana, si tratta di composti idraulici, che si formano con una reazione molto lunga nel tempo, ma a velocità v_2 piuttosto modesta e molto minore rispetto a quella cementizia (Fig. 46). Sostanzialmente si formano due famiglie di prodotti idrati, e quindi stabili, sia pur sfalsati temporalmente: la prima, per effetto della reazione del cemento e la seconda, per effetto della reazione pozzolanica indotta dal filler nei confronti della calce, che, in qualche modo, ricorda la lezione della scuola dei romani. Oggi, però, l'efficacia dell'azione pozzolanica è ben superiore, essendo influenzata dalle dimensioni granulometriche e dalla superficie specifica più che dal contenuto di silice, nella misura in cui sono più attive le particelle più piccole che hanno una maggiore superficie specifica.

Fig. 46 Schema della reazione del cemento e della reazione della pozzolana / Scheme of reaction of cement and pozzolana



La formazione di questa seconda famiglia di composti idrati ha come conseguenza un certo incremento di resistenza meccanica e svolge anche un'azione stabilizzante nei confronti della calce, accrescendo, di conseguenza, anche la durabilità.

Poco diffuso si presenta, oggi, l'impiego delle pozzolane naturali, in quanto richiederebbe la preventiva macinazione, operazione che, per ragioni produttive, si presta ad essere eseguita congiuntamente con il cemento. In questo caso, si parla di cementi pozzolanici. Diversamente, i costi non ne giustificano la macinazione a parte, anche perché esistono pozzolane artificiali già fini che possono essere utilizzate come filler più o meno direttamente.

Tra le aggiunte pozzolaniche, la cenere volante, sottoprodotto derivante dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche, è una polvere fine che si ottiene dalla fusione delle impurità minerali alle elevate temperature e dal successivo rapido raffreddamento (Fig. 47).

La combustione produce una cenere pesante con particelle

alla pagina seguente:

Fig. 47 Cenere volante del carbone / Flying coal ash

Fig. 48 Particella di cenere volante piena / Full flying ash particle

Fig. 49 Cenere volante / Benefited Flying Ash

di qualche centimetro (*bottom ash*) ed una cenere volante (*fly ash*) molto fine di dimensioni variabili da 1 a 100 μm .

Si tratta di materiali di natura silico-alluminosa, costituiti da particelle prevalentemente di dimensioni inferiori ai 45 μm , di cui circa il 40% con dimensioni inferiori ai 20 μm .

Il rapido raffreddamento (da 1500°C a 200°C in pochi secondi) della fase liquida, con cui si forma la cenere volante, determina una struttura vetrosa o amorfa, requisito di pozzolanicità, che caratterizza circa l'80 % rispetto agli altri composti ben cristallizzati. Prevale la forma sferica delle particelle che si presentano piene, vuote, spugnose oppure contengono altre particelle più piccole all'interno (Fig. 48). Alla superficie specifica che mediamente si attesta intorno ai 4500 cm^2/g , corrispondono una massa volumica apparente compresa tra 0.6 e 1 Kg/litro ed una massa volumica assoluta variabile da 2.2 a 2.4 Kg/litro.

A partire dagli anni Ottanta, il nostro paese dispone di grandi quantità di cenere volante, oltre un milione di tonn/anno, suscettibili di ulteriore aumento dal momento che le centrali termoelettriche alimentate a carbone sono in aumento.

La prevalenza di particelle inferiori a 45 μm , più piccole e quindi più regolari di forma, per il minor attrito interno nel calcestruzzo migliorano la reologia del composto, a vantaggio dell'azione fisica alla base della capacità di scorrimento e quindi dell'autocompattabilità. Si ottiene, dunque, un aumento di lavorabilità, vantaggio che può essere anche una scelta indiretta per limitare la quantità di acqua nei calcestruzzi ordinari.

Altro effetto è la riduzione del *bleeding*, in quanto le particelle di dimensione micrometrica aumentano la compattezza allo stato di quiete e agevolano lo scorrimento in condizioni dinamiche, cioè in fase di getto. La riduzione del



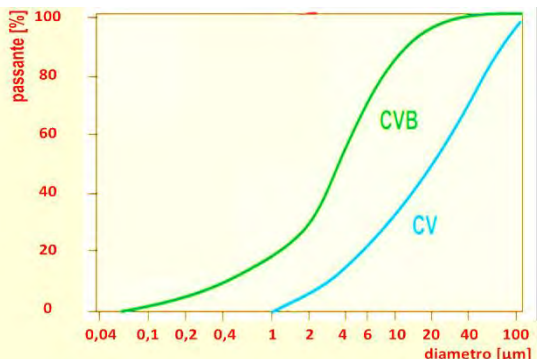


Fig. 50 Distribuzione granulometrica di cenere volante non trattata e cenere volante beneficiata / Grain size distribution of untreated flying ash and benefited flying ash



Fig. 51 Resistenza meccanica nei conglomerati con o senza pozzolana / Mechanical resistance in conglomerates with or without pozzolana

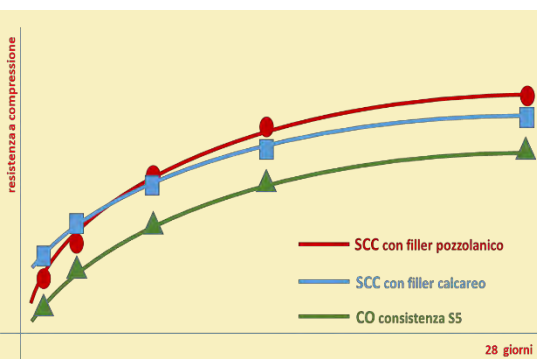


Fig. 52 Confronto resistenze tra autocompattanti con diversi filler e calcestruzzo a consistenza superfluida / Comparison of resistance between self compacting concrete with different fillers and concrete with superfluid consistency

bleeding è il presupposto per un buon facciavista, anche se il colore potrebbe essere più scuro per la presenza di carbone incombusto nella cenere volante.

Oggi, si produce cenere volante beneficiata (Figg.49 e 50) utilizzando tecnologie elettrostatiche, con cui si riescono a rimuovere le particelle di carbone incombusto di dimensioni più grandi e di forma irregolare. Ne consegue un colore molto più chiaro che migliora le applicazioni a faccia vista e, caratterizzato da una maggiore purezza, sviluppa una migliore azione pozzolanica.

La presenza della cenere volante come filler determina, allo stato indurito, una maggiore compattezza, leggibile in particolar modo alla scala della matrice cementizia, che determina innanzitutto un incremento di resistenza meccanica ed è anche il presupposto per una maggiore durabilità, essendo la massa più compatta e quindi meno permeabile e meno attaccabile dagli agenti aggressivi (Fig. 51). Ne conseguono gli impieghi nel campo delle strutture idrauliche e autostradali, essendo l'accresciuta resistenza agli attacchi dei cloruri riconducibile alla maggiore impermeabilità.

Nel confronto, sia il filler calcareo che la cenere volante migliorano la resistenza meccanica (Fig. 52). Tuttavia lo sviluppo delle resistenze presenta un andamento diverso. Con l'impiego del filler calcareo, la resistenza matura prima, cioè presenta valori superiori a brevi stagionature. Invece, la cenere volante consente di ottenere la massima resistenza possibile a 28 gg. per effetto dell'attività pozzolanica, ma dopo i primi giorni i valori di resistenza sono confrontabili con quello di un calcestruzzo ordinario.

Ma se la quantità di fumo di silice prodotta in tutto il mondo è inferiore a quella di cenere volante prodotta soltanto nel nostro paese, è prevedibile che il fumo di silice

risulti più costoso. Inoltre, anche i miglioramenti prestazionali conseguibili, determinano costi molto superiori a quelli del cemento.

Sottoprodotto derivante dalla lavorazione in forni, di tipo elettrico, del silicio e delle leghe metalliche a base di silicio, il fumo di silice si presenta in forma di polvere molto fine con dimensioni delle particelle tra 0.02 e 0.5 μm . Il processo da cui ha origine determina una struttura vetrosa o amorfa, costituita essenzialmente da silice (in misura maggiore del 75-85%) con una elevatissima superficie specifica che si attesta intorno ai 100000 e 350000 cm^2/g . Queste caratteristiche, per la maggior efficacia dell'azione pozzolanica rispetto agli altri filler, favoriscono la denominazione di super-pozzolana. La massa volumica assoluta si attesta intorno ai 2.0-2.2 Kg/litro mentre quella apparente varia tra 0.2 a 0.5 Kg/litro.

Le particelle micrometriche di forma sferica si presentano raccolte in grappoli (Fig. 53), per effetto di legami così deboli che in fase di miscelazione del calcestruzzo si rompono, favorendo la dispersione nella miscela in modo da avvolgere i granuli di cemento. Gli effetti sono duplici, quello di riduzione della microporosità, tipica del filler, e quello dell'azione pozzolanica, particolarmente attiva, stante l'elevato contenuto di silice. La costanza per quanto attiene alla qualità e la conseguente facilità dei relativi controlli sono altri parametri che differenziano il fumo di silice rispetto agli altri filler pozzolanici.

Tuttavia, dal punto di vista dell'incremento di lavorabilità, la notevole superficie specifica impone che la quantità di fumo di silice non sia eccessiva per non eccedere con il quantitativo di acqua e determinare ritiro plastico. Ne consegue la necessità di impiegare congiuntamente additivi superfuidificanti per contenere l'acqua di impasto.

Allo stato fresco la proprietà più rimarchevole con



Fig. 53 Fumo di silice in grappoli / *Silica smoke in clusters*

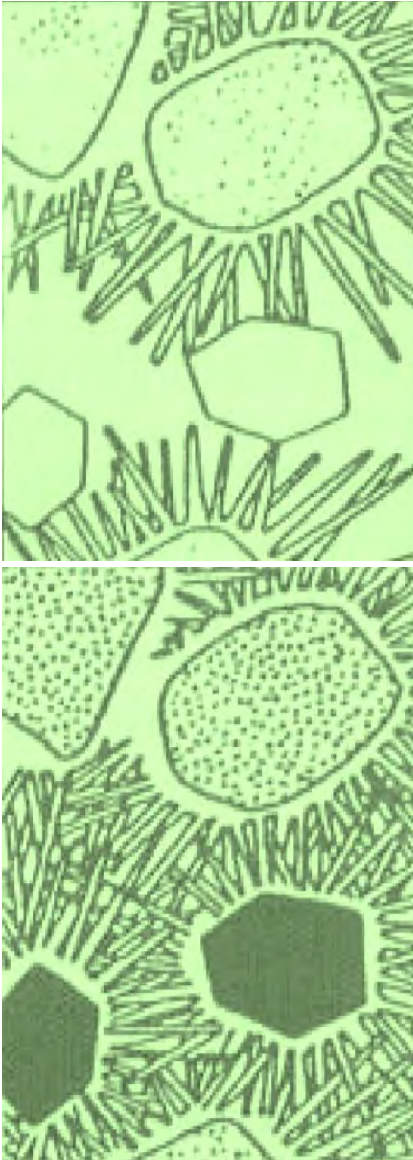


Fig. 54 Pasta di cemento senza microsilice e con microsilice / Cement paste without microsilica and with microsilica

l'impiego di fumo di silice è la resistenza alla segregazione, che, di conseguenza, inibisce la formazione di *bleeding*. Infatti, le ridottissime dimensioni, inferiori al micrometro, determinano un'elevata superficie specifica, che garantisce plasticità e coesione. Inoltre, il fumo di silice induce tixotropia al composto, che si caratterizza per un'elevata coesione in condizioni di quiete e una certa scorrevolezza in fase di movimento. Questa proprietà risulta vantaggiosa nel confezionamento di composti cementizi da porre in opera a spruzzo, poiché prima sono facilmente pompabili, e dopo la posa in opera risultano abbastanza viscosi da non colare, anche se applicati in spessori considerevoli (Fig.54).

Allo stato indurito, si registra un'elevata resistenza meccanica a brevi e lunghe stagionature, stante un'eccezionale compattezza e una conseguente microporosità ridotta, se l'impiego di fumo di silice è contenuto entro il 5%. Per quantità superiori, si rilevano alti e altissimi valori di resistenza con l'impiego sinergico di fumo di silice e di superfluidificante, in modo da contenere il rapporto a/c. In questi casi, la matrice cementizia costituisce l'elemento di maggiore resistenza, tanto che il meccanismo di rottura interessa prima l'inerte. Ne consegue l'impiego di aggregato lapideo naturale o artificiale particolarmente resistente nei calcestruzzi ad altissima resistenza. Inoltre, il rapporto a/c impone un'adeguata protezione dei getti e una stagionatura umida per contenere ritiro plastico e fessurazioni superficiali.

L'eccezionale compattezza non è soltanto presupposto di resistenza meccanica, ma anche di impermeabilità, proprietà che garantiscono una straordinaria durabilità.

Inoltre i fumi di silice migliorano la resistenza dei calcestruzzi all'aggressione, sia dell'anidride carbonica che è sempre più diffusa, in relazione al traffico e agli scarichi

industriali, che ai cloruri di calcio impiegati come sali disgelanti. In tal caso, la reazione di questi filler nei confronti della calce libera è quella tipicamente pozzolanica, in relazione alla capacità della silice di fissare la calce idrata sotto forma di silicato idrato, oltre all'elevata compattezza che caratterizza la matrice cementizia. Si rileva un duplice meccanismo difensivo che esplica una difesa sia attiva, stabilizzando la calce libera, sia passiva, fondata sulla ridotta porosità che limita l'accesso degli agenti aggressivi.

Altro filler di tipo pozzolanico è la loppa d'altoforno finemente macinata, che si presenta sotto forma di polvere con dimensioni confrontabili a quelle delle ceneri volanti.

La loppa d'altoforno è un sottoprodotto della lavorazione della ghisa, derivante dal raffreddamento di scorie liquide durante la produzione. Nel nostro paese sono disponibili ogni anno circa 2-3 milioni di tonnellate. A seconda se sono raffreddate rapidamente o lentamente, si determina la formazione di particelle con struttura rispettivamente amorfa e cristallina, con conseguenti utilizzazioni in campi diversi. I grani con struttura cristallina si ottengono con raffreddamento all'aria o mediante insufflaggio di vapore, dando origine ad inerti ordinari o leggeri, da impiegare rispettivamente nei calcestruzzi stradali e nei calcestruzzi alleggeriti. Invece, dalla loppa raffreddata velocemente si ricavano granuli di qualche millimetro di grandezza, di natura silico-alluminosa, ma con maggiore quantità di calce rispetto agli altri filler pozzolanici (Fig. 55). Impiegata nella produzione di cementi d'altoforno, macinandola congiuntamente con il cemento portland di clinker e gesso, la loppa oggi viene macinata anche separatamente dando origine ad una polvere finissima di dimensioni compresi tra 1 e 100 μm e con superficie specifica variabile dai 3000 ai 6000 cm^2/g . La massa volumica assoluta oscilla tra 2 e 2.2 Kg/litro, mentre quella

Fig. 55 Caratteristiche delle tipologie principali di filler pozzolanici / Characteristics of the types of pozzolanic fillers

componente	filler	aggregato finissimo			
pozzolane artificiali					
cenere volante	deriva dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche (oltre 1 milione di tonn/anno in Italia)				
	1 - 100 µm	riduzione bleeding	aumento lavorabilità	aumento durabilità	40-60 Kg/mc
fumo di silice	deriva dalla lavorazione all'arco elettrico delle leghe metalliche a base di silicio (meno di 1 milione di tonn/anno tra Europa e nord-America)				
	0,02 - 0,5 µm	riduzione bleeding	aumento tixotropia	maggiore compattezza	piccole quantità
loppa d'altoforno macinata	deriva dal raffreddamento scorie liquide durante la produzione della ghisa (2 - 3 milioni di tonn/anno in Italia)				
	1 - 100 µm	riduzione calore d'idratazione		aumento durabilità	impieghi in altri paesi

apparente tra 0.2 a 0.6 Kg/litro.

Questa produzione a se stante, che in altri paesi è già commercializzata, delinea l'utilizzazione come filler direttamente nella centrale di betonaggio, con proprietà idrauliche più modeste rispetto alle altre pozzolane artificiali, in quanto contiene una certa quantità di calce, che, di contro, le consente capacità di reazione molto lenta, ma autonoma soltanto in presenza d'acqua.

L'azione di questo tipo di filler allo stato fresco è confrontabile con quella della cenere volante e del fumo di silice e si traduce in aumento di lavorabilità e in riduzione del *bleeding*. Analogamente, allo stato indurito, si ottengono incrementi di compattezza e di resistenza meccanica via via crescenti durante la stagionatura. Infatti, in Giappone si produce loppa macinata ultrafine per il confezionamento di calcestruzzi ad altissima resistenza.

La quantità da introdurre nella composizione è sensibilmente maggiore rispetto agli altri filler pozzolanici ed è direttamente proporzionale all'aumento di lavorabilità,

senza incremento del gradiente termico. Ne consegue, l'impiego anche in sostituzione di una porzione di cemento, con sensibile riduzione del calore di idratazione.

Inoltre, la stagionatura a vapore aumenta la reattività della loppa che diventa confrontabile a quella del cemento.

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche è anche il presupposto per una maggiore durabilità, anche se, rispetto all'impiego di cenere volante, appaiono più rilevanti le resistenze agli attacchi dello zolfo, del cloro e dei sali disgelanti (solfatico, della penetrazione del cloro e dell'attacco dei sali disgelanti), che si manifestano in misura maggiore con percentuali maggiori di loppa in aggiunta. Per quanto riguarda i miglioramenti riscontrabili rispetto all'attacco dei sali disgelanti, questi sono competitivi rispetto al fumo di silice.

Per quanto attiene alla finezza dei filler pozzolanici si può notare (Fig. 56) che, a parte il fumo di silice, la cenere volante beneficiata presenta dimensioni minori e un maggior assortimento granulometrico, rispetto alla cenere volante non trattata, oltre ad una maggiore purezza che la rende più attiva. Inoltre, nel confronto con il cemento, la finezza dei tre filler è sempre superiore (Fig. 57), anche se di poco, migliorando significativamente il comportamento reologico delle nuove miscele e la microstruttura della matrice allo stato solido.

2.3 Il dosaggio degli SCC

La corretta proporzione tra fluido trasportatore e fase trasportata si ottiene attraverso la definizione delle quantità dei componenti ed il controllo dei rapporti tra questi, che costituiscono dei parametri di riferimento. Questi dati sono ricavati mediando tra regole pratiche e vincoli normativi

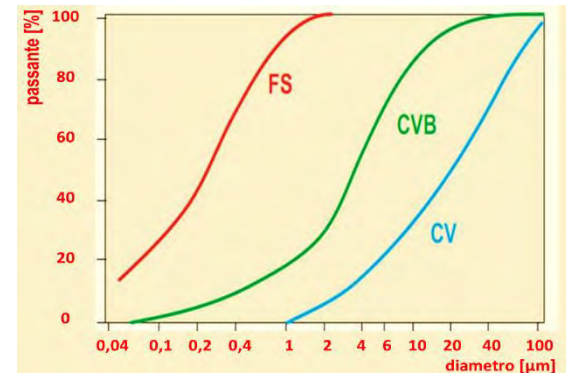


Fig. 56 Distribuzione granulometrica di fumo di silice, cenere volante e cenere volante beneficiata / Grain size distribution of silica smoke, flying ash and benefited flying ash

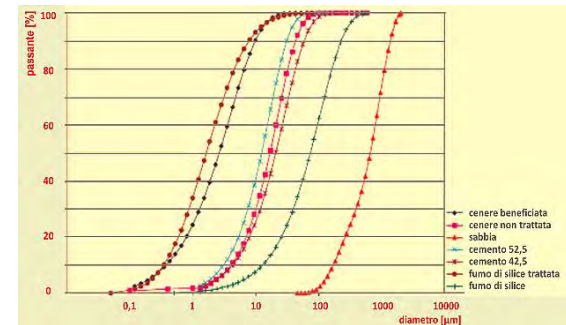
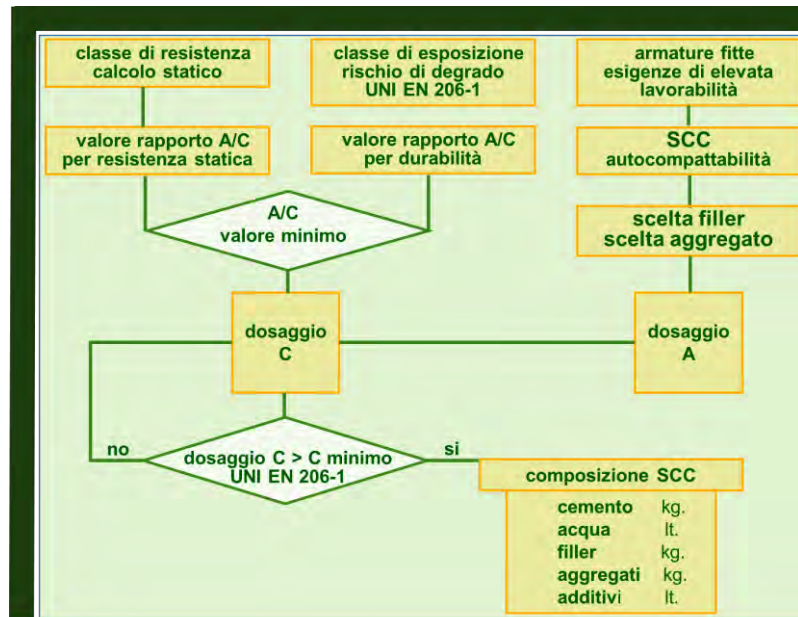


Fig. 57 Distribuzione granulometrica dei filler e dei cementi / Grain size distribution of fillers and cements

Fig. 58 Definizione delle quantità dei componenti in un SCC / *Definition of the quantities of the components in an SCC*



secondo un percorso logico (Fig.V).

Rispetto a un calcestruzzo ordinario la logica prevede per gli autocompattanti un aumento del fluido trasportatore, la cosiddetta pasta, e una diminuzione della fase trasportata, gli inerti.

La pasta, insieme di acqua, cemento e polveri finissime di circa 350-380 litri per metro cubo di calcestruzzo, si ottiene con circa 400 kg/m³ di cemento, un volume di acqua di impasto compreso tra 170 e 210 litri/m³ e un volume di materiale finissimo compreso tra 160 e 190 l/m³ (Fig. 59). Il materiale finissimo va ad integrare la quantità di cemento che, per avere le proprietà reologiche di un autocompattante dovrebbe raggiungere i 500-600 kg/m³, con i conseguenti problemi di fessurazione, già menzionati, per effetto di elevati gradienti termici e di ritiro.

Il rapporto acqua/cemento che ne risulta è spesso

componenti	unità misura	quantità	quantità	unità misura			
cemento C			380-400	Kg/m ³	a/c = 0.45-0.55	acqua / finissimo 0.85 - 1.10	pasta 350 - 380 lt/ m ³
acqua	lt/ m ³	170-210					
aggregato finissimo	lt/ m ³	160-200	350-550	Kg/m ³	20-35%		
aggregato fine			750-1000	Kg/m ³	50-55%		
aggregato grosso	lt/ m ³	< 350	< 970	Kg/m ³	15-30%		
additivi	%/Kg C	1-2%					

piuttosto contenuto rispetto a un calcestruzzo ordinario, pur variando tra 0.45 e 0.55. È chiaro che diminuendo il rapporto acqua/cemento si ottengono elevati valori di resistenza, ma è anche vero che aumentano coesione e viscosità plastica. Dunque, per garantire l'autocompattabilità sarebbero necessari rapporti acqua/cemento non troppo bassi, per non limitare la capacità di scorrimento del conglomerato. Eppure, lo studio della composizione riesce a garantire l'autocompattabilità anche con valori molto contenuti del rapporto acqua/cemento, in modo da ottimizzare le caratteristiche allo stato fresco e quelle allo stato indurito. E in questo non è influente il ruolo dell'additivo superfluidificante, che, per definizione, risponde alla funzione di riduttore d'acqua.

Il rispetto delle prescrizioni minime composizionali previste dalla norma UNI EN 206 del 2016, versione italiana della EN 206, impone comunque un rapporto a/c < 0.55, in linea con la logica del progetto "durabilità", che individua una resistenza minima da garantire in funzione della classe di esposizione specifica. Naturalmente tra i valori imposti al rapporto a/c valgono quelli più limitanti. Tuttavia, nella realtà

Fig. 59 Tabella dei parametri compositivi di riferimento / Table of reference compositional parameters

applicativa, si progettano composizioni con rapporti a/c ancor più bassi, avvalendosi di additivi da aggiungere in ragione della quantità di legante.

Nuovo è invece il rapporto acqua/finissimo che varia tra 0.85 e 1.10, essendo il finissimo costituito da cemento, aggiunte pozzolaniche e filler calcareo di dimensioni inferiori a 0.125 mm. Il controllo di questo rapporto consente di parametrare la reologia della pasta, in modo da ottimizzare capacità di scorrimento e resistenza alla segregazione dell'impasto. Se questo rapporto è più alto del valore limite, la miscela è troppo fluida e rischia la segregazione perché le dimensioni e le quantità del filler fanno elevare troppo l'aliquota di acqua di bagnatura, mentre, se il valore è al di sotto di 0,85 la miscela è troppo viscosa per essere pompata agevolmente.

Gli inerti, sabbia e ghiaia, nel costituire la fase trasportata devono corrispondere a rapporti volumetrici minori rispetto a un tradizionale calcestruzzo, come riportato nella tabella (Fig. 59). In particolare, la quantità di inerte grosso viene sensibilmente ridotta, fino ad essere quasi dimezzata, essendo a carico del fluido trasportatore. Inoltre, in percentuale, la quantità di inerte fine è superiore a quella dell'inerte grosso e spesso viene computata in relazione a classi granulometricamente diverse o di natura diverse.

Inoltre, per quanto attiene all'aggregato fino lo studio della composizione prevede spesso due tipologie, a vantaggio dell'assortimento granulometrico oppure comprende sabbie naturali e artificiali.

Invece, per quanto attiene all'aggregato grosso, il diametro massimo, come già detto, varia tra i 16 mm e i 20 mm. Questi limiti dimensionali sono funzione innanzitutto della geometria dell'elemento da gettare, con particolare riferimento alla dimensione minima della sezione,

all'interfero minimo, allo spessore del copriferro, al diametro delle barre e alla protezione delle armature dall'incendio. Ma sono anche funzione delle modalità del getto in opera, nella misura in cui l'autocompattabilità del calcestruzzo garantisce una capacità di scorrimento laterale, tale da consentire di effettuare il getto anche da una posizione distante, che cautelativamente è dell'ordine di grandezza di una decina di metri. Infatti, la dimensione massima dell'aggregato grosso è direttamente proporzionale alla dimensione minima del getto da realizzare, variando dai 16 ai 20 mm di diametro quando la sezione passa dai 40 ai 100 cm, mentre è inversamente proporzionale alla distanza di scorrimento oscillando dai 20 ai 16 mm di diametro man mano che aumenta la distanza da percorrere allo stato fresco (Fig. 40).

L'impiego degli additivi esercita un'azione sinergica con i componenti presenti nelle proporzioni indicate, fino ad esaltare le proprietà reologiche. Infatti, è necessario impiegare additivi superfluidificanti acrilici per garantire l'autocompattabilità di questo calcestruzzo, con un dosaggio pari circa 1-1.5% oppure espresso in litri rispetto al peso del cemento. Inoltre, può essere necessario impiegare anche un agente modificatore di viscosità, additivo mirato a ridurre al minimo fenomeni di *bleeding* e di segregazione, specie nelle miscele ad elevate prestazioni.

2.4 Tipologie di SCC

I calcestruzzi autocompattanti SCC individuano tre tipologie a seconda dei campi di impiego in cui sono richieste diverse caratteristiche di resistenza, come disposto nelle normative vigenti. Quindi, in base al grado di autocompattabilità richiesto nelle varie applicazioni, gli autocompattanti si distinguono in *normal*, *precast*, *high-*

Fig. 60 Tipologie di SCC / *Typology of SCC*



strength e queste denominazioni precedono l'acronimo SCC (Fig. 60).

Il *normal self compacting concrete* (NSCC) identifica i calcestruzzi autocompattanti da gettare in opera dove sia richiesta una resistenza caratteristica compresa tra 25 e 40 N/mm^2 .

Il *precast self compacting concrete* (PSCC) individua calcestruzzi autocompattanti da utilizzare prevalentemente nel settore della prefabbricazione, in cui è richiesta una resistenza compresa tra 45 e 60 N/mm^2 .

L'*high-strength self compacting concrete* (HSSCC) include calcestruzzi autocompattanti cui sono richieste elevate prestazioni meccaniche, da utilizzare per getti, sia in opera che prefabbricati, in cui sia necessaria una resistenza superiore o uguale a 65 N/mm^2 .

2.5 Gli additivi

Gli additivi più utilizzati nella produzione degli SCC sono i superfluidificanti e i modificatori di viscosità, che agiscono sulle proprietà del composto allo stato fresco migliorandone la capacità di scorrimento.

Gli additivi principali, e cioè necessari nel confezionamento degli SCC, sono i superfluidificanti che consentono di ottenere

una maggiore fluidità, senza aumentare la quantità di acqua. In questo modo si riesce a contenere il rapporto a/c garantendo buoni valori di resistenza nel pieno rispetto della normativa vigente. Di conseguenza, si riduce la viscosità senza favorire la segregazione del calcestruzzo.

Il dosaggio degli additivi superfluidificanti va proporzionato in percentuale (quantità 1-2%) rispetto al peso di cemento e di cenere volante, in quanto agiscono sulla superficie di entrambi per accrescere la capacità di scorrimento. Oggi si impiegano polimeri idrosolubili, i polycarbosilici, additivi privi di gruppi solfonici, che sono a tutt'oggi, una delle innovazioni più rilevanti nella tecnologia dei nuovi calcestruzzi.

In verità, l'attenzione agli additivi ha inizio con i primi fluidificanti nella prima metà del Novecento e incontra una prima risposta nel ligninsolfonato, sottoprodotto industriale che si ricava durante la lavorazione per estrarre la cellulosa dal legno. Viene impiegato come riduttore d'acqua o per aumentare la fluidità della miscela, in quantità pari a 0.2-0.3% rispetto al peso del cemento.

Verso la metà degli anni Settanta, fanno il loro ingresso sul mercato i superfluidificanti, frutto della ricerca giapponese e tedesca, che sono i primi polimeri idrosolubili con potenzialità di azione circa quattro volte superiore rispetto alla generazione precedente dei fluidificanti. In effetti, prima ancora che la nanotecnologia guadagni il riconoscimento ufficiale di disciplina scientifica, con questi additivi, il poli-naftalen-solfonato (PNS) e il poli-melammin-solfonato (PMS), il calcestruzzo, che è già intrinsecamente nanostrutturato alla scala molecolare per i legami chimici che lo ordinano, conosce un nuovo livello di progettazione nanostrutturata. Ma sono soprattutto i superfluidificanti polycarbosilici (PC), nel corso degli anni Novanta, a legittimare l'uso degli additivi nei

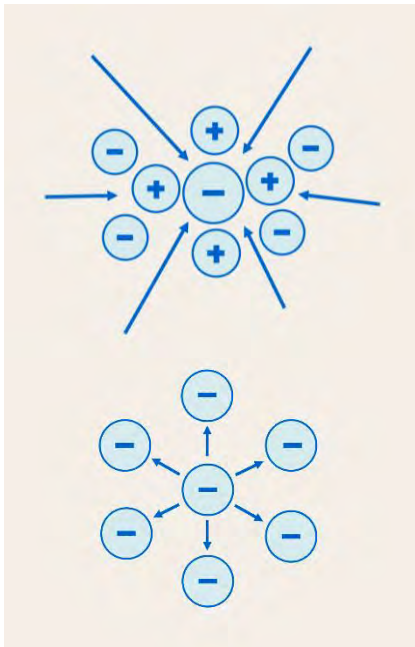
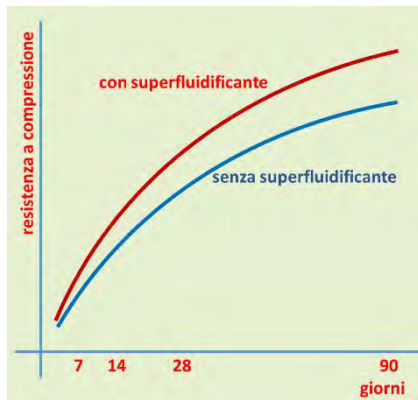


Fig. 61 Effetto flocculante e deflocculante /
Flocculant and deflocculant effect

Fig. 62 La resistenza nei calcestruzzi con e
senza superfluidificante / Resistance in
concrete with and without superplasticizer



calcestruzzi. Appartenenti ad una famiglia molto vasta di nuovi polimeri, tutti caratterizzati dalla completa assenza dei gruppi solfonici, questi composti, di efficacia così elevata da richiedere dosaggi quantitativamente modesti, si basano sull'innesco e sul controllo sia di reazioni chimiche che di azioni fisiche, mirate all'ottimizzazione del risultato da raggiungere e dunque frutto di un progetto. Con i polycarbosilici, in particolare il poli-acrilato (PA) e il poli-etero (PE), si apre una nuova strada, per l'azione deflocculante che esercitano sui granuli di cemento dispersi in acqua e per l'eccezionale efficacia, che richiede dosaggi dell'1% rispetto alla massa del cemento. Dosaggi maggiori si impiegano nelle miscele contenenti fumo di silice, che, essendo enormemente più fino del cemento, richiede maggiore acqua di bagnatura. Comunque, raramente si supera il 2% nei dosaggi.

La flocculazione dipende dal fatto che la maggior parte dei granuli di cemento, nel disperdersi nell'acqua, tende a formare coaguli costituiti da numerosi granuli. Questo fenomeno deriva dall'attrazione elettrostatica tra le microparticelle di cemento, per effetto di cariche di segno opposto che si generano sulle superfici dopo la macinazione, durante il processo produttivo del cemento (Fig. 61). L'effetto della flocculazione è un parziale mancato sfruttamento della quantità di cemento, che non viene idratato completamente.

L'azione deflocculante dei superfluidificanti polycarbosilici, invece, riesce a disperdere maggiormente i granuli di cemento nella soluzione acquosa, creando le condizioni per un capillare sfruttamento del cemento (Fig. 62). Infatti, la deflocculazione si fonda non tanto sull'azione chimica, quanto su quella fisica, e, denominata impedimento sterico, dall'inglese *steric hindrance*, consiste nella formazione, intorno ai granuli, di lunghe catene neutre ad opera dei superfluidificanti. Avvolgendo le singole particelle di

cemento, agiscono da distanziatori e impediscono loro di attrarsi e di flocculare. Questa azione fisica, dopo anni di ricerca, rende l'impiego dei superfluidificanti più percorribile e più disinibito e crea finalmente le premesse per dissipare la consolidata diffidenza nei confronti degli additivi in genere e dei fluidificanti in particolare. L'azione di queste sostanze è anche chimica e, sia pur molto limitata, ha il compito di rallentare la fase di idratazione per conservare le condizioni di elevata lavorabilità.

L'azione di impedimento sterico è maggiore con il polietere (Fig. 63), per effetto della maggiore lunghezza delle catene neutre, e riesce a massimizzare l'azione fisica rispetto a quella chimica, che, a sua volta, essendo ridottissima va a tutto vantaggio degli impieghi nelle miscele per i calcestruzzi prefabbricati. Di contro, la maggiore quantità di gruppi carbossilici nel poli-acrilato (Fig. 64) determina un'azione chimica, di poco superiore rispetto a quella del poli-etero, che rallenta maggiormente l'idratazione e consente nei calcestruzzi preconfezionati una maggiore conservazione della lavorabilità durante il trasporto dalla centrale di betonaggio al cantiere (Fig. 65).

L'azione fisica, prevalente nei superfluidificanti poliacarbossilici rispetto a quella chimica, favorisce l'impiego e consente un'idratazione più spinta dei granuli di cemento, consentendo un dosaggio del legante più preciso. L'impiego può essere mirato a due obiettivi diversi: quello di aumentare la deformabilità allo stato fresco, a parità di acqua di impasto, oppure quello di aumentare la resistenza abbassando il rapporto a/c. E questo secondo tipo di impiego è specifico degli autocompattanti.

Negli autocompattanti, l'impiego di questo additivo è assolutamente necessario per ottenere una deformabilità così elevata da garantire alla miscela di disporsi nei casseri

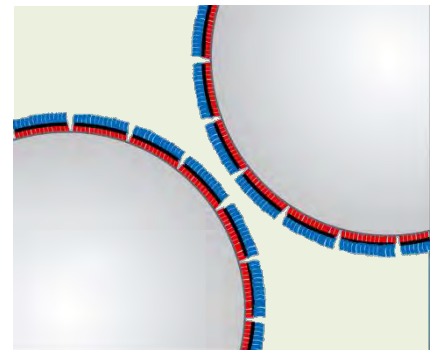
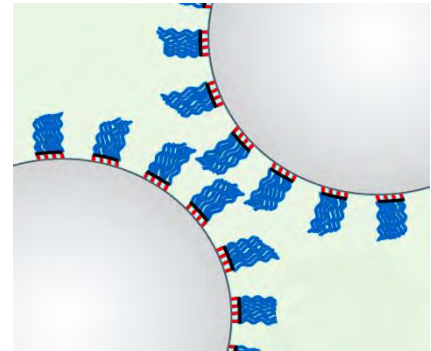
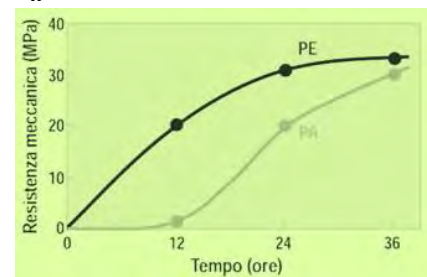


Fig. 63 Impedimento sterico del polietere / Steric hindrance of polyether

Fig. 64 Impedimento sterico del poli-acrilato / Steric hindrance of polyacrylate

Fig. 65 Effetti del polietere e del poli-acrilato sulla resistenza / Polyether and polyacrylate effects on resistance



autonomamente e solo per azione del peso proprio, sia pur conservando un rapporto a/c piuttosto contenuto.

Ma, nei conglomerati autocompattanti più performanti si rende necessario un altro tipo di additivo, il modificatore di viscosità, individuato dall'acronimo VMA (*Viscosity Modifying Agent*). Si tratta di sostanze allo stato liquido, introdotte negli impasti con appositi dosatori, che manifestano una limitata interferenza sulla reazione di idratazione del cemento. Gli additivi di questo tipo sono idrosolubili e agiscono sulla superficie dei granuli di cemento in modo da essere assorbiti, per poi modificare le proprietà reologiche della miscela in modo da ridurre la viscosità, conservando la coesione interna. Gli agenti modificatori di viscosità impiegati per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti, relativamente più recenti, sono prodotti a base di cellulosa o polimeri, utilizzati nelle centrali di betonaggio.

L'azione che determinano, allo stato fresco, è quella di creare catene polimeriche allungate che orientano il fluido trasportatore nella direzione di scorrimento, con l'effetto di migliorare ulteriormente il flusso degli inerti grossi. In tal modo, si riduce notevolmente il numero di collisioni degli elementi lapidei di dimensioni maggiori, il cosiddetto *blocking*, in corrispondenza delle armature e delle riduzioni di sezione dei casseri. Dunque, l'azione è duplice: diminuzione della viscosità e resistenza alla segregazione della miscela, effetti differenti che si ottengono rispettivamente nelle condizioni di quiete e di moto della miscela. In particolare, per quanto attiene alla diminuzione della viscosità, finalizzata al mantenimento della coesione interna del calcestruzzo durante la fase di getto, sono le catene polimeriche allungate dell'additivo che si orientano secondo la direzione di scorrimento della miscela, in modo da agevolarne la movimentazione sia pur conservando la coesione interna.

Inoltre, le stesse catene polimeriche allungate esercitano, a riempimento avvenuto dei casseri, quando il calcestruzzo è in quiete, un'azione aggregante che migliora notevolmente la resistenza alla segregazione interna.

L'agente viscosizzante, dunque, permette in questo modo di perfezionare la reologia delle miscele aumentando tanto la capacità di scorrimento che presiede all'autocompattabilità, quanto la coesione nelle condizioni in cui è richiesta una grande stabilità a garanzia dal rischio di segregazione.

Anche gli additivi ritardanti, protraendo nel tempo lo sviluppo della coesione interna, determinano una riduzione della viscosità plastica con effetti benefici sulle capacità di scorrimento della miscela, ma, di contro, stimolano fenomeni di segregazione e allungano i tempi di esercizio delle spinte sui i casseri. Il loro impiego, dunque, non ha che il senso di conservare il più a lungo possibile le condizioni di lavorabilità.

2.6 Composizioni teoriche a confronto

La principale differenza compositiva tra un calcestruzzo ordinario ed uno autocompattante è riconoscibile nei due esempi a confronto (Fig. 66), dai quali si evidenzia per prima cosa la presenza dei due nuovi componenti, gli aggregati finissimi e l'additivo superfluidificante. Ipotizzando di avere pari quantitativo di cemento si rende necessaria, nella miscela autocompattante, una minore quantità d'acqua perché il superfluidificante esercita un'azione deflocculante, con conseguente maggior sfruttamento dell'azione legante del cemento (Fig. 66). Inoltre, si nota per gli aggregati un aumento della frazione più fine e una certa diminuzione di quella più grossa. Nella tabella si riportano le quantità dei componenti per un calcestruzzo ordinario, posto in opera mediante vibrazione, e un calcestruzzo autocompattante,

C.O.	composizione in Kg/m³		SCC
quantità		componenti	quantità
350	Kg	cemento	Kg 350
195	litri	acqua	litri 185
---		aggregati finissimi	Kg 150
550	Kg	aggregati fini 0-2 mm	Kg 850
700	Kg	aggregati fini 2-8 mm	Kg 400
550	Kg	aggregati grossi 8-16 mm	Kg 400
---		superfluidificante	litri 8,5

Fig. 66 Confronto tra composizioni di un CO e di SCC, a pari quantità di cemento / *Comparison of compositions of a CO and a SCC, with the same amount of cement*

Fig. 67 Confronto tra resistenze di un CO e di SCC, a pari quantità di cemento / *Comparison of resistance of a CO and a SCC, with the same amount of cement*

sottoposto ad un'accurata stagionatura.

Al vantaggio dell'autocompattabilità allo stato fresco si aggiunge, allo stato indurito, un incremento dei valori di resistenza a compressione, particolarmente rilevante alle brevi stagionature. Come si evince dal confronto dei risultati, gli incrementi di resistenza a sette giorni raggiungono il massimo e superano largamente il 50 %. Prevedibile è l'aumento di ritiro nella composizione della miscela autocompattante, che, a parità di cemento, è dovuto soltanto alla mancata azione di contrasto dello scheletro solido (Fig.67).

C.O.		risultati		SCC
normale		stagionatura		accurata
17,3	N/mm²	resistenza a compressione a 2 gg	N/mm²	23,6
20,1	N/mm²	resistenza a compressione a 7 gg	N/mm²	32,8
38,0	N/mm²	resistenza a compressione a 28 gg	N/mm²	42,0
389	μ/m	ritiro	μ/m	454

Interessante appare anche il confronto tra due composizioni entrambe autocompattanti, progettate con l'intento di ottenere lo stesso valore di resistenza. Nelle figure (Figg. 68 e 69) sono indicate rispettivamente le quantità e le percentuali dei componenti e i rapporti acqua/cemento.

Figg. 68 e 69 Confronto tra due composizioni di SCC, a parità di resistenza / Comparison of compositions of two different SCC, with the same resistance

SCC 1			SCC 2			
quantità		componenti		quantità		
400	Kg	cemento	Kg	380		
190	lt	acqua	lt	171		
31 %	570	Kg	aggregati finissimi	Kg	345	19 %
40 %	720	Kg	aggregati fini 0/4 mm	Kg	583	32 %
15 %	270	Kg	aggregati fini 4/8 mm	Kg	383	21 %
14 %	250	Kg	aggregati grossi 8/16 mm	Kg	507	28 %
	2,45	lt	superfluidificante	lt	2,17	
	A/C=0,475		Rck = 55 N/mm ²		A/C = 0,45	

Dal confronto risulta evidente quanto il variare della quantità di un componente si ripercuota sulle altre, in maniera inversa. Nella seconda composizione, infatti, la maggiore quantità di aggregato grosso e la conseguente minore quantità di aggregato fino e finissimo determinano una superficie specifica da legare minore, con conseguenti minori quantità sia di cemento, che di acqua di impasto, riducendosi anche l'aliquota di acqua di bagnatura. Anche la quantità di additivo che ne consegue risulta minore.



2.7 Composizioni di realizzazioni celebri

L'analisi delle composizioni di alcune opere di architettura emblematiche ha un certo rigore metodologico, fondamentale ai fini di una conoscenza di valore scientifico di un sistema tecnologico, che anagraficamente è vecchio, soprattutto dal punto di vista dei giapponesi, ma deve ancora crescere nella realtà europea, perché, come sempre, solo la sperimentazione del tempo può consentire a un sistema tecnologico "avanzato", di guadagnare sul campo la sistematizzazione necessaria.

Il calcestruzzo è di per sé un enunciato tecnologico moderno, che, dalla rivoluzione industriale in avanti, ha ancora bisogno di dimostrare le sue "reazioni" al tempo, per poter competere con la cultura più che consolidata della pietra. Ciò significa che la durabilità, come politica di previsione prestazionale pre-progettuale è appena iniziata e deve compiere ancora molti passi per guadagnare una sua stabilità. In tal senso, l'autocompattante è nato con una prospettiva di industrializzazione in cantiere, che è già un inizio di livello superiore, ma un'analisi delle realizzazioni, in termini di problemi, difficoltà, sfide e traguardi che ogni esperienza materializzata offre in tutta la sua specificità, è metodologicamente importante sia dal punto di vista formativo, che professionale.

Ogni realizzazione è un'esperienza reale polivalente, che innesca un percorso di tipo induttivo dal particolare al generale, di risalita verso una posizione che, nel costituire un riferimento operativo per coloro che dovranno cimentarsi in futuro, guadagna un riconosciuto valore metodologico. Oggi, in una logica più internazionale, che ahimè ci allontana dalla nostra cultura, si potrebbe far riferimento all'espressione *Bottom up*, che si riferisce a un processo di sintesi che generalizza. Insieme all'espressione *Top down* che significa

modello generale da scomporre, sono due strategie di elaborazione di informazioni riguardanti il software, mutuata da questo ambito ed accolte, per estensione, sia all'ambito umanistico che scientifico.

L'analisi della composizione del calcestruzzo autocompattante della chiesa di S. Pietro Apostolo a Pescara (Fig. 70) consente di effettuare alcune considerazioni sul significato intrinseco della miscela ed altre maggiormente relazionate alla specificità del progetto e agli obiettivi che i progettisti, architetti Dal Re e colleghi, si erano prefissi. La scelta del calcestruzzo a faccia vista bianco per la vela della chiesa determina la necessità di prevedere, oltre al cemento bianco, anche gli inerti bianchi per cui ci si è orientati verso il marmo frantumato. La parete in calcestruzzo, con generatrice curvilinea, pone un altro problema, quello della durabilità in ambiente marino, trattandosi di un contesto molto vicino al mare, come quello di Pescara.

La classe di esposizione XS prevede per le costruzioni esposte ad atmosfera salina alcuni requisiti minimi, che vincolano la composizione limitando il rapporto a/c ed elevando sia la resistenza caratteristica, che la quantità di cemento. Dalla figura 70, si evince un dosaggio di cemento tipico per un autocompattante e abbastanza elevato per rispondere al minimo quantitativo di cemento imposto per garantire la durabilità. Inoltre, anche il rapporto a/c pari a 0.45 è quello minimo per l'ambiente marino, e cioè è tale da evitare rischi di degrado anche nelle peggiori condizioni ambientali, quale l'immersione del conglomerato nella zona delle maree, o quando sussista la possibilità che la superficie sia soggetta a spruzzi di acqua di mare. Il filler calcareo, oltre al ruolo di componente finissimo che riveste nell'autocompattante, insieme al cemento bianco e all'aggregato in marmo frantumato, risponde al requisito

composizione SCC - S. Pietro Apostolo (PE)		
cemento II/B-L 32.5 R bianco	400	Kg
filler calcareo	100	Kg
pietrisco 2-16 mm	875	Kg
sabbia 0-2 mm	440	Kg
sabbia 0-5 mm	430	Kg
acqua	180	lt
superfluidificante acrilico	9,6	lt
viscosizzante	0,12	lt
A/C = 0,45 ambiente marino		

Fig. 70 Composizione SCC della chiesa di S. Pietro Apostolo (PE) / SCC composition used in the church of St. Peter the Apostle (PE)



Fig. 71 Casseri SCC della chiesa di S. Pietro Apostolo (PE) / SCC formwork of the Church St. Peter the Apostle (PE)

Fig. 72 Armature prima del getto di SCC nel World Trade Center di Foster a San Marino / Armors before the SCC jet in the World Trade Center by Forester in San Marino



estetico del bianco a faccia vista. La quantità di additivo superfluidificante si attesta intorno a valori di poco superiori al 2 % rispetto al peso di cemento.

La scelta del facciavista richiede attenzione anche per quanto attiene alla scelta delle casseforme, che sono metalliche in questo caso (Fig. 71), e che per ragioni di qualità e di natura costruttiva devono essere a perfetta tenuta, in modo da non lasciar rifluire la parte più acquosa della miscela, che limiterebbe localmente il quantitativo di cemento necessario per l'idratazione.

La realizzazione del World Trade Center di San Marino ripropone altre problematiche tipiche dell'autocompattante, legate ai requisiti intrinseci nelle potenzialità di questa miscela. La richiesta del progettista Norman Foster and Partners è quella di calcestruzzo altamente performante, capace di elevate prestazioni meccaniche sia per un'estetica della struttura, che per una libertà planimetrica. Si delineano due obiettivi congiunti: una estrema discretizzazione degli elementi portanti, strutturati su ampi interassi e dotati di snellezza; una pianta molto più libera per ragioni funzionali, quali la massima fruibilità sia degli spazi destinati ad attività commerciali, che al parcheggio delle auto. Questi due obiettivi progettuali convergono nella direzione di una resistenza meccanica molto elevata, cui conseguono sezioni con armature molto fitte e particolarmente congestionate nelle zone più sollecitate, che soltanto un calcestruzzo come l'autocompattante può garantire (Fig. 72). La costruzione a molti piani si sostiene su esili pilastri caratterizzati da una resistenza di 90 N/mm².

L'analisi della composizione (Fig. 73) evidenzia un alto tenore di cemento, presupposto per un'elevata resistenza allo stato indurito insieme al bassissimo rapporto a/c, che raggiunge con lo 0.37 un valore da record. Per quanto attiene

agli altri componenti, si può notare che il fumo di silice, dosato in quantità contenuta in modo tale da non far crescere il quantitativo di acqua e mantenere basso il rapporto $a/(c+filler)$, presiede, insieme all'additivo superfluidificante, alla garanzia di una miscela scorrevole, ovvero alla capacità dell'autocompattante di disporsi agevolmente nei casseri e di riempire gli spazi ristretti tra le armature fitte. Il superfluidificante, oltre a contribuire all'autocompattabilità, mantenendo basso il rapporto a/c , con dosaggio pari circa al 1% del peso di cemento, limita il fenomeno della flocculazione dei granuli di cemento, con un'azione prevalentemente fisica, a tutto vantaggio della massimizzazione della reazione di idratazione, con evidente garanzia di resistenza elevata ed uniforme.

Le dimensioni dell'aggregato grosso si attestano intorno a valori medi rispetto ai limiti per avvalersi dell'azione dello scheletro resistente. Di grande interesse è la valutazione delle resistenze, come azione preventiva e di controllo. Eccezionale è la resistenza meccanica a compressione valutata sui cubetti che parte da 50 N/mm^2 , dopo soltanto un giorno di stagionatura, e raggiunge i 95 N/mm^2 a 28 giorni. Inoltre, per una valutazione del risultato effettivamente conseguito, sono stati portati a rottura quattro provini cilindrici ricavati da una carota lunga un metro, estratta dall'interno della struttura realizzata dopo 21 giorni, che, con valori compresi tra un massimo di 83 N/mm^2 e un minimo di 78 N/mm^2 , dimostrano quanto la prestazione meccanica raggiunta sia eccezionale già a 21 giorni, ma soprattutto molto uniforme (Fig.74).

La storia della definizione della composizione delle fondazioni del ponte di Calatrava a Venezia racchiude nella sua evoluzione un altro insegnamento metodologicamente molto importante.

Progettato dal grande architetto-ingegnere Santiago

composizione SCC - World Trade Center		
cemento CEM II A/L 42.5 R	465	Kg
fumo di silice (filler)	65	Kg
acqua	175	lt
ghiaia 15-22 mm	195	Kg
ghiaia 6-15 mm	720	Kg
sabbia 0-6 mm	710	Kg
superfluidificante acrilico	4,6	lt
A/C = 0,37		
A/(C+filler) = 0,33		

Fig. 73 Composizione SCC del World Trade Center di Foster a San Marino / SCC composition used in the World Trade Center in San Marino

Fig. 74 Resistenza meccanica a compressione di una carota eseguita dopo il getto del World Trade Center / Mechanical compression resistance of a carrot performed after the jet of the World Trade Center

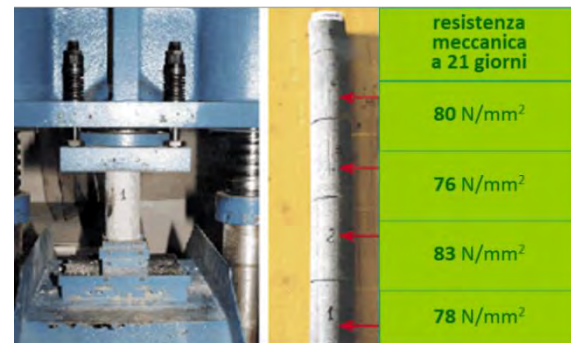




Fig. 75 Il ponte di S. Calatrava a Venezia / *The "Bridge by S. Calatrava in Venice*

Calatrava, il ponte della Costituzione (Fig. 75), che è il quarto sul Canal Grande a Venezia, richiede fondazioni costituite da diaframmi profondi ben più di 20 metri, con struttura scatolare rigida e una gabbia di armature così fitte da rendere necessaria una miscela così fluida e scorrevole da essere capace di attraversarle (Fig.76). Inoltre, pone anche il problema del costruire nel costruito storico, che nel contesto della città di Venezia, appare un limite ancor maggiore.

Dopo il ponte Rialto, unico fino alla metà dell'Ottocento, e i due ponti costruiti dagli austriaci, il Ponte degli Scalzi in

pietra e il ponte dell'Accademia in legno e acciaio, arriva il quarto ponte sul Canal Grande per strutturare un ulteriore collegamento tra le sponde opposte in corrispondenza della Stazione di Santa Lucia e Piazzale Roma. Più famoso, oggi, per le numerose polemiche, sia di ordine strutturale che architettonico, proliferate nei primi anni dopo la sua realizzazione, incontra in sede di progetto e di esecuzione alcuni momenti felici che è necessario riconoscere.

La scelta di Calatrava è orientata verso una soluzione molto leggera, per quanto la luce da superare sia di circa 80 metri, in nome di un dovuto senso di rispetto nei confronti del paesaggio lagunare preesistente.

Un unico arco molto ribassato con una forma semplice e discreta, ingentilita soltanto da sezioni variabili lungo l'asse trasversale, che con morbide linee realizza una struttura molto leggera.

L'unico vezzo è il colore rosso che, al di là delle interpretazioni antropomorfe, caratterizza la carpenteria metallica, formata da sezioni a cassone disposte in modo radiale rispetto alla linea dell'arco. Alla leggerezza della struttura metallica fa da contraccolpo una fondazione molto profonda e molto armata, realizzata con una miscela autocompattante. La pietra d'Istria, che si alterna al vetro strutturale nella definizione dei gradini, ritorna nel rivestimento delle spalle in calcestruzzo (Figg. 77 78). La difficoltà di intervenire così in profondità, in un contesto densamente costruito, ha incontrato, inoltre, il vantaggio di gettare una miscela che non necessitasse di vibrazione, limitando sia pur relativamente gli impatti sulle costruzioni prospicienti.

La composizione incontra una sua prima definizione riportata nella prima colonna della Fig.79 che ripropone nuovamente il tema della durabilità in ambiente marino con



Fig. 76 Armature prima del getto di SCC nel ponte di S. Calatrava a Venezia / Armors before the SCC jet in the Bridge by S. Calatrava in Venice

Fig. 77 Spalla del ponte della Costituzione rivestita / Shoulder of the Bridge by S. Calatrava "covered



Fig. 78 Pietra e vetro strutturale nel ponte di S. Calatrava a Venezia / *Stone and structural glass in the bridge by S. Calatrava in Venice*



limite di rapporto a/c pari a 0.45. La scelta del diametro massimo dell'aggregato lapideo di 16 mm è da porsi in relazione con la distanza tra le armature. Le proporzioni tra le dimensioni e le quantità degli aggregati si relazionano ad un dosaggio di cemento non eccessivamente alto per un autocompattante. La scelta del tipo di cemento si relaziona alla disponibilità del produttore, che per ragioni commerciali ne ha determinato l'impiego, con conseguente valore di resistenza ben superiore a quanto imposto dalla normativa per la durabilità, che prevede una classe di resistenza C 35/45 N/mm². Anche il rapporto a/c piuttosto basso garantisce le buone prestazioni meccaniche, che si configurano come un'ulteriore riserva in tal senso.

L'azione del superfluificante è ormai ben chiara, ma, trattandosi del calcestruzzo di un elemento strutturale importante per la stabilità dell'intera opera, l'azione del viscosizzante serve a garantire la necessaria coesione al getto

Composizione SCC fondazioni ponte della Costituzione Venezia		
cemento CEM II A-LL 42.5 R	340 Kg/m ³	350 Kg/m ³
filler calcareo	190 Kg/m ³	200 Kg/m ³
ghiaia 4 - 12 mm	710 Kg/m ³	700 Kg/m ³
sabbia 0,125 - 4 mm	1060 Kg/m ³	1075 Kg/m ³
acqua	150 lt/m ³	157 lt/m ³
superfluidificante	5 Kg/m ³	5 Kg/m ³
viscosizzante	7 Kg/m ³	5 Kg/m ³
durabilità - classe XS2 a/c ≤ 0,45 Rck > 45 MPa	a/c = 0,44	a/c = 0,45
	Rck=60 N/mm ²	Rck=50N/mm ²

Fig. 79 Composizione SCC della fondazione del ponte di S. Calatrava a Venezia / SCC
Composition made for the foundations in the Bridge by S. Calatrava in Venice

appena eseguito quando è ancora allo stato fresco, nei limiti dell'autocompattabilità.

Alla definizione della composizione ha fatto seguito una serie di prove preliminari sul campo, eseguite a scopo cautelativo, al fine di verificare la pompabilità della miscela. I risultati ottenuti hanno evidenziato, sia pur in condizioni di buona autocompattabilità, un effetto coesivizzante un po' eccessivo che rallentava la portata del getto in arrivo rispetto a quello della superficie appena gettata.

La ridefinizione, che si è resa necessaria, ha sostanzialmente introdotto piccoli aggiustamenti, ordinati secondo un criterio che parte da un punto fermo, che è il rapporto a/c pari 0.45, e prosegue riducendo la quantità di additivo viscosizzante, che, a sua volta, determina un incremento di cemento. Un percorso metodologico d'esempio dal punto di vista del progetto della composizione, che trova il suo sostegno nel valore aggiunto dei test sul campo.



Fig. 80 Spalla del ponte di S. Calatrava a Venezia dopo lo scassero / *Shoulder of the Bridge by S. Calatrava in Venice after the formwork removal*







La stagionatura dell'autocompattante è stata eseguita avvalendosi di soluzioni tradizionali, quali la posa di teli impermeabili, costantemente inumiditi con acqua per svariati giorni, sulla superficie a vista del calcestruzzo, al termine del getto (Fig. 80).


QUADRO NORMATIVO

Composizione della miscela (Mix Design)

 **UNI 11040:2003** Calcestruzzo autocompattante - Specifiche, caratteristiche e controlli
Stato: RITIRATA SENZA SOSTITUZIONE
Data entrata in vigore: 01 marzo 2003
Data ritiro: 05 marzo 2015 

 **UNI EN 206:2016** Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016
Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006 

 **Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 17.01.2018)**
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 22 marzo 2018
Sostituisce: Norme Tecniche delle Costruzioni del 2008 

 **Linee Guida Europee** per il Calcestruzzo Autocompattante - Specifica, Produzione e Utilizzo (maggio 2005)

Componenti

Cemento

UNI EN 197-1:2011 Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 06 ottobre 2011

Sostituisce: UNI EN 197-1:2007, UNI EN 197-4:2005

Aggregati

UNI 8520-1:2015 Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Parte 1: Designazione e criteri di conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 22 ottobre 2015

Sostituisce: UNI 8520-1:2005

UNI EN 12620:2008 Aggregati per calcestruzzo

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 11 settembre 2008

Sostituisce: UNI EN 12620:2003

UNI EN 13055:2016 Aggregati leggeri

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 16 giugno 2016

Sostituisce: UNI EN 13055-1:2003 e UNI EN 13055-2:2005

Additivi

UNI EN 206:2016 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016

Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006

UNI EN 934-2:2012 Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Parte 2:
Additivi per calcestruzzo – Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura

Data entrata in vigore: 12 luglio 2012

Sostituisce: UNI EN 934-2:2009

Acqua di miscela

UNI EN 1008:2003 Acqua d'impasto per il calcestruzzo – Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di recupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 01 aprile 2003

Recepisce: EN 1008:2002

Aggiunte minerali

UNI EN 206:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016

Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006

UNI 11104:2016 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 14 luglio 2016

Sostituisce: UNI 11104:2004

Aggiunte minerali di tipo I (inerti)

UNI EN 12620:2008 Aggregati per calcestruzzo

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 11 settembre 2008

Sostituisce: UNI EN 12620:2003

Aggiunte minerali di tipo II (pozzolane o ad attività idraulica latente)

UNI EN 450-1:2012 Ceneri volanti per calcestruzzo – Parte 1: Definizione, specificazioni e criteri di conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 04 ottobre 2012

Sostituisce: UNI EN 450-1:2007 e UNI EN 450-1:2005

UNI EN 13263-1:2009 Fumi di silice per calcestruzzo – Parte 1: Definizioni, requisiti e criteri di conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 18 giugno 2009

Sostituisce: UNI EN 13263-1:2005

UNI EN 13263-2:2009 Fumi di silice per calcestruzzo – Parte 2: Valutazione della conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 18 giugno 2009

Sostituisce: UNI EN 13263-2:2005

UNI EN 15167-1:2006 Loppa d'altoforno granulata macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 05 dicembre 2006

Recepisce: EN 15167-1:2006

UNI EN 15167-2:2006 *Loppa d'altoforno granulata macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Parte 2: Valutazione della conformità*

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 05 dicembre 2006

Recepisce: EN 15167-2:2006

Linee Guida Europee per il Calcestruzzo Autocompattante – Specifica, Produzione e Utilizzo (maggio 2005)

Proprietà reologiche

UNI EN 206:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016
Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006

UNI EN 12350-8:2010 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 8: Calcestruzzo autocompattante - Prova di spandimento e del tempo di spandimento
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 09 settembre 2010
Sostituisce: UNI 11041:2003

UNI EN 12350-9:2010 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 9: Calcestruzzo autocompattante - Prova del tempo di efflusso
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 03 marzo 2011
Sostituisce: UNI 11041:2003

UNI EN 12350-10:2010 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 10: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante scatola ad L
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 03 marzo 2011
Sostituisce: UNI 11041:2003

UNI 11044:2003 Prova sul calcestruzzo autocompattante fresco - Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad U
Stato: RITIRATA SENZA SOSTITUZIONE
Data entrata in vigore: 01 marzo 2003

Data ritiro: 07 maggio 2015

UNI EN 12350-12:2010 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 12: Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante anello J

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 24 aprile 2012

Sostituisce: UNI 11041:2003

UNI EN 12350-11:2010 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 11: Calcestruzzo autocompattante - Prova di segregazione mediante setaccio

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 09 settembre 2010

Recepisce: EN 12350-11:2010

Linee Guida Europee per il Calcestruzzo Autocompattante - Specifica, Produzione e Utilizzo (maggio 2005)

Comportamento meccanico

UNI EN 206:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016

Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006













UNI EN 1992-1-1:2015 Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 16 aprile 2015

Sostituisce: UNI EN 1992-1-1:2005

Definizione delle prestazioni

-  **UNI EN 206:2016** Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016
Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006 
-
-  **UNI EN 12390-3:2009** Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza alla compressione dei provini
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 14 maggio 2009
Sostituisce: UNI EN 12390-3:2003 
-
-  **UNI EN 12390-5:2009** Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza a flessione dei provini
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 14 maggio 2009
Sostituisce: UNI EN 12390-5:2002 
-
-  **UNI EN 12390-6:2010** Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza a trazione indiretta dei provini
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 21 gennaio 2010
Sostituisce: UNI EN 12390-6:2002 
-
-  **UNI EN 12390-7:2010** Prova sul calcestruzzo indurito - Massa volumica del calcestruzzo indurito
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 14 maggio 2009
Sostituisce: UNI EN 12390-7:2002 
-
-  **UNI EN 11307-7:2008** Prova sul calcestruzzo indurito - Determinazione del ritiro
Stato: IN VIGORE
Data entrata in vigore: 06 novembre 2008
Sostituisce: UNI 6555:1973 e UNI 7086:1972 

Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale - Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale

Data entrata in vigore: 30 marzo 2017

Sostituisce: **Linee Guida** del C.S.L.P. del 2008

Durabilità e classi di esposizione

UNI EN 206:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 01 dicembre 2016

Sostituisce: UNI EN 206:2014, UNI EN 206-9:2010 e UNI EN 206-1:2006

UNI 11104:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 14 luglio 2016

Sostituisce: UNI 11104:2004

Guide to durability of building elements, products and components - British Standard 7543

Linee Guida Europee per il Calcestruzzo Autocompattante - Specifica, Produzione e Utilizzo (maggio 2005)

Consegna e accettazione provini

UNI EN 12350-1:2009 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 1: Campionamento

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 14 maggio 2009

Sostituisce: UNI EN 12350-1:2001

UNI EN 12390-2:2009 Prova sul calcestruzzo indurito - Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 14 maggio 2009

Sostituisce: UNI EN 12390-1:2002

UNI EN 12390-1:2012 Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 11 ottobre 2012

Sostituisce: UNI EN 12390-1:2002

Fibre

UNI EN 14889-1:2006 Fibre per calcestruzzo - Parte 1: Fibre di acciaio - Definizioni, specificazioni e conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 05 dicembre 2006

UNI EN 14889-2:2006 Fibre per calcestruzzo - Parte 2: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 05 dicembre 2006

UNI 11188:2007 Elementi strutturali di calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio - Progettazione, esecuzione e controllo

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore: 28 marzo 2007

UNI 11039-1:2003 Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione

Stato: IN VIGORE

Data entrata in vigore 01 febbraio 2003

Altre disposizioni per calcestruzzi ad alte prestazioni

Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni per l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni CNR-DT 209:2013 introduce calcestruzzi autocompattanti (cap.2.6) e calcestruzzi autocompattanti fibrorinforzati (cap.2.7) tra i calcestruzzi ad alte prestazioni.

Data pubblicazione 10 ottobre 2013

documento **ACI 237 R-07 (2007)** presenta uno stato dell'arte sui calcestruzzi autocompattanti, con riferimento alle proprietà allo stato fresco ed indurito, ed alla loro misura.

documento **fib Model Code (2010)** contempla calcestruzzi con resistenza cilindrica caratteristica a compressione fino a 120 MPa. Il documento fib Model Code (2010) si basa sulle definizioni introdotte dal documento ISO 22965- 1 (2007) e ISO 22965-2 (2007).

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

G. Ausiello, S. D'Agostino (2016), *Innovazione e Conservazione: nuovi materiali e realtà virtuali*, in G. Biscontin, G. Driussi (a cura di), *Eresia ed ortodossia nel restauro progetti e realizzazioni*, Atti del XXXII Convegno Internazionale di Bressanone, Marghera (VE), Edizioni Arcadia Recherche.

M. Collepardi, S. Collepardi, R. Troli (2015), *Il Nuovo Calcestruzzo*, Edizione 6, Tintoretto, Treviso.

G. Ausiello (2014), *Il carattere mutevole e interattivo dei materiali nella storia del costruire*, in S. D'Agostino, G. Fabbricatore (a cura di), *History of Engineering*, Atti del V Convegno di Storia dell'Ingegneria, Cuzzolin Ed., Napoli.

V. Gentile (2014), *SCC Self Compacting Concrete*, architecture and design ed., Bari.

M. Collepardi, A. Borsoi (2014), *Il mix-design ed il ritiro igrometrico del calcestruzzo*, in «Enco Journal» n.61, Ponzano Veneto (TV).

M. Collepardi (2013), *Speciale additivi* «Enco Journal» n.59, Ponzano Veneto (TV)

V. Corinaldesi, G. Moriconi (2013), *Influenza del volume di fibre sul comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato* in «Enco Journal» n.60, Ponzano Veneto (TV).

M. Collepardi (2012), *Gli additivi per il calcestruzzo. Come funzionano e come si impiegano*, Tintoretto, Villorba (TV).

C. Della Mura, E. Simonato (2012), *Architettura e nanotecnologie*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova.

A. Faresin (2012), *Architettura in calcestruzzo. Soluzioni innovative e sostenibilità*, UTET, Torino.

C. Andriani (a cura di) (2011), *Le forme del cemento Dinamicità*, Gangemi, AITEC, Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, Roma

M. Collepardi (2011), *Dizionario enciclopedico del calcestruzzo*, Tintoretto, Villorba (TV).

G. Ferro, M. Ipperico, S. Musso, A. Tagliaferro, J. M. Tulliani (2009), *Calcestruzzo autocompattante nanorinforzato (CNTSCC): proprietà meccaniche e potenzialità*, in Atti del XX Convegno Nazionale IGF, Torino.

M. Collepardi, S. Collepardi e R. Troli (2008), *Mix design del calcestruzzo*, Tintoretto, Villorba (TV).

C. Andriani (a cura di) (2008), *Le forme del cemento Leggerezza*, Gangemi, AITEC, Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, Roma

M. Collepardi (2008), *Dal calcestruzzo antico a quello moderno parte II - calcestruzzo romano*, in «Enco Journal» n.43, Ponzano Veneto (TV).

A. Borsoi, J.J. Ogoumah Olagot, R. Troli (2008), *Influenza della compattazione del calcestruzzo fresco sulla resistenza meccanica del calcestruzzo in opera*, in «Enco Journal» n. 41, Ponzano Veneto (TV).

M. Collepardi, G. Marchese, M. Odoardi (2008), *Il calcestruzzo 3-SC per il MAXXI di Roma*, in «Enco Journal» n. 40, Ponzano Veneto (TV).

- S. Collepardi, F. Simonelli, R. Troli (2008), *Novità nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 Gennaio 2008)*, in «Enco Journal» n. 40, Ponzano Veneto (TV).
- G. De Schutter, K. Audenaert (editind by) (2007), *Durability of self-compacting concrete. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 205-DSC*, RILEM Publications SARL, Paris.
- E. Sicignano (2007), *Architetture in cemento armato*, Clean, Napoli.
- L. Coppola (2007), *Concretum*, I Edizione, Editore Mc Graw-Hill, Milano.
- G. Iannaccone (2007), *Materiali sostenibili. Inerti low-tech*, in «Modulo», vol. 328, BE-MA, Milano.
- T. Izumi, S. Dikty, H. Yamamuro (2007), *Nuovi agenti viscosizzanti per il calcestruzzo autocompattante*, in «Enco Journal» n.36, Ponzano Veneto (TV).
- A. Borsoi, M. Collepardi, S. Collepardi, E. N. Croce (2006), *Cenere volante “beneficiata” a confronto con cenere volante normale e fumo di silice*, in «Enco Journal» n.33, Ponzano Veneto (TV).
- C. Andriani (a cura di) (2006), *Le forme del cemento Plasticità*, Gangemi, AITEC, Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, Roma
- S. Collepardi, R. Troli (2005), *Stagionatura del calcestruzzo: perché è così importante e perché così disattesa?*, in «Enco Journal»n. 28, Ponzano Veneto (TV).
- M. Collepardi, S. Collepardi e R. Troli (2004), *Il calcestruzzo logico. Manuale del mix design*. Tintoretto, Villorba (TV).\
- V. Alunno Rossetti (2003), *Il Calcestruzzo, Materiali e Tecnologia*, Editore Mc Graw-Hill, Milano.
- M. Collepardi, A.Borsoi, S. Collepardi, F. Simonelli, R. Troli (2003), *3-Self-Concrete (3SC): la prossima sfida. Parte I Calcestruzzo autocompattante. Produzione, Messa in opera e prescrizioni* in «Enco Journal» n. 24
- M. Collepardi, A.Borsoi, S. Collepardi, G. Fazio, J.J. Ogoumah Olagot (2003), *3-Self-Concrete (3SC): la prossima sfida. Parte II: Calcestruzzo auto-stagionante, auto-compresso, ed autocompattante* in «Enco Journal» n. 24 Ponzano Veneto (TV).
- D. Benetti (2002), *Innovations in concrete*, Thomas Telford, Londra.
- V. Corinaldesi, G. Moriconi (2002), *I materiali inerti da demolizione nelle malte e nei calcestruzzi: nuove prospettive*, Tecycling, demolizioni & riciclaggio n.2, pp.95-99.
- H. Okamura, M. Ouchi (1999) *Self-compacting concrete. Development, present use and future*”, in Proceedings of the First International RILEM Symposium on “Self-Compacting Concrete”, RILEM Publications S.A.R.L., Stockholm.
- R. Amadelli, T. Bonato, L. Cassar, C. Pepe, N. Pimpinelli (1997), *Materiali cementizi e fotocatalisi*, in Seminario FAST «Materiali: Ricerca e Prospettive Tecnologiche alle soglie del 2000», Federazione delle Associazioni Scientifiche e tecniche, Milano.

www.italcementi.it
www.calcestruzzi.it
www.addiment.it
www.netconcrete.info
www.encosrl.it
www.uni.com
www.efnarc.org

www.inconcreto.net
www.nanotec.it
www.archweb.it
www.archiportale.com
www.area-arch.it
www.edilia2000.it
www.ilsole24ore.com/art/cultura/

Finito di stampare
nel mese di luglio 2018
per conto della LUCIANO EDITORE – Napoli
[www. lucianoeditore.net](http://www.lucianoeditore.net)

Gigliola Ausiello, ingegnere, è professore associato di Architettura Tecnica presso il DICEA dell'Università di Napoli Federico II, dove insegna Tecnologie Edilizie Innovative e Architettura Tecnica nei corsi di laurea in Ingegneria Edile. Autore di varie pubblicazioni, studia e sperimenta materiali e tecniche innovativi, in relazione sia alle applicazioni negli edifici nuovi ed esistenti, che alla valutazione delle prestazioni e continua a svolgere attività di ricerca su materiali e tecniche tradizionali, sia per il valore conoscitivo e culturale, che per le potenzialità di coniugare sostenibilità, tradizione e innovazione. Ha pubblicato, tra gli altri: *Leggere l'architettura. Tra moderno e contemporaneo* (CLEAN, 2009), *Architettura medievale. Tecniche costruttive in Campania* (CLEAN, 2000), *Il paesaggio rurale della Campania. Architettura e caratteri costruttivi* (Luciano Ed., 2000), *Renzo Piano. Architettura e Tecnica* (con F. Polverino, CLEAN, 2004) *Louis I. Kahn. Architettura e Tecnica* (con M. Fumo, CLEAN, 1996).

It is certainly no coincidence that today contemporary architectures are increasingly favoring "special" concretes. In particular, many architectural works that choose concrete to face or sculptural plastic forms use self-compacting concrete. The "fluidity" of this concrete offers simple answers, necessary to take a step towards the industrialization of the building site and to give a new degree of freedom to architecture, triggering a change. In the history of concrete, the use and diffusion of self-compacting require an eminent technical knowledge and the analysis of the most emblematic constructions realized. This methodological approach is fundamental for the scientific knowledge of this technology, which is old for the Japanese, and which has yet to grow in the European reality.



9 788860 262482

€ 30,00