

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Calcestruzzi innovativi: applicazione per strutture sostenibili

Innovative concretes: application for sustainable structures



Relatore

prof. Caldera Carlo
(Politecnico di Torino)

Candidato

Vinci Alessandra

Co-relatore

prof. Tortorici Giovanni
(Politecnico di Bari)

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

.....	5
Introduzione	5
Parte Prima: excursus sul calcestruzzo armato	8
1 Il calcestruzzo come materiale da tradizione	9
1.1 La composizione del calcestruzzo	9
Gli inerti	9
L'acqua	11
Il rapporto acqua/cemento	12
Gli additivi	13
1.2 La lavorabilità	16
1.3 La segregazione	20
1.4 La porosità	20
1.5 La resistenza meccanica	24
1.6 Il trasporto e posa in opera	29
1.7 La composizione chimica del calcestruzzo	31
1.8 Le specifiche del calcestruzzo	37
La classe di resistenza	38
La classe di consistenza	39
La classe di esposizione	40
Il diametro massimo dell'aggregato	43
1.9 Il mix design	44
1.10 Il calcestruzzo armato	48
1.11 La durabilità del calcestruzzo armato	50
Il degrado del calcestruzzo armato	51
2 L'evoluzione	56
2.1 Le prime tracce	56
2.2 Dal processo industriale fino alla I Guerra Mondiale	60
2.3 Tra le due Guerre	66
2.4 Dopo la Seconda Guerra Mondiale	70
2.5 XXI Secolo	72
3 L'innovazione	75
3.1 Le tipologie di calcestruzzo attualmente sul mercato	75
3.1.1 Calcestruzzi estetici	75
Calcestruzzo drenante	75
Calcestruzzo impermeabile	78

Calcestruzzo fotocatalitico	80
Calcestruzzo texturizzato	81
Calcestruzzo traslucido	82
3.1.2 Calcestruzzi strutturali	83
Calcestruzzo ad alta resistenza	83
Calcestruzzo ad alte prestazioni	86
Calcestruzzo fibrorinforzato	88
Calcestruzzo da materiali riciclati	90
Calcestruzzo polimero-impregnato	91
Calcestruzzo a ritiro compensato	94
Calcestruzzo proiettato	96
Calcestruzzo autocompattante.....	98
3.2 Le tipologie di calcestruzzo in fase di sperimentazione	129
Calcestruzzo autoriparante.....	129
Calcestruzzo fotocatalitico al grafene.....	130
Calcestruzzo EDCC (Eco-friendly Ductile Cementitious Composite).....	131
Bio-cemento BAAC (Bio Aerated Autoclavated Concrete).....	132
Calcestruzzo con fibre vegetali	133
Parte Seconda: applicazione al caso studio	135
1 Caso studio: ville residenziali monopiano.....	136
1.1 Presentazione caso studio	136
1.2 Analisi geologica	138
1.3 Scelta dei materiali e dimensionamento strutturale	142
2 Soluzioni tecnologiche progettuali	145
2.1 Calcestruzzo autocompattante.....	146
2.2 Calcestruzzo leggero strutturale	148
2.3 Calcestruzzo fluido per facciavista.....	150
2.4 Calcestruzzo drenante	153
2.5 Criteri Minimi Ambientali (CAM)	155
3 Confronto tra calcestruzzo “tradizionale” ed “innovativo”	160
3.1 Confronto dell’analisi del costo di costruzione.....	160
3.2 Confronto delle prestazioni a seguito di prove in laboratorio.....	167
Mix design.....	169
1. Calcestruzzo Ordinario con CEM IV A/V 42.5R e aggregati naturali	176
2. Calcestruzzo SCC con CEM IV A/V 42.5R e aggregati naturali.....	180
3. Calcestruzzo SCC con CEM IV A/V 42.5R, aggregati naturali e 5% aggregati riciclati	183

4. Calcestruzzo SCC con CEM IV A/V 42.5R, aggregati naturali e 30% aggregati riciclati	186
Confronto dei risultati delle prove.....	189
3.3 Confronto dei vantaggi e svantaggi.....	194
Fase di costruzione	194
Fase di manutenzione	196
Conclusioni	199
Bibliografia.....	202
Sitografia	203
Allegato “tabelle di calcolo”	204
Allegato “rapporto di prova”	209

Introduzione



Questa tesi nasce a seguito delle numerose vicende che hanno visto per protagonista il crollo di strutture in calcestruzzo armato in piedi già da molti anni ed anche di recente costruzione, basti pensare al ponte di Polcevera a Genova, meglio noto come ponte Morandi (il quale prende il nome dal progettista). Molte sono state le domande del tipo “ma perché queste strutture crollano?” oppure “perché gli edifici costruiti dai romani, soprattutto quelli in pietra, sono tutt’oggi in piedi e quelli in calcestruzzo crollano?”. Tali domande e molte altre hanno portato alla “perdita” di fiducia verso questo materiale, che per questo in molti casi viene sostituito o preferito a materiali come l’acciaio e il legno, perché considerati più durevoli e anche sostenibili.

Ma molti non sanno che tante possono essere le cause di questi crolli, come la qualità del materiale e quindi le mancate prove di accettazione da effettuare in corso d’opera; la mancata manutenzione richiesta nel corso della vita utile del materiale stesso e della struttura e l’applicazione di normative obsolete e non aggiornate, soprattutto al rischio sismico. Ad esempio, nel caso del ponte Morandi il problema è dovuto al fatto che negli anni ’60 (inaugurazione nel 1967) si ignorava il concetto di durabilità delle opere in c.a. in relazione all’ambiente, oggi noto come “classe di esposizione”, infatti le cause del crollo si riconducono all’impiego di un mediocre calcestruzzo molto poroso e facilmente penetrabile dagli agenti aggressivi ambientali; adozione di un copriferro di ridotto spessore che ha diminuito il tempo impiegato dagli agenti aggressivi di raggiungere i ferri di armatura e la presenza di un ambiente aggressivo per la vicinanza del mare e l’emissione di vapori aggressivi (CO₂ ed SO₂) ad alcune fabbriche vicine al ponte.



Figura 1: espulsione del copriferro a seguito della corrosione dei ferri di armatura

Quindi, con questa tesi si vuole “ridare” fiducia al calcestruzzo, un materiale protagonista della nostra storia passata e futura, analizzando tutti gli aspetti che lo caratterizzano in modo

da poter far capire l'importanza che esso assume in fase di progettazione di un'opera civile, dalla scelta appropriata dei componenti alla progettazione del mix-design.

Inoltre, si vuole anche dimostrare che la ricerca tecnologica sui calcestruzzi così detti “innovativi” nasce e si sta evolvendo proprio per poter risolvere tutte quelle problematiche riscontrate con l'uso del calcestruzzo stesso nel tempo, ma soprattutto per garantire quella durabilità e sostenibilità ricercata negli altri materiali da costruzione. Infatti, la sfida di migliori prestazioni, dei ponti sempre più lunghi, degli edifici sempre più alti, delle strutture sempre più performanti, delle architetture sempre più futuriste ha fatto da motore per una ricerca senza sosta che ha portato a calcestruzzi biodinamici, resistenti come l'acciaio, autoriparanti, durevoli come la pietra, bianchi come il marmo (e autopulenti), drenanti o impermeabili a seconda delle esigenze, sicuramente al passo delle prestazioni richieste delle costruzioni del futuro.

Infine, uno sguardo è stato dato anche alla filiera produttiva, in cui si è osservato che da un lato, a causa di norme ambientali troppo restrittive, le materie prime (inerti) scarseggiano e dall'altro, anche se è presente la conoscenza dell'innovazione, la richiesta del “nuovo” materiale è ridotta e in alcuni casi è nulla. Questo in quanto, quello dell'edilizia, è un mercato ormai in crisi già da parecchi anni e che fatica a riprendersi¹, in cui tutt'oggi resiste la legge del “vince il prezzo più basso” senza dar importanza alla qualità del materiale. Per tanto, si vuole dimostrare che con l'utilizzo dei calcestruzzi “innovativi”, con particolare attenzione ad esempio ai materiali provenienti da riciclo e/o quello provenienti dalle demolizioni di altre costruzioni, è possibile garantire costi di produzione, costruzione e manutenzione mantenuti, ottenendo un prodotto, quale il calcestruzzo, che ottiene una classe di sostenibilità alta, il cui raggiungimento è obbligato dalle norme vigenti, e migliori prestazioni in termini di durabilità rispetto la sua vita nominale. Atecap afferma: “per far ripartire l'industria delle costruzioni occorre un cambiamento di rotta, va ripensato il paesaggio urbano e territoriale, promuovendo la rigenerazione del costruito, l'edilizia sostenibile, la tutela dell'ambiente, favorendo l'economia circolare e il riutilizzo di ogni materiale, attraverso misure fiscali e urbanistiche”.

Il tutto viene dimostrato con un esempio applicativo sul progetto di ville residenziali monopiano, che ad oggi sono in fase di realizzazione in Puglia, nella città di Bari, e di cui la sottoscritta ha seguito parte della realizzazione delle stesse.

¹ Dall'articolo del 12 Aprile 2018 de “Il Sole 24 Ore” si evince che la curva di ripresa dell'anno scorso si è stabilizzata, con una crescita del 4,1% della produzione di calcestruzzo preconfezionato nel primo semestre e una frenata del 2,9% nella seconda parte dell'anno, per una media del +0,5%.

Parte Prima: excursus sul calcestruzzo armato



1 Il calcestruzzo come materiale da tradizione

Si vuole incominciare analizzando nello specifico il materiale oggetto di studio della seguente tesi di laurea, ovvero il calcestruzzo, esplicitando le caratteristiche fisiche e meccaniche per comprendere in che modo queste incidono sulla scelta appropriata del calcestruzzo da utilizzare e quindi, motivando la recente valorizzazione del “mix-design” importante per garantire la qualità e la durabilità del materiale stesso, e dimostrando come esso influisce nella vita nominale di una costruzione civile. Si osservi, che la differenza tra un calcestruzzo “tradizionale” e uno “innovativo” sta proprio nella scelta di un opportuno mix-design.

1.1 La composizione del calcestruzzo

Come è ben noto, normalmente un metro cubo di calcestruzzo è composto da 0.80 m³ di inerte grosso (ghiaia o pietrisco), 0.40 m³ di inerte fine (sabbia), circa 300 kg di cemento e da 120 ÷ 150 litri d'acqua, i quali vengono impastati per formare una pasta facilmente modellabile che nel giro di qualche ora si rapprende perdendo la sua iniziale plasticità e successivamente, nel giro di un giorno, assume la rigidità tipica di una pietra naturale ed è capace di resistere ad apprezzabili sollecitazioni meccaniche.

Gli inerti

Le proprietà del calcestruzzo sono fortemente influenzate dagli inerti, naturali o di frantumazione, devono essere costituiti da elementi non gelivi, privi di parti friabili, polverulente, terrose e di sostanze comunque nocive all'indurimento del conglomerato (riducono l'adesione con la matrice cementizia) ed alla conservazione delle armature. Queste caratteristiche devono essere continuamente controllate durante l'esecuzione dell'opera. La **sabbia** o inerti di origine alluvionale estratti dal letto dei fiumi sono utilizzati per la realizzazione di malte; il **pietrisco** è ricavato dalla frantumazione di roccia, deve essere lavato per eliminare i residui di polvere propri della lavorazione e la **ghiaia**, di formazione naturale non particolarmente indicata per la forte disomogeneità dei singoli elementi dal punto di vista chimico (presenza di elementi poco resistenti come le arenarie), per la forma spesso troppo appiattita e per la presenza di elementi organici che ne diminuiscono la resistenza.

La resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo dipende quasi esclusivamente dalle proprietà della matrice cementizia. Questo assunto si basa sul fatto che la pasta di cemento

rappresenta l'anello debole della catena in quanto la maggior parte delle rocce da cui derivano gli aggregati per il confezionamento del conglomerato posseggono resistenze meccaniche a compressione di gran lunga superiori, all'incirca 150N/mm^2 per i calcari fino a oltre 250N/mm^2 per le rocce quarziti. Pertanto, la resistenza a compressione dell'aggregato risulta dalle 5 alle 8 volte maggiore di quella dei conglomerati cementizi più diffusi la cui resistenza è generalmente di $25\text{-}30\text{N/mm}^2$. Significa che la resistenza a compressione di una determinata pasta di cemento diminuisce all'aumentare della percentuale in volume di aggregato aggiunto all'impasto, in quanto, sotto sforzi di compressione appunto, si crea una zona di transizione, ovvero dell'interfaccia pasta-aggregato, in corrispondenza della quale si ha la fessurazione responsabile del collasso del conglomerato e che poi si propaga all'interno della matrice cementizia.

Invece, a differenza della resistenza a compressione, il modulo elastico degli aggregati influenza la rigidità del conglomerato cementizio. La maggior parte degli inerti impiegati per il confezionamento del conglomerato possiede modulo di elasticità compreso tra $40.000\text{-}90.000\text{N/mm}^2$, e pertanto, maggiore di quello della pasta di cemento i cui valori si attestano tra $15.000\text{-}20.000\text{N/mm}^2$. Il modulo elastico del calcestruzzo è rappresentato dalla media ponderale dei moduli elastici della matrice cementizia e dei granuli lapidei, quindi, aumenta con la rigidità e il volume occupato dagli aggregati nel conglomerato. Il modulo di elasticità degli inerti, infine, influenza anche la stabilità dimensionale del calcestruzzo: infatti, sebbene non direttamente coinvolti nel fenomeno del ritiro igrometrico gli aggregati si oppongono alla contrazione di volume della pasta di cemento in misura tanto maggiore quanto più elevato è il loro modulo di elasticità.

I requisiti minimi per gli aggregati da impiegare nella produzione del conglomerato, stabiliti anche in funzione della tipologia di struttura cui il calcestruzzo è destinato, sono fissati dalla norma UNI 8520/2 parte integrante, per l'applicazione sul territorio italiano, della norma europea UNI-EN 12620 annunciata attualmente dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.2.

Tipo di aggregato	Passante a D %	Trattenuto a D %	Passante a d %
Aggregato grosso <i>D > 11,2mm e D/d > 2</i>	90-99	10-1	0-15
Aggregato grosso <i>D < 11,2mm e D/d ≤ 2</i>	85-99	15-1	0-20
Aggregato fine <i>D ≤ 4mm e d = 0</i>	80-99	20-1	0-20
Aggregato fine <i>D ≤ 4mm e d = 0</i>	85-99	15-1	-
Naturale 0/8 <i>D = 8mm e d = 0</i>	90-99	10-1	-

Misto $D = 45\text{mm}$ e $d = 0$	90-99	10-1	-
Filler	Passante a 2mm 100	Passante a 0,125mm 85-100	Passante a 0,063 70-100

Tabella 1: Requisiti granulometrici previsti dalla norma UNI-EN 12620

Dove D e d sono rispettivamente il diametro massimo e minimo dell'apertura del setaccio². In particolare il diametro massimo dell'aggregato è funzione delle dimensioni dell'elemento strutturale, delle eventuali armature e dell'effetto di parete ed inoltre non deve superare il 25% della sezione minima della struttura (per evitare di aumentare le eterogeneità del materiale); non deve superare la distanza tra i ferri di armatura diminuita di 5mm (per evitare che l'aggregato più grosso ostruisca il flusso del calcestruzzo attraverso i ferri stessi); non deve superare del 30% lo spessore del copriferro (per evitare che tra casseri e ferri di armatura sia ostruito dal passaggio del calcestruzzo).

Gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo debbono, inoltre, essere provvisti di marcatura CE in accordo a quanto previsto dalla direttiva 89/106CEE e dal D.P.R. n°246 del 21.04.1993.

L'acqua

Gli inerti costituiscono, quindi, lo scheletro portante del conglomerato, mentre il cemento, reagendo chimicamente con l'acqua, ha la funzione di legare tra loro gli altri elementi. Per tanto, anche la **qualità** dell'acqua utilizzata nel confezionamento del calcestruzzo assume un ruolo chiave nel definire le prestazioni meccaniche del conglomerato: un'erronea scelta, infatti, potrebbe determinare fenomeni di ritardo dei tempi di presa e di indurimento oppure indurre problemi di natura estetica sulla superficie dei manufatti, o nei casi più gravi, generare forme di degrado precoce delle strutture.

Relativamente alle acque per il confezionamento del calcestruzzo, la norma UNI EN 1008:2003, richiamata dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.5., consente di impiegare sia acque potabili che acque di riciclo dell'industria del calcestruzzo, quelli provenienti da pozzi artesiani, quelle superficiali, le acque di mare e quelle reflue di origine industriale con la sola esclusione delle acque nere; per tutte, salvo per quelle potabili, deve esserne verificata l'idoneità all'impiego. Generalmente l'esame dell'acqua si basa su una valutazione

² L'analisi granulometrica prevista dalla UNI EN 933-1 si basa sul metodo del setaccio che consiste nel determinare la percentuale di granuli che vengono trattenuti "trattenuto parziale" (che quindi posseggono dimensioni maggiori dell'apertura del setaccio e minori di quella del setaccio di apertura immediatamente maggiore) in corrispondenza di ognuno dei setacci utilizzati.

preliminare per verificare l'eventuale presenza di inquinanti di natura organica che possono rallentare la cinetica di idratazione con inevitabili ripercussioni negative sui tempi di disarmo delle strutture; di eventuali tensioattivi che possano promuovere indesiderati inglobamenti di aria nel calcestruzzo con conseguenti abbattimenti delle prestazioni meccaniche; di tracce di olio e di grasso che possano determinare sia un rallentamento dello sviluppo delle resistenza che una diminuzione dell'adesione all'interfaccia pasta-aggregato con irrimediabili riduzioni delle prestazioni meccaniche. La presenza di oli e grassi, inoltre, potrebbe causare la comparsa di antiestetiche macchie sulla superficie dei manufatti; la presenza di sostanze acide produca forti ritardi dell'idratazione del cemento con conseguenze molto più dannose di quelle derivanti dall'eccesso di sostanze di natura organica.

Effettuata questa verifica preliminare è necessario, quindi, controllare il contenuto di alcune sostanze indesiderabili (*cloruri, solfati, alcali, zuccheri, fosfati, nitrati, piombo, zinco*) in accordo a quanto stabilito dalla EN 206-1. La restrizione nel contenuto delle sostanze indesiderate previste dalla norma ha l'obiettivo di evitare problematiche legate al processo produttivo del calcestruzzo: il limite da cloruro per impedire l'ossidazione delle armature; quello da solfati per impedire la formazione del gesso; il limite di alcali per minimizzare il rischio della reazione alcali-aggregato; il limite da zuccheri, fosfati, piombo e zinco, possono rallentare i tempi di presa ed indurimento; per motivi opposti risulta necessario limitare il contenuto di nitrati in quanto queste sostanze possono accelerare i tempi di presa e di indurimento e, conseguentemente, soprattutto nel periodo estivo, aumentare la perdita di lavorabilità durante il trasporto e messa in opera. Per le acque torbide è ammesso un limite di torbidità di 2 g per litro definito "residuo alla evaporazione"; oltre tale limite occorre far decantare l'acqua. Qualora venga usata acqua calda per l'impasto, la temperatura non deve essere superiore ai 60°C.

Il rapporto acqua/cemento

Occorre che tutti gli elementi mescolati diano una massa molto compatta, in modo che si riducano al minimo i vuoti. Infatti, una caratteristica determinante per la resistenza del calcestruzzo è il suo rapporto acqua/cemento e quindi dalla compattezza: diminuendo l'acqua d'impasto si migliora la qualità del calcestruzzo, infatti impasti più asciutti presentano una resistenza a compressione e a trazione maggiore di quella registrata su impasti più fluidi. In particolare, la resistenza a trazione aumenta leggermente col diminuire

della percentuale d'acqua, mentre la resistenza a compressione aumenta più rapidamente col diminuire di questa percentuale.

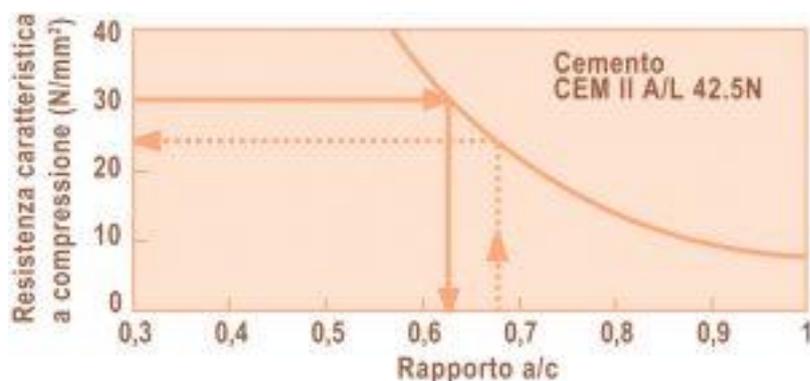


Figura 2: relazione tra rapporto a/c e resistenza caratteristica

Il valore di questo parametro è spesso tenuto a valori ben più alti del valore stechiometrico (0,28 ÷ 0,30) per favorire la lavorabilità del calcestruzzo e la resistenza meccanica. Si utilizzano così spesso calcestruzzi con rapporti a/c superiori a 0,5 con caratteristiche di resistenza che in molti casi sono ancora accettabili benché inferiori a quelle massime raggiungibili, ma con caratteristiche di durabilità che vengono gravemente intaccate senza che se ne tenga opportuna considerazione. Si ottengono infatti calcestruzzi con un'elevata porosità che espone i manufatti ad attacchi chimici da parte di ambienti aggressivi. Per esempio, dalla *Figura 2* si ottiene che per un CEM II A/L 42,5N, impostata una R_{ck} pari a 30 N/mm², il rapporto a/c deve essere 0,63.

Gli additivi

Una buona lavorabilità unita ad una idratazione adeguata può essere conseguita mediante l'impiego di additivi. Questi sono formati di solito da sostanze chimiche di natura organica (generalmente impiegati in forma liquida) che vengono aggiunti in percentuali rispetto alla massa del cemento variabili tra lo 0,1 e 3%, che diminuiscono la tensione superficiale dell'acqua favorendo la lavorabilità e aumentano l'idratazione immediata anche con quantità d'acqua vicine ai valori stechiometrici.

Gli additivi per il calcestruzzo vengono classificati, in accordo con la norma UNI-EN 934-2 richiamata dalle NTC 2008 al capitolo 11 paragrafo 2.9.4., che ne definisce anche i requisiti minimi, in base alla funzione principale che essi svolgono allorché vengono introdotti nell'impasto. Gli additivi destinati al confezionamento del calcestruzzo debbono, inoltre, essere provvisti di marcatura CE in accordo a quanto previsto dalla direttiva 89/106CEE. La norma UNI-EN 934-2 classifica gli additivi in:

- **Additivi acceleranti di presa**

Sono sostanze capaci, soprattutto alle basse temperature, di anticipare i tempi di inizio e fine presa del conglomerato. I principali campi di applicazione degli additivi acceleranti di presa riguardano i calcestruzzi destinati alle pavimentazioni industriali soprattutto durante il periodo invernale, a seguito del rallentamento del processo di idratazione del cemento per effetto della bassa temperatura, in cui l'inizio presa si verifica dopo 8-10 ore dal getto costringendo alle maestranze ad effettuare le operazioni per la realizzazione dello strato di usura durante il periodo notturno incidendo pesantemente sull'organizzazione del lavoro e quindi sui costi complessivi dell'opera. Ma anche per i betoncini (applicati a spruzzo: spritz-beton) per la realizzazione di rivestimenti provvisori in galleria, laddove si richiede che il materiale abbia una presa istantanea che ne favorisca l'adesione della roccia anche in presenza di consistenti venute d'acqua, sia per evitare la caduta di materiale dalle pareti di scavo, sia a salvaguardare l'incolumità del personale di cantiere che bloccare le venute di acqua dalla roccia.

- **Additivi acceleranti di indurimento**

Consentono attraverso un incremento del grado di idratazione del calcestruzzo di favorire un più rapido sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione soprattutto alle basse temperature ambientali. L'effetto accelerante dell'additivo sulle resistenze meccaniche a compressione del calcestruzzo, tuttavia, si esaurisce già dopo qualche giorno (7giorni) e alle lunghe stagionature può anche determinare una diminuzione delle resistenze meccaniche a compressione rispetto all'impasto non additivato. Questa tipologia di additivo nella terminologia di cantiere vengono spesso individuati con il termine, sebbene improprio in quanto non modificano la temperatura di congelamento dell'acqua presente all'interno del calcestruzzo, di additivi *antigelo*.

- **Additivi ritardanti di presa**

Sono in grado di rallentare l'idratazione del cemento e, quindi, di allungare il tempo in cui il calcestruzzo rimane allo stato plastico. Questa esigenza si avverte allorquando occorre trasportare il calcestruzzo per grandi distanze, con lunghi tempi di percorrenza, soprattutto nei periodi caldi quando la cinetica di idratazione del cemento risulta particolarmente veloce. È da evidenziare, inoltre, come gli additivi ritardanti di presa posseggono anche sia pur modesta capacità di ridurre l'acqua d'impasto a parità di consistenza, di circa il 2-5% in funzione del dosaggio di prodotto (generalmente varia fra il 0,2-0,5% rispetto alla massa del cemento). Un secondo importante campo di applicazione degli additivi ritardanti è rappresentato dalla produzione dei calcestruzzi destinati alla realizzazione di strutture a

grande sviluppo orizzontale (platee e pavimentazioni) o lineare (muri) laddove, per i rilevanti volumi, la posa in opera avviene in molte ore e dove, quindi, un possibile ritardo nella consegna del conglomerato, tra una betoniera e quella successiva potrebbe determinare la formazione di un giunto freddo che in servizio potrebbe dà luogo alla nascita di indesiderati quadri fessurativi. In questo contesto l'allungamento dei tempi di presa consente in corrispondenza della ripresa di getto di avere il calcestruzzo già in opera ancora allo stato plastico garantendo, quindi, la monoliticità tra le due porzioni di struttura realizzate in tempi diversi.

- Additivi **aeranti**

Modificano le prestazioni del calcestruzzo in servizio migliorandone la resistenza al ghiaccio. Gli additivi aeranti, aggiunti in quantità piccolissima (0,04-0,06% sul peso del cemento) modificano la tensione superficiale dell'acqua (e per questo sono detti anche tensioattivi), cosicché per effetto dell'agitazione meccanica nella miscelazione del calcestruzzo si formano micro bolle d'aria con diametro dell'ordine dei μm .

- Additivi **resistenti all'acqua**

Sono in grado di ridurre l'assorbimento di acqua per capillarità ovvero rendere idrorepellente l'epidermide del calcestruzzo. L'utilizzo appare idoneo nelle applicazioni di calcestruzzi esposti alle classi di esposizione particolarmente aggressive, per la presenza dei cloruri come sali disgelanti, oppure come acque marine nelle zone ciclicamente bagnate ed asciugate. In entrambi i casi, gli ioni cloruro diffondono attraverso la fase acquosa che riempie i pori capillari per effetto della suzione capillare, se però il calcestruzzo è trattato con questi additivi, l'acqua ambientale che trasporta i sali disgelanti e gli ioni presenti nel mare, viene "respinta" dalla matrice cementizia.

- Additivi **ritentori d'acqua**

Sono comunemente chiamati anche additivi viscosizzanti (VMA) e si impiegano nel calcestruzzo per ridurre, attraverso un aumento della viscosità della pasta di cemento, l'acqua essudata cioè il *bleeding*. Questi prodotti vengono anche utilizzati sia per migliorare la pompabilità dei calcestruzzi magri qualora il contenuto di fini (cemento e filler) sia inferiore ad una certa soglia critica (450 Kg/m^3) e sia per ridurre il fenomeno della segregazione nei calcestruzzi, come in quelli autocompattanti (SCC). Tuttavia, il loro impiego è attualmente limitato per via del fatto che gli stessi vantaggi conseguibili dal loro utilizzo sono ottenuti a costi decisamente più bassi ricorrendo alle aggiunte minerali e, in particolare, alle ceneri volanti.

- **Additivi fluidificanti e superfluidificanti**

Si distinguono in additivi riduttori d'acqua/fluidificanti; riduttori d'acqua a d'alta efficacia/superfluidificanti; ritardante di presa/riduttore d'acqua (fluidificante ritardante); ritardante di presa/riduttore di acqua ad alta efficacia (superfluidificante ritardante); accelerante di presa/riduttore d'acqua (fluidificante accelerante) i quali hanno la stessa funzionalità descritta precedentemente, ma in più sono fluidificanti e superfluidificanti. In linea di massima la quantità di additivo impiegata, rispetto alla massa del cemento si aggira fra lo 0,2-0,5% per i fluidificanti e lo 0,6-2% per i superfluidificanti, ovviamente diminuendo o aumentando l'additivo si riduce o si incrementa l'effetto dell'additivo. L'impiego degli additivi fluidificanti/superfluidificanti ha rivoluzionato il mondo delle costruzioni in c.a e c.a.p. E' possibile, infatti, a seconda della modalità di impiego migliorare la lavorabilità e l'affidabilità delle strutture in opera (a pari rapporto a/c); aumentare la Rck e durabilità riducendo l'acqua e quindi il rapporto a/c (a pari lavorabilità); ridurre il ritiro igrometrico, il gradiente termico e la deformazione viscosa riducendo sia l'acqua che il cemento (a pari rapporto a/c e lavorabilità).

1.2 La lavorabilità

Subito dopo il mescolamento dei suoi ingredienti, il calcestruzzo fresco, cioè nello stato plastico, deve essere trasportato, gettato e costipato. La lavorabilità è la caratteristica che indica la capacità del calcestruzzo fresco a muoversi ed a compattarsi. La mobilità del calcestruzzo è importante per facilitare il trasporto (per es: pompaggio), il getto (caduta per gravità lungo una canaletta) e l'avvolgimento dei ferri di armatura all'interno delle casseforme. La compattabilità, invece, è importante per agevolare, per effetto della vibrazione, la fuoriuscita dell'aria intrappolata dal calcestruzzo fresco ed assicurare, quindi, la massima densità possibile del materiale indurito, oltre che il massimo contatto superficiale tra ferri e calcestruzzo. A parità di sistema vibrante, in un calcestruzzo molto lavorabile l'aria intrappolata è facilmente espulsa, mentre in un calcestruzzo poco lavorabile possono permanere dei macrovuoti d'aria (vespai) che penalizzano successivamente la resistenza meccanica, l'aderenza ferro-calcestruzzo e la protezione dalla corrosione delle armature metalliche. Quindi la lavorabilità finisce con il condizionare anche le prestazioni del calcestruzzo in servizio. Tuttavia, la prescrizione della lavorabilità è tanto spesso disattesa in sede di progetto, quanto diffusamente manipolata sul cantiere con penalizzanti ed improprie ri-aggiunte d'acqua.

La **scelta della lavorabilità** più appropriata del calcestruzzo è funzione del tipo di struttura (densità dei ferri di armatura, forma e dimensione delle strutture) e della particolare tecnica esecutiva. Pertanto, nessuno meglio del progettista dovrebbe conoscere le difficoltà di getto e scegliere la lavorabilità più appropriata.

Classe di consistenza	Slump (mm)	Tipologia di struttura
S1 (terra umida)	10 – 40	Pavimenti messi in opera con vibrofinitrice
S2 (plastica)	50 – 90	Strutture circolari (silos, ciminiere) messe in opera con casseri rampanti
S3 (semifluida)	100 – 150	Strutture non armate o poco armate
S4 (fluida)	160 – 200	Strutture mediamente armate
S5 (superfluida)	³ 210	Strutture fortemente armate, di ridotta sezione e/o complessa geometria

Tabella 2: classe di consistenza richiesta per alcune tipologie strutturali

Nella *Tabella 2* è mostrata indicativamente la lavorabilità più appropriata (in termini di classi di consistenza e slump) per alcune tipologie di strutture in calcestruzzo. Se si eccettuano alcune particolari tipologie strutturali, per le quali la tecnica esecutiva adottata (vibrofinitrice, o casseri rampanti) richiede necessariamente una classe di consistenza relativamente bassa (terra umida con la vibrofinitrice, e plastica con i casseri rampanti), per la quasi totalità delle opere in calcestruzzo gettato entro casseri la lavorabilità prescelta è compresa tra la classe di consistenza semifluida (S3) e quella superfluida (S5).

In generale, maggiore è la densità dei ferri di armatura, maggiore deve essere la fluidità del calcestruzzo. Così pure una maggiore lavorabilità è richiesta per getti entro casseforme di strutture con ridotta sezione e/o con forma complessa che possano ostacolare il movimento del calcestruzzo ed il completo riempimento dei casseri. Peraltro, indipendentemente dalla tipologia di opera, fatta eccezione per quelle sopra menzionate nelle quali si richiede necessariamente una bassa classe di consistenza per la speciale tecnica esecutiva, una lavorabilità maggiore comporta una più rapida e semplice esecuzione. Per esempio, in una pavimentazione industriale, un calcestruzzo a consistenza superfluida (S5) si mette in opera più rapidamente e quindi più produttivamente di quello a consistenza semifluida (S3), anche se entrambi siano reologicamente accettabili dal punto di vista esecutivo.

Un calcestruzzo più lavorabile è anche meno dipendente dalla efficacia della compattazione in opera, cioè dalla qualità della manodopera sul cantiere: in sostanza, esso è più affidabile. Se si confrontano due calcestruzzi di pari composizione (in particolare di pari a/c e tipo di

cemento), ma differenti solo per la classe di consistenza (*S5* ed *S2* per la presenza o meno di un additivo superfluidificante), si otterrà la stessa resistenza meccanica (in relazione allo stesso rapporto a/c ed allo stesso cemento) purché i due calcestruzzi siano vibrati per un tempo sufficientemente lungo (e variabile in relazione alla classe di consistenza) così da ottenere lo stesso grado di compattazione.

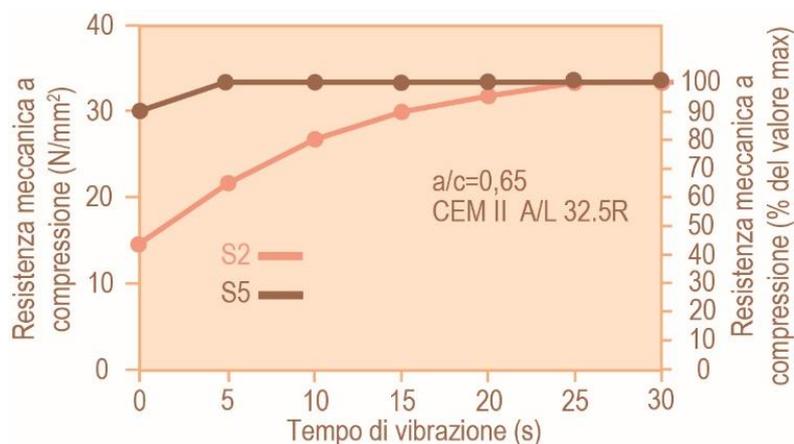


Figura 3: resistenza meccanica a compressione a 28 giorni per calcestruzzi con classe di consistenza *S2* (senza additivo) ed *S5* (con 0.8% di additivo superfluidificante)

La Figura 3 mostra come varia la resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo di vibrazione subito dopo la messa in opera. Essa indica come con il calcestruzzo a consistenza superfluida (*S5*) si ottiene il 100% della massima prestazione meccanica purché si vibri per almeno 5 secondi. D'altra parte, con il calcestruzzo a minor consistenza (*S2*) si ottiene il massimo di prestazione (35 N/mm^2) solo se la vibrazione è prolungata per oltre 25 secondi. Inoltre, in assenza di vibrazione la resistenza meccanica del calcestruzzo a consistenza superfluida (30 N/mm^2) è pari all'86% del valore massimo (35 N/mm^2), mentre quella del calcestruzzo a consistenza plastica in assenza di vibrazione (14 N/mm^2) raggiunge appena il 40% del valore massimo conseguibile con una completa compattazione. Tutto ciò sta ad indicare che, a parità di resistenza meccanica massima (35 N/mm^2) ottenibile a compattazione completa, il calcestruzzo superfluido è molto più affidabile in quanto raggiunge questo valore di resistenza anche con tempi di vibrazione molto brevi e permette comunque di ottenere calcestruzzi quasi altrettanto resistenti (30 N/mm^2) anche in assenza di qualsiasi vibrazione. Per contro, la resistenza meccanica del calcestruzzo a minor consistenza (*S2*) è fortemente dipendente dall'efficacia della vibrazione (cioè dalla qualità della manodopera sul cantiere) e può oscillare entro un ampio intervallo ($14\text{-}35 \text{ N/mm}^2$) a seconda del tempo di vibrazione (0-25 secondi).



Figura 4: influenza della lavorabilità e del tempo di vibrazione sul facciavista del calcestruzzo

La Figura 4 mostra visivamente la differenza di aspetto dei provini confezionati con calcestruzzi con classe di consistenza S5 ed S2, dopo essere stati induriti e sformati, in funzione del tempo di vibrazione, cioè in funzione del loro grado di compattazione. Nel calcestruzzo superfluido non si formano vespai se esso è vibrato o meno, ed i pochi difetti del calcestruzzo non vibrato scompaiono del tutto dopo appena 5 secondi di vibrazione. Nel calcestruzzo meno lavorabile (classe di consistenza S2) i “vespai” presenti nel calcestruzzo non vibrato scompaiono del tutto solo dopo una vibrazione prolungata di 25 secondi. Di nuovo, un calcestruzzo meno lavorabile è meno affidabile, in quanto è più dipendente dalla efficacia della compattazione al momento della messa in opera. Val la pena di ribadire che l’eventuale presenza di “vespai”, oltre a penalizzare la resistenza meccanica in situ della struttura ed il suo aspetto estetico, riduce considerevolmente la protezione del copriferro dalla corrosione dei ferri di armatura.

La Figura 5 indica come il tempo di vibrazione influenza diversamente il grado di compattazione a seconda della lavorabilità del calcestruzzo: in quello superfluido (S5) pochi secondi di vibrazione portano il grado di compattazione da 0.98 al massimo valore di 1; in quello a consistenza plastica (S2) occorrono 25 secondi di vibrazione per aumentare il grado di compattazione da 0.80 al massimo valore di 1. Anche da questo punto di vista si conferma la maggiore affidabilità del calcestruzzo superfluido il cui grado di compattazione in opera, come anche la sua resistenza meccanica dipendono molto meno dalla efficacia (o dal tempo) di vibrazione compattazione ugualmente elevato (0.98), come anche una resistenza meccanica (30 N/mm^2) molto prossima a quella massima, per la capacità autocompattante del calcestruzzo superfluido.

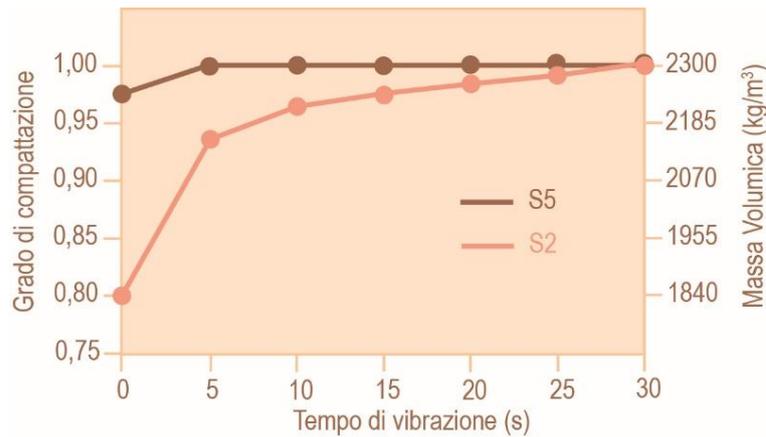


Figura 5: influenza del tempo di vibrazione sulla massa volumica e sul grado di compattazione di calcestruzzo a diversa consistenza (S2 ed S5)

1.3 La segregazione

Per ottenere una buona lavorabilità e il raggiungimento di una completa costipazione, in termini rigorosi, dovrebbero esserci condizioni di assenza di segregazione. La segregazione può essere definita come la separazione tra loro dei costituenti di una miscela eterogenea, fino al punto che la loro distribuzione nella massa ne risulti disomogenea. Nel calcestruzzo, la causa principale di segregazione è la disomogeneità dimensionale delle particelle costituenti. Esistono due tipi di segregazione:

- quando le particelle più grandi tendono a scorrere più velocemente delle particelle fini;
- quando la poltiglia di cemento (cemento più acqua) si separa dalla massa degli inerti.

Per ovviare al primo caso di segregazione, essendo l'impasto troppo asciutto, si può aggiungere dell'acqua all'impasto; ma l'aggiunta eccessiva può portare comunque al verificarsi del secondo caso di segregazione.

Infine, per evitare i fenomeni di segregazione, è importante che il calcestruzzo sia posto nella posizione in cui deve rimanere, senza trasporti o scorrimenti lungo le casseformi. Inoltre, si deve evitare di sottoporlo a vibrazioni inappropriate o prolungate durante il costipamento, per evitare che i costituenti più grandi si concentrino verso il fondo del getto.

1.4 La porosità

Il calcestruzzo, almeno quello convenzionale tradizionalmente impiegato nelle opere dell'architettura e dell'ingegneria civile, è un materiale poroso. Come in tutti i materiali da costruzione, la porosità condiziona le proprietà ingegneristiche, ed in particolare influenza

la resistenza meccanica, il modulo elastico, la permeabilità e la durabilità. Nel caso del calcestruzzo, la porosità può essere di cinque tipologie:

- quella dovuta alla insufficiente compattazione del conglomerato e quindi alla incompleta espulsione di aria intrappolata dalla malta del calcestruzzo fresco, si tratta cioè dei macrovuoti visibili ad occhio nudo da circa 1 mm a qualche decina di mm;
- la porosità eventualmente presente all'interno degli aggregati lapidei, per una massa volumica apparente inferiore a quella assoluta, e che può raggiungere una frazione ragguardevole nei cosiddetti *inerti leggeri* con miglioramento delle proprietà termoisolanti ed una penalizzazione delle prestazioni meccaniche;
- la porosità eventualmente generata dall'inglobamento di aria, in forma di microbolle sferiche di circa 100-300 μm visibili al microscopio ottico (*Figura 6*), grazie alla presenza di additivi aeranti per assicurare un'adeguata resistenza alla formazione di ghiaccio in servizio;
- la porosità presente tra le particelle che compongono la pasta di cemento come pori di forma irregolare, con dimensione compresa tra 0,1 μm e 10 μm e visibili al microscopio elettronico (*Figura 7*), nota come *porosità capillare* e fortemente correlata con la composizione e la stagionatura del calcestruzzo;
- quella presente all'interno dei prodotti idratati solidi, ed in particolare del C – S – H detto in passato *gelo tobermoritico*, nota come porosità del gel, con dimensione di 1-10 nm, non visibile anche con il microscopio elettronico, ma determinabile indirettamente attraverso misure di adsorbimento di sostanze gassose come azoto, elio, o vapore acqueo.

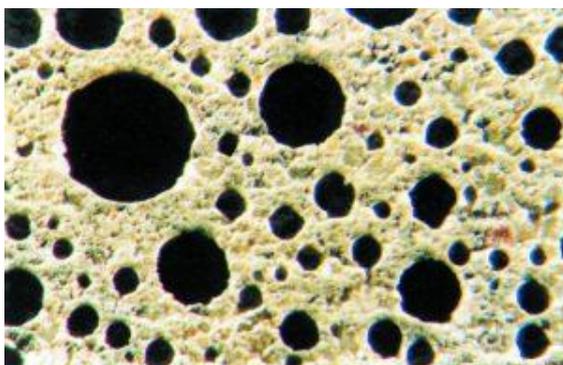


Figura 6: microbolle

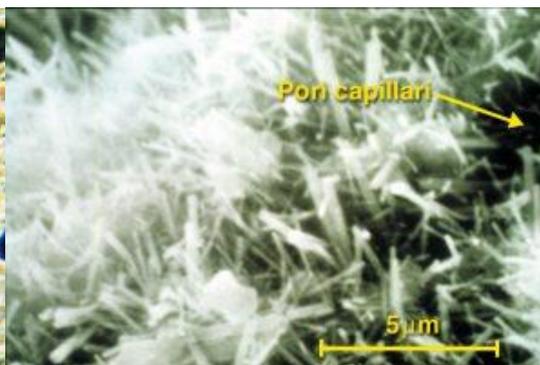


Figura 7: porosità capillare

La porosità del gel è allocata dentro le particelle solide che formano la pasta di cemento, mentre la porosità capillare è presente tra queste particelle solide. La porosità del gel ammonta al 28% del volume occupato dalle particelle solide della pasta cementizia e non può essere sostanzialmente modificata. Al contrario, la porosità capillare può essere

significativamente modificata attraverso il rapporto acqua-cemento (a/c) e/o il grado di idratazione (a), cioè la frazione di cemento idratato. Per tanto, per aumentare la **resistenza meccanica a compressione R_c** si può agire su due fronti: occorre innanzitutto diminuire a/c , cioè ridurre l'acqua di impasto a parità di dosaggio di cemento, senza però aumentare il volume di macrovuoti legati ad una maggiore difficoltà di compattare il calcestruzzo fresco (da questo punto di vista l'adozione di un basso rapporto acqua-cemento comporta in pratica l'impiego di additivi fluidificanti e superfluidificanti capaci di compensare la minore lavorabilità del calcestruzzo fresco derivante alla riduzione dell'acqua di impasto); oppure si può anche aumentare R_c , per un dato a/c , aumentando il grado di idratazione a , cioè prolungando il tempo di stagionatura e/o scegliendo cementi più reattivi. Al pari della resistenza meccanica anche il modulo elastico (E) è influenzato dalla porosità capillare. Invece, la **permeabilità** di un fluido attraverso un solido poroso diventa possibile solo se i pori sono tra loro connessi (*porosità continua*). Nel caso del calcestruzzo, ed in particolare della sua permeabilità all'acqua, *la porosità discontinua*, e quindi l'impermeabilità, è assicurata solo al di sotto di una certa soglia della porosità capillare: questa corrisponde, per ogni determinato valore di a/c , ad un certo grado di idratazione a raggiungibile dopo un determinato tempo di stagionatura.

a/c	TEMPO
0.40	3 giorni
0.45	1 settimana
0.50	2 settimane
0.55	1 mese
0.60	6 mesi
0.70	1 anno
>0.70	infinito

Tabella 3: tempo richiesto per la impermeabilizzazione del calcestruzzo in relazione al rapporto a/c

I dati della *Tabella 3* indicano che più elevato è a/c , più lungo deve essere il tempo di stagionatura (e quindi maggiore il grado di idratazione a) perché il calcestruzzo diventi impermeabile: per esempio, con a/c di 0.55 occorrono 28 giorni per conseguire l'impermeabilità del calcestruzzo; se però si adotta un rapporto acqua-cemento di 0.45 è sufficiente appena una settimana per raggiungere lo stesso obiettivo; d'altra parte con a/c molto elevato (> 0.70) non è mai possibile conseguire l'impermeabilità del calcestruzzo. Da un punto di vista pratico la situazione di impermeabilità viene valutata (UNI EN 12390-8) sottoponendo un provino prismatico di calcestruzzo ad acqua sotto pressione per 3 giorni alla pressione di 7 bar): il calcestruzzo è considerato impermeabile se, dopo questi 3 giorni, l'acqua non ha penetrato il materiale per più di 20 mm per effetto del conseguimento della porosità discontinua.

Anche la **durabilità** è fortemente influenzata dalla porosità capillare oltre che dagli altri tipi di porosità. In linea di massima si può affermare che la *porosità continua* nuoce alla durabilità, mentre quella *discontinua*, purché distribuita in una matrice densa e poco porosa, è ininfluenza o giova alla durabilità. Per esempio, i *macrovuoti* dovuti a difetti di compattazione del calcestruzzo fresco potrebbero collegare i ferri di armatura con l'ambiente esterno e costituiscono, pertanto, un sistema di pori altamente pericolosi per l'integrità della struttura. Un altro tipo di porosità continua capace di favorire l'accesso di agenti ambientali aggressivi (aria, umidità, cloruri, ecc.) è costituita dalla *porosità capillare*. Per un calcestruzzo privo di macrovuoti dovuti ad imperfetta compattazione, la durabilità del calcestruzzo nei confronti di un ambiente aggressivo può essere migliorata riducendo il volume della porosità capillare per ostacolare la penetrazione dell'acqua, e quindi impedire l'ingresso degli agenti aggressivi all'interno del calcestruzzo veicolati dall'acqua. Da un punto di vista pratico, il volume della porosità capillare viene ridotto riducendo a/c , come appare chiaramente in tutte le raccomandazioni sulla durabilità e garantendo un minimo di stagionatura umida (3-7 giorni) per assicurare un livello accettabile del grado di idratazione (a). Un tipo di porosità indifferente alla durabilità del calcestruzzo è costituito dal sistema di pori contenuti all'interno degli *inerti leggeri*, infatti in questo caso la durabilità della struttura non risente minimamente della porosità degli aggregati, giacché l'ingresso degli agenti aggressivi, dall'ambiente all'interno del calcestruzzo, è governato dalla porosità capillare e dai macrovuoti (per insufficiente compattazione) distribuiti nella matrice cementizia che avvolge gli aggregati. Una porosità altamente benefica alla durabilità del calcestruzzo è rappresentata dalle *microbolle* d'aria non collegate tra loro, cioè disperse discontinuamente in una matrice cementizia con bassa porosità capillare. La presenza di microbolle di aria

inglobata (grazie alla presenza di agenti aeranti capaci di modificare la tensione superficiale dell'acqua) è da tempo riconosciuta come essenziale alla produzione di calcestruzzi durabili esposti in servizio ai climi invernali (cicli di gelo-disgelo). Infatti, l'acqua contenuta nei pori capillari, e non ancora congelata, è sospinta nelle microbolle d'aria con allentamento delle tensioni che insorgono quando si forma il ghiaccio con aumento di volume rispetto all'acqua liquida. In assenza delle microbolle d'aria, l'acqua dei pori capillari non ancora congelata è sospinta da una pressione idraulica che insorge per l'aumento di volume che accompagna la formazione dei primi cristalli di ghiaccio. Affinché le microbolle d'aria possano effettivamente allentare le tensioni insorte per la formazione del ghiaccio, è necessario che non siano molto distanti tra loro: la reciproca distanza (*spacing*) non deve superare 300-400 mm.

Per concludere, un sistema di vuoti particolarmente favorevole al calcestruzzo durabile in qualsiasi clima, ed in particolare negli ambienti molto aggressivi (gelo-disgelo, sali disgelanti, ambiente marino, ecc.) è rappresentato da una matrice cementizia con una porosità capillare discontinua e quindi impermeabile (tipicamente raggiungibile dopo 1 mese di staginatura con $a/c = 0.55$) nella quale siano disposte microbolle d'aria (100-300 mm) ben spaziate tra loro con una distanza di circa 300 mm.

1.5 La resistenza meccanica

La resistenza meccanica (R) è il massimo sforzo che un materiale, in forma di una porzione geometricamente determinata (provino), è in grado di sopportare prima della rottura. A seconda che lo sforzo applicato sia a compressione (sc), a flessione (sf) o a trazione (st), si parlerà di resistenza meccanica a compressione (R_c), a flessione (R_f) o a trazione (R_t).

Il calcestruzzo è un materiale che si comporta abbastanza bene sotto l'azione di uno sforzo a compressione, e mediocrementemente sotto quella di uno sforzo a trazione diretta o a trazione per flessione. Per questi motivi, ma anche per le difficoltà sperimentali insite nelle misure di R_t e R_f , di solito sul calcestruzzo si effettuano solo misure dirette di R_c e si ricorre al calcolo per determinare indirettamente R_t , R_f ed anche E (modulo elastico).

La resistenza a compressione R_c è funzione del rapporto a/c ed essi vengono espressi in funzione del tempo di staginatura (solitamente 1-3-7-28 giorni) e della classe di resistenza del cemento.

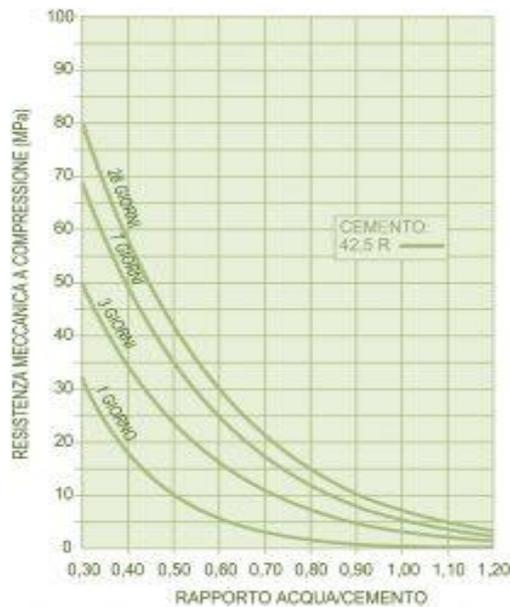


Figura 8: resistenza a compressione in funzione del rapporto a/c a diverse stagionature per i cementi di classe 42.5N

Nella Figura 8 vengono mostrati, a titolo di esempio la R_c per i calcestruzzi confezionati con cemento di classe 42.5R, misurati alle varie stagionature (da 1 a 28 giorni) alla temperatura di 20°C con U.R. ³ 95%. Le correlazioni $R_c - a/c$ si riferiscono, come avviene in pratica per la misura di resistenza sui provini di calcestruzzo, a conglomerati sottoposti a *compattazione a rifiuto*, cioè con il massimo grado di compattazione possibile. Infatti, in assenza di questa precisa prescrizione, il risultato potrebbe essere influenzato, in modo significativo ma aleatorio, dal grado di compattazione, cioè dalla presenza di macrovuoti residui nel calcestruzzo per difetto di costipazione (aria intrappolata). In altre parole, due operatori che costipassero in modo diverso il calcestruzzo fresco otterrebbero risultati diversi nella resistenza meccanica e più bassi dove è minore il grado di compattazione cioè dove è maggiore il volume di aria intrappolata (come si è già dimostrato nel paragrafo relativo alla lavorabilità del calcestruzzo). Rimane il fatto, ovviamente, che la resistenza meccanica del calcestruzzo in opera potrà risultare tanto inferiore a quella del provino quanto minore è il grado di compattazione del calcestruzzo in opera rispetto a quella del calcestruzzo nel provino. Per ridurre questa differenza occorre impiegare calcestruzzi di maggior classe di consistenza (cioè più lavorabili) e quindi meno dipendenti dalla cura adottata nel compattare il calcestruzzo.

La resistenza meccanica a flessione R_f ed a trazione R_t dipendono, oltre che dal rapporto a/c e dal grado di idratazione (quindi dal tempo e dalla classe di resistenza del cemento), anche dal tipo di inerte che gioca invece un ruolo meno importante nella resistenza a compressione.

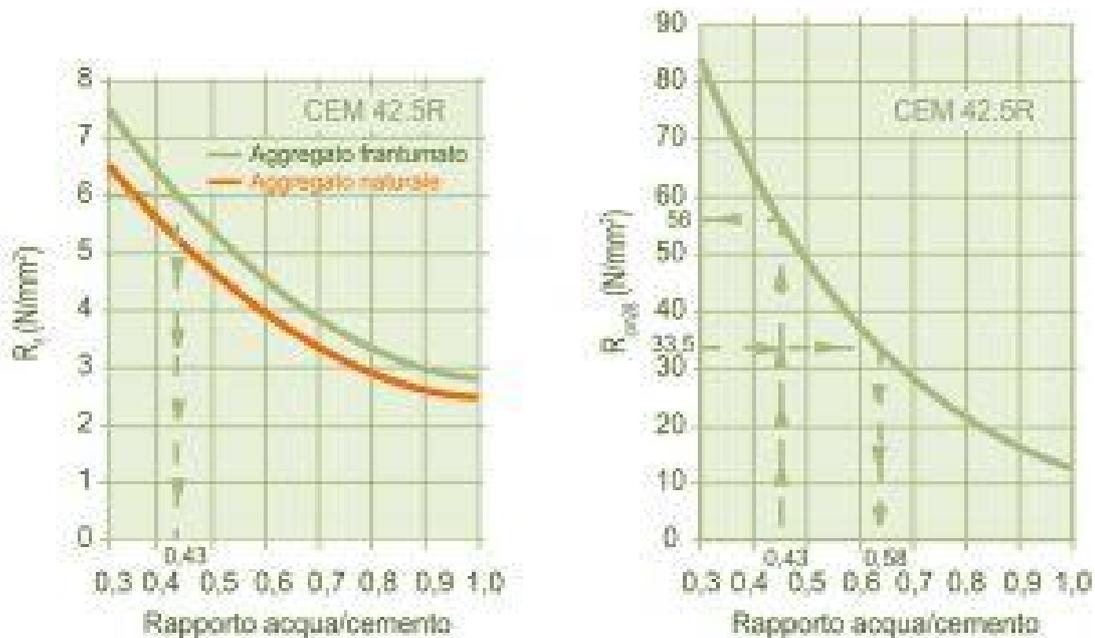


Figura 9: confronto tra influenza del rapporto a/c sulla resistenza a flessione a 28 giorni (R_f) con aggregati naturali e frantumati e influenza del rapporto a/c sulla resistenza a compressione a 28 giorni (R_{cm28}) indipendentemente dalla qualità dell'aggregato (naturale o frantumato).

Nella Figura 9 è mostrato, esemplificativamente per il cemento CEM 32.5 ed il tempo di 28 giorni, la dipendenza di R_f (valore medio) in funzione di a/c per calcestruzzi confezionati con inerte alluvionale (tondeggiate e liscio) o con inerte di frantumazione (irregolare e ruvido). Come si può notare, essa mostra due distinte curve di correlazione R_f – a/c a seconda dell'inerte impiegato, mentre d'altra parte è mostrata un'unica curva di correlazione tra R_{cm28} ed a/c indipendentemente dall'inerte impiegato. Si può osservare che, a parità di a/c, il calcestruzzo presenta una maggiore R_f se l'inerte è di forma irregolare e di tessitura ruvida (cioè frantumato). Infatti, rispetto all'inerte alluvionale di forma tondeggiate e tessitura liscia, si realizza un miglior giunto adesivo all'interfaccia inerte frantumato–pasta cementizia. Questo legame influenza molto più R_f (ed anche R_t) che non R_c per le sollecitazioni di trazione che si generano proprio all'interfaccia inerte-pasta durante le sollecitazioni di sf e st. Si può notare ora che se si consideri una R_{ck} di 30 MPa (controllo di tipo A), si richiede a 28 giorni una R_f di 6 MPa e sia disponibile un inerte frantumato. Dalla Figura 9 si ricava che, per realizzare l'obiettivo della R_f , occorre adottare un a/c di 0,40. D'altra parte alla R_{ck} di 30 MPa corrisponde una R_{cm28} di 33,5 MPa e quindi sarebbe sufficiente adottare un a/c di 0,59. Ci si trova, in sostanza, davanti ad una richiesta “incongruente” giacché le due esigenze prestazionali R_{ck} e R_f (a 28 giorni) portano a due diversi valori di a/c (rispettivamente di 0,59 e 0,40), mentre per confezionare il calcestruzzo occorre ovviamente adottare un a/c (ed uno solo). Per risolvere l'incongruenza, e soddisfare

entrambe le prestazioni richieste, esiste un solo modo: quello di adottare il più basso tra i due valori di a/c e cioè, in questo esempio, 0,40 determinato dalla Rf. È ovvio che adottando per a/c il valore di 0,40, la R_{cm28} risulterà più elevata di quella richiesta per soddisfare l'originale valore di R_{ck} (30 MPa).

Per completare il quadro delle correlazioni, si può menzionare quella tra R_c (o R_{ck}) ed il corrispondente **modulo elastico E**: la correlazione è di tipo lineare. È noto che il modulo elastico dipende non solo dalla resistenza meccanica (cioè, in definitiva dal valore di a/c e dalla classe del cemento prescelto) ma anche dalla proporzione tra il componente più rigido (l'inerte generalmente con E molto elevato) e quello più deformabile (pasta di cemento con E molto minore) come è mostrato in *Figura 10*. Il modulo elastico del calcestruzzo (E) dipende dalla pendenza iniziale della curva della *Figura 10*: quanto maggiore è il contenuto di inerte nel calcestruzzo, tanto più la curva del calcestruzzo si avvicinerà a quella dell'inerte. D'altra parte, in un conglomerato ricco di cemento e povero di inerte (per es. una malta) la curva del conglomerato sarà più vicina alla curva della pasta cementizia. Occorre inoltre tener conto che, sia per l'inerte sia per la pasta di cemento, il modulo elastico, rispettivamente E_i ed E_p , sarà dipendente dal tipo di roccia più o meno rigida (granito, basalto, calcare, quarzite) o dal tipo di pasta cementizia (maggiore è a/c , minore è E_p). Poiché quasi sempre $E_i > E_p$ l'aumento del modulo elastico del calcestruzzo E si realizza in pratica aumentando il volume di inerte (scegliendo un diametro massimo il più elevato possibile) e/o, sia pure in subordine, riducendo il rapporto a/c della matrice cementizia.

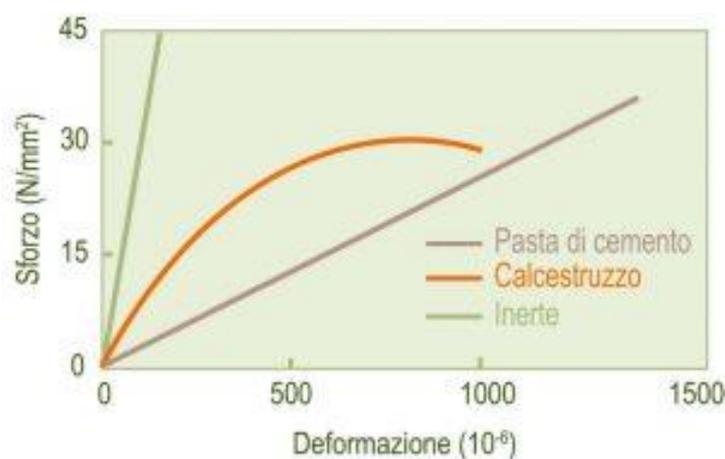


Figura 10: tipico comportamento sforzo-deformazione del calcestruzzo e dei suoi componenti (inerti e pasta cementizia)

Osserviamo che, sottoponendo un provino di calcestruzzo cilindrico a una prova rapida di compressione si avrà il seguente **andamento tensioni-deformazione**: fino a valori della tensione di compressione pari a circa il 40% di quella di rottura f_c ($0,4 f_{cm}$) si registra un andamento del diagramma approssimativamente rettilineo, cioè il materiale ha un comportamento assimilabile all'elastico lineare a compressione ma non reagente a trazione. Questo campo viene utilizzato per il metodo delle tensioni ammissibili ma anche per le verifiche agli stati limite di esercizio. Per sforzi di intensità maggiori il diagramma risulta sensibilmente parabolico fino a un valore della deformazione denominato ϵ_{c1} . A tale valore corrisponde anche la massima tensione di compressione f_{cm} che è praticamente il valore della *tensione di rottura*; questo campo è utilizzato per le verifiche allo stato limite ultimo.

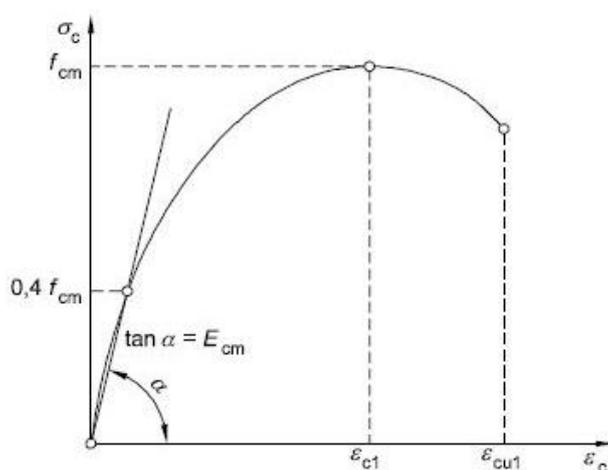


Figura 11: diagramma tensioni-deformazioni

Il cedimento del provino non è però istantaneo, essendo collegato a un processo di microfessurazione in rapida evoluzione. Segue pertanto un secondo tratto discendente (fase di incrudimento o comportamento *softening*) dall'andamento curvilineo, limitato dalla deformazione ultima di rottura denominata ϵ_{cu1} , cui corrisponde un valore finale della tensione sul provino σ_{cu} alquanto inferiore al valore massimo registrato in precedenza. All'atto dello scarico la deformazione è solo parzialmente reversibile e la parte irreversibile aumenta con l'aumentare dello sforzo.

Come si evince la risposta istantanea è difficilmente confinabile nell'ambito della teoria di elasticità lineare, in quanto il materiale presenta spiccate caratteristiche di non linearità e di plasticità sin dai livelli più bassi di sollecitazione.

Si verifica inoltre che già per bassi valori di sforzo, le deformazioni sono tanto più elevate quanto più lenta è la velocità di carico e quanto più lunga è la durata della sua applicazione.

Pertanto le considerazioni riguardanti la risposta istantanea di un calcestruzzo diventano più marcate per effetto di carichi che permangono per lunghi periodi a seguito della comparsa di deformazioni differite nel tempo (fenomeno del *fluage* o **scorrimento viscoso**), le quali, si sommano a quelle immediate. Il fenomeno dipende dalla parziale migrazione dell'acqua verso i vuoti disponibili. È quindi legato alla composizione del calcestruzzo, alle dimensioni dell'elemento e all'umidità relativa dell'ambiente ma anche all'entità dei carichi di lunga durata applicati alla struttura e alla maturazione del calcestruzzo al momento dell'applicazione dei carichi.

1.6 Il trasporto e posa in opera

Il trasporto del calcestruzzo fresco viene effettuato in genere tramite **autobetoniere**, che in Italia sono poste su mezzi a 3 o 4 assi e che per motivi di sicurezza, deve avere una distanza dal fronte di scavo maggiore della profondità dello stesso; o autobetonpompe, cioè autobetoniere dotate di pompa per calcestruzzo.

Il tempo massimo consentito dalla produzione dell'impasto in impianto al momento del getto non deve superare i 90 minuti ed è onere del produttore riportare nel documento di trasporto (DDT) l'orario effettivo di fine carico della betoniera in impianto. Si può operare in deroga a questa prescrizione in casi eccezionali, quando i tempi di trasporto del calcestruzzo dalla Centrale di betonaggio al cantiere dovessero risultare superiori ai 75 minuti. In questa evenienza si può utilizzare il conglomerato fino a 120 minuti dalla miscelazione dello stesso in impianto purché lo stesso possenga i requisiti di lavorabilità richiesti. In questo caso però deve essere accertato preliminarmente dal produttore e valutato dal Direttore dei Lavori che le resistenze iniziali del conglomerato cementizio non siano penalizzate a causa di dosaggi elevati di additivi ritardanti impiegati per la riduzione della perdita di lavorabilità.

Il calcestruzzo, una volta in cantiere, va gettato in un'apposita **cassaforma**. Esso, infatti, ha l'apparenza di un fluido denso privo di forma: la cassaforma serve, appunto, a dare forma al calcestruzzo e a creare, quindi membrature come pilastri, travi, solai, solette, fondazioni; per formare mattoni o blocchi di calcestruzzo può essere usata una macchina apposita chiamata *blocchiera*. All'interno delle casseforme, nel caso di calcestruzzo armato, sono già presenti le barre di armatura disposte secondo gli elaborati strutturali di progetto. Per garantire il copriferro di progetto ed eventualmente le reciproche distanze tra le barre di armatura (interferro), vengono utilizzati dei distanziatori che devono essere in plastica o a base di

malta cementizia (per evitare punti di innesco della corrosione) di forma e geometria tali da minimizzare la superficie di contatto con il cassero.

Prima di procedere al getto però è necessario adottare tutti quegli accorgimenti atti a evitare qualsiasi sottrazione di acqua dall'impasto, in particolare, in caso di casseforme in legno, deve essere eseguita un'accurata bagnatura delle superfici. Durante il getto, che viene in genere realizzato con una pompa per calcestruzzo, si devono prendere tutti gli accorgimenti atti a evitare la segregazione. È proibito eseguire il getto del conglomerato quando la temperatura esterna scende al disotto dei +5 °C se non si prendono particolari sistemi di protezione del manufatto concordati e autorizzati dalla Direzione dei lavori anche qualora la temperatura ambientale superi i 33 °C. Una volta gettato nella cassaforma, il calcestruzzo va opportunamente *vibrato*, per evitare la formazione all'interno del manufatto di cavità e macrodifetti (nidi di ghiaia, ecc.), che rendendo la matrice cementizia più permeabile agli agenti aggressivi esterni potrebbero abbassare il grado di durabilità del calcestruzzo oltre a creare, dal punto di vista meccanico, pericolose discontinuità nel materiale.

Nel caso siano previste riprese di getto, prima della posa del nuovo calcestruzzo, deve essere preliminarmente rimosso, mediante scarifica con martello, lo strato corticale di calcestruzzo già parzialmente indurito. Tale superficie, che deve possedere un'elevata rugosità (asperità di circa 5 mm) e deve essere opportunamente pulita e bagnata per circa due ore prima del getto del nuovo strato di calcestruzzo. Qualora alla struttura sia richiesta la tenuta idraulica, lungo la superficie scarificata devono essere disposti dei giunti *water-stop* ad esempio in materiale bentonitico idroespansivo. I profili *water-stop* devono essere opportunamente fissati e disposti in maniera tale da non interagire con le armature. Al momento della messa in opera del conglomerato è obbligatoria la presenza di almeno un membro dell'ufficio della direzione dei lavori incaricato a norma di legge e di un responsabile tecnico dell'Impresa Appaltatrice. Una volta messo a riposo nella cassaforma, il calcestruzzo fresco ha bisogno di maturare³ per un certo periodo. È questo il periodo in cui l'acqua reagisce con il cemento, generando il fenomeno dell'idratazione, che trasforma i granelli di cemento in cristalli che, interagendo tra loro, induriscono il manufatto. Durante la **maturazione** il calcestruzzo, essendo costituito da leganti idraulici, ha bisogno di rimanere il più possibile in ambiente umido (U.R.% > 95%), per garantire che avvenga il completo processo di idratazione. Pertanto durante la maturazione è bene prendere tutte quelle precauzioni necessarie a ridurre l'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo, perché altrimenti si possono manifestare lesioni, tipiche da ritiro

³ Il passaggio dallo stato fluido del calcestruzzo a quello rigido, a causa della presa e dell'indurimento del conglomerato, fino al raggiungimento delle prestazioni meccaniche richieste nel materiale.

igrometrico nonché una struttura eccessivamente porosa tali da compromettere la resistenza finale e il grado di durabilità del calcestruzzo armato (stagionatura del calcestruzzo). Pertanto il clima, in questa fase, è di fondamentale importanza alcuni fattori che possono favorire un'eccessiva evaporazione, quali:

- l'aria troppo secca;
- una temperatura esterna troppo elevata (superiori ai 30-35 °C);
- una velocità dell'aria elevata;

Per questo motivo, per ottenere il massimo sviluppo di resistenza e una struttura compatta e impermeabile, che garantisce un'adeguata durabilità al materiale, è necessario ritardare il più possibile l'operazione di rimozione dei casseri (scasseratura), a meno che si utilizzino tecniche di stagionatura differenti come la bagnatura delle superfici del calcestruzzo indurito, l'utilizzo di agenti stagionanti (*curing compound*) o di tessuti imbibiti che garantiscono la saturazione delle superfici esposte all'aria.

In realtà anche temperature esterne troppo basse (inferiori allo 0 °C) sono negative perché si possono produrre nella struttura dei dannosissimi cristalli di ghiaccio, che abbattano la resistenza finale del manufatto. Gli additivi nel conglomerato sono scelti anche in base al clima durante il quale dovrà avvenire la maturazione del calcestruzzo, per evitare i predetti problemi. Si deve oltretutto fare attenzione allo spessore del manufatto: se l'elemento strutturale che stiamo gettando ha il lato minore molto grande (superiore a 70–80 cm) possono verificarsi delle lesioni (più importanti di quelle da ritiro) dovute all'eccessivo calore di idratazione sviluppato nel cuore della struttura; infatti il processo di idratazione, che avviene nelle prime ore del getto, provoca un innalzamento della temperatura del calcestruzzo.

In seguito, si parlerà della durabilità del calcestruzzo e delle cause di degrado dello stesso.

1.7 La composizione chimica del calcestruzzo

È ben noto che esistono diversi tipi di cemento in commercio, i quali hanno composizione chimica diversa e con diverse denominazioni. Le diverse qualità dipendono dalla dosatura della miscela di calcare e di argilla, dalla temperatura e durata della cottura che avviene in forni rotanti, dalla macinazione, dalla stagionatura.

Cementi naturali o Portland: sono quelli ottenuti direttamente dalla cottura di marne, con piccola aggiunta di gesso per regolare il processo di idratazione e successiva macinazione.

Sono ottime marne da cemento quelle che hanno composizione chimica con il 78% di carbonato di calcio e il 22% di sostanze argillose. Le marne vengono macinate finemente, stagionate e cotte. Il prodotto che fuoriesce dal forno di cottura si presenta granelli di colore scuro ed è detto clinker. Il clinker viene macinato e poi polverizzato finemente attraverso sfere di acciaio. Sono generalmente utilizzati nella prefabbricazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi. La composizione chimica del cemento Portland è all'incirca la seguente:

- SiO_2 20 ÷ 23 %
- Al_2O_3 3 ÷ 8 %
- Fe_2O_3 0.5 ÷ 5 %
- CaO 64 ÷ 68 %
- MgO 1 ÷ 3 % max tollerato
- SO_3 1 ÷ 2.5 % max tollerato
- $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 0.5 ÷ 1.5 % max tollerato

Cementi artificiali: sono tutti quei leganti idraulici ottenuti con miscele di sostanze di diversa provenienza. Tra i più importanti ci sono:

Il cemento **pozzolanico** si ottiene macinando finemente insieme clinker e pozzolana (roccia vulcanica) in rapporto di 70 parti a 30, con prestazioni superiori (per resistenza meccanica e durabilità) rispetto alla sola calce. Questo cemento raggiunge, a presa avvenuta, un'elevata stabilità nei confronti delle acque marine, aggressive e solfatiche. Sono idonei ai più comuni impieghi nella realizzazione di calcestruzzi armati normali e precompressi, di elementi prefabbricati.

Il cemento **d'altoforno** si ottiene mescolando il cemento Portland con i sottoprodotti della lavorazione della ghisa. La proporzione delle scorie varia tra il 30 e l'85%; per la preparazione si macinano insieme in maniera molto fine ed omogenea il clinker e le scorie. L'idrato di calcio ($\text{CA}(\text{OH})_2$) che si libera si combina con la silice e i silicati presenti nelle scorie, rendendo quasi nullo il contenuto di calce libera nel prodotto finito. La presenza di CaO così come quella di MgO è causa della formazione di microfessure e tensioni interne dovute alle lente reazioni di trasformazione dei due ossidi anzidetti nei corrispondenti idrossidi che causano aumenti di volume contrastati dalla massa di calcestruzzo già rigida. Le caratteristiche descritte conferiscono al cemento d'altoforno marcate proprietà idrauliche

che unite alla notevole compattezza e all'ottima resistenza all'azione di acque corrosive e dilavanti, lo rendono ideale per la preparazione di gettate subacquee. Infatti, rispetto al cemento Portland, sono principalmente indicati nelle situazioni in cui il calcestruzzo è soggetto ad ambienti chimicamente aggressivi e per la realizzazione di opere di grosse dimensioni.

Il cemento **sostenibile** deriva dai nuovi ingredienti pozzolanici. Oltre agli ingredienti tradizionali (pozzolana naturale e loppa d'altoforno) da tempo impiegati per la produzione del cemento pozzolanico e d'altoforno, altri prodotti minerali, quasi tutti di recupero da processi industriali, sono stati introdotti nel processo produttivo dei cementi. Questi includono: la cenere volante (di tipo calcico o silicico), residuo della combustione nelle centrali termiche a carbone; il fumo di silice, sottoprodotto del processo produttivo del silicio metallico o delle leghe metalliche ferro-silicio; la cosiddetta pozzolana industriale, scoria vetrosa delle lavorazioni di leghe metalliche non-ferrose; lo scisto calcinato, residuo della torrefazione di scisti argillosi impregnati di bitume, ed il calcare di origine naturale, unico ingrediente privo in realtà di pozzolanicità. Qualche commento meritano la disponibilità in Italia di questi ingredienti e quindi l'effettiva possibilità di reperire localmente i cementi che secondo la nuova normativa dovrebbero contenerli. La cenere volante si presenta in forma di particelle pressoché sferiche (5-90 μm), piene o più spesso cave, capaci di favorire, proprio per la loro forma tondeggianti, la lavorabilità dei calcestruzzi, oltre che la pozzolanicità dei cementi. La cenere volante disponibile in Italia è quella di tipo siliceo proveniente dalla combustione dei carboni bituminosi, mentre è di fatto non disponibile quella di tipo calcico residuo della combustione delle ligniti o dei carboni sub-bituminosi. Il fumo di silice si presenta in forma di microsfele con dimensioni prevalentemente al di sotto di 0.1 μm , e quindi capaci di allocarsi negli interstizi tra i granuli di cemento (1-50 μm). Tuttavia, la elevata finezza del fumo di silice non ne consente una percentuale d'impiego maggiore del 10% nel cemento per il conseguente aumento nella richiesta d'acqua di impasto. Di fatto, il fumo di silice, quasi sempre abbinato ad un superfluidificante per compensare la eccessiva richiesta d'acqua, viene per lo più impiegato come additivo in polvere per calcestruzzi speciali impermeabili ed alta resistenza meccanica a compressione (> 60 N/mm²).

Cementi speciali: sono quei cementi la cui composizione chimica non è caratterizzata dalla predominanza del calcare, ma risultante da miscele di particolari composti o da elevate

temperature di cottura o dall'uso di additivi specifici. Sono adatti ad ambienti aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, ecc. Possono essere:

I cementi **bianchi**, caratterizzati dalla purezza delle materie di origine (caolino) con limitazione degli ossidi di ferro. Per la cottura si utilizzano combustibili privi di ceneri residue per lasciarne inalterato il colore.

I cementi **colorati** che si ottengono aggiungendo pigmenti inorganici colorati al cemento bianco.

Il cemento **ferrico**: si ottiene dal cemento Portland normale con l'aggiunta di una piccola percentuale di cenere di pirite (ossido di ferro).

Il cemento ad **indurimento extra-rapido**: l'accelerazione del processo di indurimento si ottiene aggiungendo al Portland macinato molto finemente una percentuale del 2% di cloruro di calcio.

I cementi **alluminosi**: conosciuti anche come fusi in quanto ottenuti dalla cottura a 1400-1600° C (sino alla fusione) di una miscela di calcare e bauxite, presenta un tenore di silice ridotto ad un massimo del 9 ÷ 10 % mentre l'allumina e la calce sono presenti in quantità di circa il 35 ÷ 45 %. L'indurimento dei calcestruzzi confezionati con tali cementi è molto rapido e avviene con sviluppo di notevoli calori di idratazione, cosa che lo rende utile per gettate in climi freddi ma ne impedisce l'uso per gettate di notevoli dimensioni che si creperebbero vistosamente nella fase di raffreddamento. Anche questo cemento, ha una buona resistenza alle acque marine e solfatiche.

Il cemento conforme alla norma è indicato dalla sigla **CEM**. La norma EN/197-1 divide i cementi comuni in 5 tipi differenti:

- *CEM I* Cemento Portland (un solo tipo) con almeno il 95% di clinker;
- *CEM II* Cemento Portland composito (17 sottotipi) dove il clinker è ancora predominante (almeno 79%) e dove gli altri costituenti (escluso il fumo di silice impiegabile solo nell'intervallo 6-10%) possono oscillare entro due intervalli: 6-20% oppure 21-35%; nel primo caso apparirà nella sigla corrispondente la lettera A, mentre se l'intervallo compositivo è maggiore apparirà la lettera B. La sigla di questi cementi è formata da II, seguito dalla lettera A oppure B a seconda della

quantità di costituente minerale, ed infine da una lettera che individua lo specifico costituente minerale: (S per loppa, P per pozzolana naturale, L per calcare, ecc.). Per esempio la sigla II/A-S sta ad indicare un cemento Portland di miscela (II), contenente loppa (S) in una proporzione variabile dal 6 al 20% (A), e prenderà il nome di “cemento Portland alla loppa”. Se, invece, accanto al prevalente clinker di cemento Portland sono presenti più di un costituente minerale (loppa, pozzolana, cenere, ecc.) il legante risultante sarà chiamato “cemento Portland composito” individuato dalla sigla II/A-M oppure II/B-M a seconda del contenuto di clinker;

- *CEM III* Cemento d’altoforno (3 sottotipi), per il quale sono previsti 3 livelli composizionali nel contenuto di loppa che vengono individuati nella sigla del cemento con: A (loppa 36-65%), B (loppa 66-80%), C (loppa 81-95%). Quest’ultimo rappresenta il cemento con il minor contenuto di clinker (che può scendere fino al 5%) e che proprio per questo si caratterizza per il bassissimo calore di idratazione (apprezzato nei getti di massa) oltre che per un’ottima resistenza all’attacco del solfato, dei sali disgelanti e dell’acqua di mare. Ovviamente questo specifico cemento d’altoforno (con sigla III/C) non potrà essere disponibile se non nelle classi di resistenza più basse (32.5, o al massimo 32.5R), per la carenza del clinker necessario all’ottenimento di una iniziale resistenza meccanica;
- *CEM IV* Cemento pozzolanico (2 sottotipi), dove il contenuto di clinker è compreso negli intervalli 65-89% (A) oppure 45-64% (B) e come costituente minerale è presente una miscela di microsilice, cenere silicica e pozzolana naturale o industriale. Il cemento pozzolanico (IV) propriamente detto, come del resto il cemento d’altoforno (III), si distingue rispettivamente dal cemento Portland alla pozzolana (II) e dal cemento Portland alla loppa II per il minor contenuto di clinker. Quindi, anche per il cemento pozzolanico, soprattutto quello B con maggior contenuto di pozzolana (36-55%), sarà difficile prevedere la disponibilità nelle classi di resistenza più elevate (42.5R, 52.5, 52.5R);
- *CEM V* Cemento composito (2 sottotipi speciali), con un contenuto di clinker ridotto (40-64% oppure 20-39%) e con una miscela di loppa, pozzolana e cenere silicica come costituenti minerali. Non va confuso con il cemento Portland composito (II/M) più ricco in clinker e più povero in costituenti minerali.

Infine, ciascun tipo di cemento viene fornito dal produttore in una delle seguenti **classi di resistenza**: 32.5; 32.5R; 42.5; 42.5R; 52.5 e 52.5R. Il numero (32.5, 42.5 oppure 52.5)

individua la soglia minima di resistenza meccanica a compressione, in N/mm^2 , misurata a 28 giorni. La presenza o meno del simbolo R, dopo il numero, sta a significare il comportamento meccanico del cemento alle brevi stagionature: per esempio sia il cemento di classe 32.5, sia quello di classe 32.5R debbono superare a 28 giorni la resistenza meccanica di 32.5 N/mm^2 ; tuttavia il cemento di classe 32.5R (“R” sta per rapido) deve anche superare la soglia di 10 N/mm^2 a 2 giorni, mentre quello di classe 32.5 deve garantire il raggiungimento di un limite prestazionale a 7 giorni. Analogamente la differenza tra le classi 42.5 e 42.5R (o tra 52.5 e 52.5R) sta solo nel diverso comportamento alla stagionatura di 2 giorni: quelli contrassegnati con R posseggono una maggiore resistenza meccanica a 2 giorni, mentre a 28 giorni i requisiti di resistenza meccanica per le due classi di resistenza (42.5 e 42.5R, oppure 52.5 e 52.5R) sono identici. Per la determinazione effettiva della resistenza meccanica di un cemento è necessario adottare una procedura standardizzata, in base alla quale alcuni parametri, che potrebbero influenzare la resistenza meccanica stessa, siano rigorosamente mantenuti costanti da prova a prova. Per esempio, poiché il rapporto tra il quantitativo di acqua e quello del cemento condiziona, come si è già detto precedentemente, la prestazione meccanica di un impasto cementizio, per la miscela (in forma di malta) su cui eseguire la prova di resistenza, si adotta sempre lo stesso rapporto acqua/cemento (0.5). Così pure è fisso il rapporto tra sabbia e cemento (3), come anche il tipo di sabbia, la sua granulometria, ecc. Sono anche rigorosamente standardizzati il tipo ed il tempo di miscelazione, la modalità di riempimento delle casseforme con la malta, le condizioni termiche (20°C) ed igrometriche di maturazione ed infine la metodologia di sollecitazione meccanica per la rottura dei provini.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)	Composizione (percentuale in massa) ^{a)}										Costituenti secondari	
		Costituenti principali											
		Clinker	Loppa di allottomo	Fumi di silice	Pozzolana naturale	Pozzolana naturale calcinata	Cenere volante silicea	Cenere volante calcica	Scisto calcinato	Calcare			
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Cemento Portland CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla topa CEM I/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland ai fumi di silice CEM I/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland ai fumi di silice CEM I/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana CEM I/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana CEM I/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana CEM I/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana CEM I/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alle ceneri volanti CEM I/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alle ceneri volanti CEM I/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento Portland allo scisto calcinato CEM I/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland allo scisto calcinato CEM I/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland allo scisto calcinato CEM I/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
	Cemento Portland allo scisto calcinato CEM I/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Cemento Portland al calcare CEM I/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
	Cemento Portland al calcare CEM I/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	Cemento Portland al calcare CEM I/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	Cemento Portland al calcare CEM I/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	Cemento Portland composti ^{c)} CEM I/A-M	80-94	←		6-20		→				→		0-5
	Cemento Portland composti ^{c)} CEM I/B-M	65-79	←		21-35		→				→		0-5
CEM III	Cemento d'allottomo CEM III/A	36-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento d'allottomo CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento d'allottomo CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{d)} CEM IV/A	65-89	-	←		11-35		→				0-5	
	Cemento pozzolanico ^{d)} CEM IV/B	45-64	-	←		36-55		→				0-5	
CEM V	Cemento composti ^{e)} CEM V/A	40-64	18-30	←		18-30		→				0-5	
	Cemento composti ^{e)} CEM V/B	20-38	51-50	←		31-50		→				0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
c) Nei cementi Portland composti CEM I/A-M e CEM I/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dai clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento (vedere esempio in §).
d) CEM IV/A e CEM IV/B sono composti da clinker, pozzolana e fumi di silice.
e) CEM V/A e CEM V/B sono composti da clinker, pozzolana, fumi di silice e scisto calcinato.

Figura 12: requisiti composizionali per i cementi comuni secondo il prospetto 1 della UNI – EN 197-1

1.8 Le specifiche del calcestruzzo

In fase di progetto, quando si sceglie il calcestruzzo, è necessario tenere conto delle seguenti specifiche:

1. classe di resistenza;
2. classe di consistenza;
3. classe di esposizione;
4. diametro massimo dell'aggregato.

UNI EN 206 - UNI 11104 - LINEE GUIDA SUL CALCESTRUZZO STRUTTURALE

Il D.M. 14 gennaio 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" e la Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 riprendono il concetto di "Vita Normale", ovvero il numero di anni nel quale la struttura, purché sottoposta a manutenzione ordinaria, deve essere utilizzata per lo scopo al quale è destinata. Per realizzare una struttura con una vita utile per un certo numero di anni anche i suoi componenti devono possedere requisiti di durabilità. Al fine di poter ottenere il concetto di durabilità nel calcestruzzo, il progettista deve valutare le condizioni del sito ove sorreggerà la costruzione, tenendo le caratteristiche del prodotto da impiegare, il copriente e le regole di costruzione del

calcestruzzo. Le caratteristiche del calcestruzzo sono infatti condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la durabilità della struttura. Per questo riguarda il calcestruzzo, il progettista potrà soddisfare la prestazione richiesta in funzione delle condizioni ambientali, facendo utile riferimento alle indicazioni contenute nelle **Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale** edite dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ovvero alla norma **UNI EN 206** ed alla norma **UNI 11104**. Una volta individuata la condizione ambientale idonea, il progettista dovrà confermare la resistenza meccanica, derivante dal calcolo strutturale, con la resistenza meccanica

minima prevista dalle norme riportanti i riferimenti dalle condizioni ambientali, in modo che venga scelta la classe di resistenza più elevata tra quelle. Il calcestruzzo dovrà essere ordinato, quindi, riportando le condizioni previste dalle norme vigenti. **Conformità alle normative vigenti**
Classi di resistenza a compressione
Classi di esposizione
Dimensione massima dell'aggregato
Classi di lavorabilità

Classe esposizione norma UNI EN 206 ¹⁾	Descrizione dell'ambiente	Massimo rapporto a/c ²⁾	Risk _{rel} ³⁾
CORROSIONE INDOTTA DA CARBONATAZIONE			
XC1	Secco o permanentemente asciutto	0,55	Risk 25
XC2	Acquoso, permanentemente secco	0,50	Risk 30
XC3	Umidità moderata	0,55	Risk 37
XC4	Calcestruzzo sottoposto a sovraccarico	0,50	Risk 57
CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI PRESENTI NELL'ACQUA DI MARE			
XS1	Esposto ad aria che trasporta salinità ma non in contatto diretto con acqua di mare	0,50	Risk 57
XS2	Permanentemente sommerso	0,45	Risk 45
XS3	Zona esposta alla marea, alle onde o agli spruzzi	0,45	Risk 45
CORROSIONE INDOTTA DA CLORURI ESCLUSI QUELLI PROVENIENTI DALL'ACQUA DI MARE			
XD1	Umidità moderata	0,55	Risk 37
XD2	Acquoso, permanentemente secco	0,55	Risk 37
XD3	Calcestruzzo sottoposto a sovraccarico	0,45	Risk 45

¹⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XC1 Risk 30, XC2 Risk 33, XC3 Risk 40, XC4 Risk 40.
²⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XS1 Risk 30, XS2 Risk 33, XS3 Risk 33.
³⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XD1 Risk 30, XD2 Risk 33, XD3 Risk 33.



Classe esposizione norma UNI EN 206 ¹⁾	Descrizione dell'ambiente	Massimo rapporto a/c ²⁾	Risk _{rel} ³⁾	Calcestruzzo minimo di classe (C)
ATTACCO DEL GELO/DISECCO CON O SENZA AGENTI ANTIGELO				
XF1 ⁴⁾	Modesta saturazione d'acqua, in assenza di agenti anticongelanti	0,55	Risk 37	
XF2 ⁴⁾	Modesta saturazione d'acqua, in presenza di agente anticongelante	0,55	Risk 30	4,0
XF3 ⁴⁾	Elevata saturazione d'acqua, in assenza di agente anticongelante	0,50	Risk 37	4,0
XF4 ⁴⁾	Elevata saturazione d'acqua, con presenza di agente anticongelante	0,45	Risk 37	4,0
ATTACCO CHIMICO				
XA1	Ambiente chimico debolmente aggressivo	0,55	Risk 37	
XA2 ⁵⁾	Ambiente chimico moderatamente aggressivo	0,50	Risk 37	
XA3 ⁵⁾	Ambiente chimico fortemente aggressivo	0,45	Risk 45	
ASSENZA DI RISCHIO DI CORROSIONE O ATTACCO				
XO	Per calcestruzzo privo di armatura o inerti metallici tutte le disposizioni accettabili sono di pieno rispetto. Per calcestruzzo con armatura o inerti metallici molto secco			Risk 15

¹⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XF1 Risk 30, XF2 Risk 33, XF3 Risk 33, XF4 Risk 33.
²⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XA1 Risk 30, XA2 Risk 33, XA3 Risk 33.
³⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XO Risk 15.
⁴⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XF1 Risk 30, XF2 Risk 33, XF3 Risk 33, XF4 Risk 33.
⁵⁾ Risk_{rel} che soddisfa la UNI 11104: XA1 Risk 30, XA2 Risk 33, XA3 Risk 33.

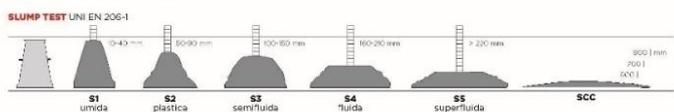


Figura 13: linee guida sul calcestruzzo strutturale

La classe di resistenza

La classe di resistenza rappresenta la capacità del calcestruzzo di assorbire gli sforzi di compressione. La resistenza a compressione viene misurata su appositi provini dopo 28 giorni dal prelievo ed è definita come il rapporto fra il carico applicato e l'area della sezione resistente dei provini. Invece, secondo le NTC 2008, la resistenza a compressione è espressa come **resistenza caratteristica Rck** oppure fck, dove per resistenza caratteristica a compressione s'intende la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori. La resistenza caratteristica Rck viene determinata sulla base dei valori ottenuti da prove di compressione monoassiale su provini cubi (per questo chiamata resistenza caratteristica cubica) di 150 mm di lato (H/D=1), maturati 28 giorni; la resistenza caratteristica fck viene determinata invece utilizzando provini cilindrici (da cui il nome resistenza caratteristica cilindrica) di 150 mm di diametro e 300 mm di altezza (H/D=2). Tra i due valori esiste la seguente relazione (per H/D≥2):

$$fck = 0,83 Rck$$

La differenza tra questi due valori dipende fondamentalmente dal diverso stato tensionale che si genera nel provino a seguito delle prove di compressione, che dipende dal fatto che i provini cubici sono tozzi mentre quelli cilindrici sono snelli.

La differenza tra i valori della resistenza caratteristica cilindrica definita dall'EC2 e quella definita dalle NTC 2008 è minima. Nella seguente tabella si riporta il confronto per i tipi di calcestruzzo più usati:

Classe	Rck	fck	0,83 Rck	Diff %
C8/10	10	8	8,30	3,75%
C12/15	15	12	12,45	3,75%
C16/20	20	16	16,60	3,75
C20/25	25	20	20,75	3,75%
C25/30	30	25	24,90	-0,40%
C28/35	35	28	29,05	3,75%
C32/40	32	40	33,20	3,75%
C35/45	45	35	37,35	6,71%
C40/50	50	40	41,50	3,75%

C45/55	55	45	45,65	1,44%
C50/60	60	50	49,80	-0,40%

Tabella 4: calcestruzzi più utilizzati

I C8/10 - C12/15 sono definiti come calcestruzzi non strutturale; i C16/20 C45/55 come calcestruzzi ordinario (NSC - Normal Strength Concrete); i C50/60 - C60/75 come calcestruzzi ad alte prestazioni(HPC) e infine i C70/85 - C100/120 sono denominati calcestruzzi ad alta resistenza(HSC), ampiamente descritti nel Capitolo 2 della Parte Prima. Inoltre, per calcestruzzi con classe maggiore C60/75, la miscela deve essere oggetto di prequalifica, mentre i calcestruzzi superiori a C80/95 devono essere autorizzati dal Consiglio Superiore dei LL.PP..

La classe di consistenza

La classe di consistenza indica la lavorabilità del calcestruzzo fresco ed è un indice delle proprietà e del comportamento del calcestruzzo nell'intervallo di tempo tra la produzione e la compattazione dell'impasto *in situ* nella cassaforma. Secondo le norme UNI EN 206 – 2006 e UNI 11104:2004, la consistenza deve essere determinata mediante diverse prove dai cui risultati vengono definite le classi di consistenza del calcestruzzo. Come ad esempio il Cono di Abrams:



Figura 14: Cono di Abrams

La lavorabilità si misura riempiendo il cono con il calcestruzzo fresco. Il cono ha un diametro di 20 cm in fondo e di 10 cm in alto, la sua altezza è pari a 30 cm. Una volta riempito con il

calcestruzzo, si toglie il cono, ed essendo fresco il calcestruzzo inizierà ad espandersi, sottoposto alla forza di gravità. Espandendosi il punto più alto del calcestruzzo si abbasserà di un tot. Quel valore rappresenta lo *slump*. La misura della lavorabilità deve essere condotta dopo aver proceduto a scaricare dalla betoniera almeno 0,3 m³ di calcestruzzo. In Italia la consistenza del calcestruzzo è espressa in termini di abbassamento al cono o di classi di spandimento.

Le classi di consistenza mediante abbassamento al cono di Abrams sono:

- S1 - consistenza umida: abbassamento (slump) da 10 a 40 mm;
- S2 - consistenza plastica: abbassamento (slump) da 50 a 90 mm;
- S3 - consistenza semifluida: abbassamento (slump) da 100 a 150 mm;
- S4 - consistenza fluida: abbassamento (slump) da 160 a 210 mm;
- S5 - consistenza superfluida: abbassamento (slump) \geq 220 mm.

Le classi di consistenza mediante la misura dello spandimento sono:

- F1 - diametro spandimento: \leq 340 mm
- F2 - diametro spandimento: da 350 a 410 mm
- F3 - diametro spandimento: da 420 a 480 mm
- F4 - diametro spandimento: da 490 a 550 mm
- F5 - diametro spandimento: da 560 a 620 mm
- F6 - diametro spandimento: \geq 630 mm

La classe di consistenza deve essere valutata in funzione della struttura da realizzare al fine di rendere più facile l'operazione di posa in opera. Con riferimento alle classi di abbassamento al cono: se si deve realizzare una diga o una pavimentazione con vibrofinitrice è d'obbligo un calcestruzzo a consistenza S1; se si devono realizzare strutture come ciminiere, serbatoi pensili, ecc., con la tecnica dei casseri rampanti si deve prescrivere un calcestruzzo a consistenza S2 o al massimo S3; in tutti gli altri casi si dovrà utilizzare un calcestruzzo S4 o S5.

La classe di esposizione

La classe di esposizione ambientale indica il maggiore o minore livello di aggressività del luogo in cui la struttura sarà inserita. Le condizioni ambientali possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive a ciascuna delle quali sono associate delle classi di esposizione:

- Ordinarie: classi di esposizione X0, XC1, XC2, XC3, XF1

- Aggressive: classi di esposizione XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
- Molto aggressive: XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Le norme UNI 11104 e UNI EN 206-1 introducono 6 classi di esposizione per il calcestruzzo strutturale e 17 sottoclassi in funzione dell'entità del degrado (dove oltre al massimo rapporto a/c e al minimo contenuti di cemento viene indicata anche la minima classe di resistenza tutto per garantire la durabilità del materiale):

1. Assenza di rischio di corrosione dell'armatura - X0; minima classe di resistenza: C12/15;
2. Corrosione delle armature indotta da carbonatazione (di cui si parlerà in seguito)
 - XC1 - asciutto o permanentemente bagnato: $a/c_{\max} = 0,60$ (0,65); dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 300 (260); minima classe di resistenza: C25/30 (C20/25)
 - XC2 - bagnato, raramente asciutto: $a/c_{\max} = 0,60$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 300 (280); minima classe di resistenza: C25/30
 - XC3 - umidità moderata: $a/c_{\max} = 0,55$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 320 (280); minima classe di resistenza: C28/35(C30/37)
 - XC4 - ciclicamente asciutto e bagnato: $a/c_{\max} = 0,50$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 340 (300); minima classe di resistenza: C32/40(C30/37)
3. Corrosione delle armature indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare
 - XD1 - umidità moderata: $a/c_{\max} = 0,55$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 320(300); minima classe di resistenza: C28/35(C30/37)
 - XD2 - bagnato, raramente asciutto: $a/c_{\max} = 0,50$ (0,55); dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 340 (300); minima classe di resistenza: C32/40(C32/40)
 - XD3 - ciclicamente bagnato e asciutto: $a/c_{\max} = 0,45$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 360(320); minima classe di resistenza: C35/45
4. Corrosione delle armature indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare
 - XS1 - esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare: $a/c_{\max} = 0,45$ (0,50); dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 340(300); minima classe di resistenza: C32/40(C30/37)
 - XS2 - permanentemente sommerso: $a/c_{\max} = 0,45$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 360(320); minima classe di resistenza: C35/45

- XS3 - zone esposte agli spruzzi o alla marea: $a/c_{\max} = 0,45$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 360(340); minima classe di resistenza: C35/45

5. Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza disgelanti

- XF1 - moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante: $a/c_{\max} = 0,50(0,55)$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 320(300); minima classe di resistenza: C32/40(C30/37)
- XF2 - moderata saturazione d'acqua, in presenza di agente disgelante: $a/c_{\max} = 0,50(0,55)$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 340(300); minima classe di resistenza: C25/30
- XF3 - elevata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante: $a/c_{\max} = 0,50$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 340(320); minima classe di resistenza: C25/30(C30/37)
- XF4 - elevata saturazione d'acqua, con presenza di agente antigelo oppure acqua di mare: $a/c_{\max} = 0,45$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 360(340); minima classe di resistenza: C28/35(C30/37)

I valori della resistenza caratteristica minima prevista per le classi di esposizione XF, tengono conto della riduzione di resistenza meccanica, circa il 20%, causata dalla presenza delle microporosità necessarie a garantire un'idonea resistenza al *ciclo gelo - disgelo*.

6. Attacco chimico da parte di acque del terreno e acque fluenti (p.to 4.1 prospetto 2 UNI EN 206-1)

- XA1 - ambiente chimicamente debolmente aggressivo: $a/c_{\max} = 0,55$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 320(300); minima classe di resistenza: C28/35(C30/37)
- XA2 - ambiente chimicamente moderatamente aggressivo: $a/c_{\max} = 0,50$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 340(320); minima classe di resistenza: C32/40(C30/37)
- XA3 - ambiente chimicamente fortemente aggressivo: $a/c_{\max} = 0,45$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 360; minima classe di resistenza: C35/45.

In queste ultime classi di esposizione XA si deve utilizzare un cemento resistente ai solfati e precisamente:

- per la classe di esposizione XA1 (attacco debole) - cemento a moderata resistenza chimica ai solfati (M.R.S.);

- per la classe di esposizione XA2 (attacco moderato) - cemento ad alta resistenza chimica ai solfati (A.R.S.);
- per la classe di esposizione XA3 (attacco forte) - cemento ad altissima resistenza chimica ai solfati (A.A.R.S.).

In letteratura, la classe di esposizione ambientale viene indicata con D_{ck} , in analogia alla classe di resistenza che viene comunemente indicata con R_{ck} .

Tali norme consentono di individuare la corretta combinazione di classi di esposizione dell'opera e di ogni sua componente, in funzione dei singoli meccanismi di degrado dell'ambiente sulle strutture. La scelta della combinazione di classi di esposizione va eseguita per tutti gli elementi strutturali, in base alla loro posizione nella costruzione. Il calcestruzzo può essere soggetto a più di una azione ambientale e quindi può essere necessario esprimere le condizioni dell'ambiente alle quali esso è esposto come combinazione di classi di esposizione. Inoltre, le diverse superfici di calcestruzzo di un dato elemento strutturale possono essere soggette a diverse azioni ambientali.

Il diametro massimo dell'aggregato

Infine, le dimensioni massime dell'aggregato sono in relazione con lo spessore del copriferro e con l'interferro minimo delle armature metalliche. Se il calcestruzzo è classificato in funzione della dimensione massima dell'inerte, la classificazione farà riferimento alla dimensione nominale più elevata della frazione di aggregato più grossa che si indica con D_{max} , di cui come detto precedentemente rappresenta la dimensione massima del setaccio con il quale è determinata la dimensione dell'aggregato secondo la UNI EN 12620.

La dimensione massima dell'aggregato deve essere scelta in modo che il calcestruzzo possa essere gettato e compattato attorno alle barre d'armatura senza pericolo di segregazione. Secondo quanto stabilito dalle NTC e dalla relativa Circolare esplicativa delle NTC, il diametro massimo dell'inerte deve essere tale che:

- $D_{max} < 1/4$ della dimensione minima dell'elemento strutturale per evitare di aumentare la eterogeneità del materiale;
- $D_{max} < \text{dell'interferro (in mm)} - 5 \text{ mm}$ per evitare che l'aggregato più grosso ostruisca il flusso del calcestruzzo attraverso i ferri di armatura;
- $D_{max} < 1,3$ volte lo spessore del copriferro per evitare che tra i casseri e l'armatura sia ostruito il passaggio del calcestruzzo.

1.9 Il mix design

Il mix design è letteralmente il “progetto della miscela”, più estesamente è il “calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste dal progettista (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento, inerti, additivi)”.

Il progettista strutturale deve redigere apposita relazione (relazione sui materiali) in cui descrive la qualità del calcestruzzo richiesto, indicando la classe di resistenza, la classe di esposizione, la classe di consistenza e la dimensione nominale massima dell’aggregato. È pertanto compito e responsabilità del produttore del calcestruzzo progettare una miscela idonea a soddisfare i requisiti richiesti dal progettista.

Per effettuare il corretto mix design si devono considerare una serie di fattori:

1. la **lavorabilità** cresce all’aumentare del quantitativo di acqua utilizzata per l’impasto e dipende anche dalle caratteristiche degli inerti utilizzati (diametro massimo previsto e superficie dell’inerte: liscia o scabra) oltre che dalla presenza di eventuali additivi specifici (leggere paragrafo sulla lavorabilità del calcestruzzo).

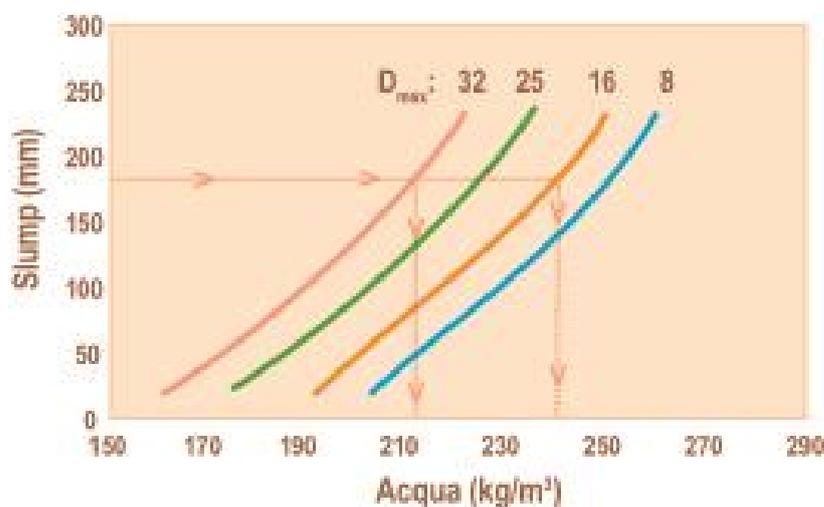


Figura 15: influenza del diametro massimo (D_{max}) dell’inerte sulla correlazione slump-acqua di impasto

Infatti, a parità di D_{max} , la quantità d’acqua che occorre impiegare per confezionare un calcestruzzo con un determinato slump, è maggiore se si utilizza un inerte frantumato dal contorno irregolare piuttosto che un inerte alluvionale dal contorno tondeggiante: ovvero, a parità di dimensione, un inerte dal contorno irregolare, rispetto a quello dal

contorno tondeggiate, presenta un attrito maggiore nei confronti della matrice cementizia e richiede, quindi, un maggior quantitativo di acqua per conseguire la stessa lavorabilità, cioè la stessa mobilità, del calcestruzzo fresco. Pertanto, i valori medi di acqua di impasto riportati in *Figura 14* debbono essere aumentati di 10 kg/m^3 se si tratta di inerti frantumati dal contorno irregolare, e diminuiti di 10 kg/m^3 se si tratta di inerti alluvionali dal contorno tondeggiate. Invece, con l'impiego di alcuni additivi, si riduce il quantitativo di acqua richiesto per ottenere un determinato slump con un certo inerte e quindi la riduzione di acqua di impasto è funzione del tipo e dosaggio di additivo.

2. la **resistenza meccanica** è funzione del rapporto acqua/cemento e della quantità di cemento da utilizzare (se misurata a 28 giorni dipende anche dal tipo e dalla classe del legante): al diminuire del primo e al crescere della seconda aumenta la resistenza meccanica (leggere paragrafo relativo alla resistenza meccanica del calcestruzzo).

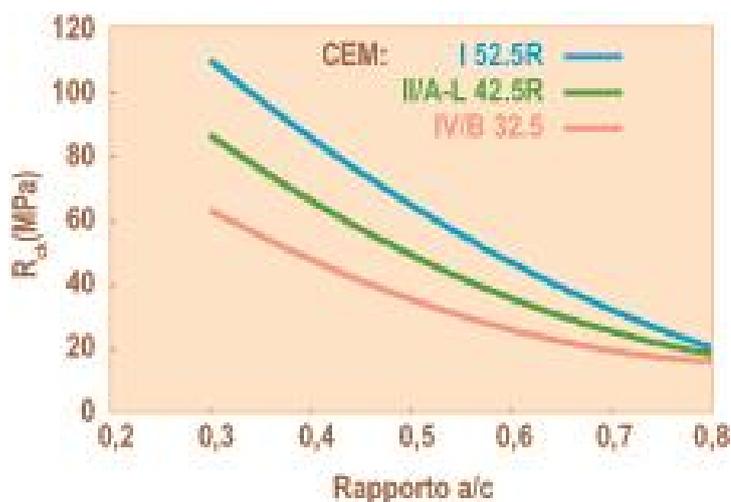


Figura 16: correlazione della Rck con il rapporto a/c per tre diversi cementi

3. il **grado di durabilità** dipende da diversi fattori che influiscono sul mix-design, quali la necessità di classificare gli ambienti in base al loro carattere aggressivo nei confronti del calcestruzzo e/o dei ferri di armatura (*classi di esposizione*); di adottare, conseguentemente, un rapporto a/c tanto più basso quanto maggiore è il livello di aggressione ambientale per predisporre un calcestruzzo impermeabile alla penetrazione degli agenti aggressivi; di inglobare aria in forma di microbolle uniformemente distribuite nella matrice cementizia (ed in misura tanto maggiore quanto minore è il diametro massimo dell'inerte) nei calcestruzzi esposti ai cicli di

gelo-disgelo. Per ragioni di semplicità e brevità espositiva si farà riferimento all'attuale normativa EN 206.

Classe di esposizione	Ambiente	Massimo rapporto (a/c)' per strutture			Minimo* volume di aria	Copriferro minimo (mm)	
		normali	armate	precomprese		c.a.	c.a.p.
XC1	Asciutto / interni di abitazioni, uffici, ecc.	---	0.65	0.65	---	15	25
XC4	Umido / strutture esterne	0.50	0.50	0.50	---	30	40
XF3	Umido con gelo	0.50	0.50	0.55	4 - 6%	30	40
XF4	Umido con gelo e sali disgelanti	0.45	0.45	0.45	4 - 6%	45	55
XS3	Mare	0.45	0.45	0.45	---	45	55
XD3	Mare con gelo	0.45	0.45	0.45	4 - 6%	45	55
XA1	Agenti chimici debolmente aggressivi (SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , ecc.)	0.55	0.55	0.55	---	25	35
XA2	Agenti chimici mediamente aggressivi (SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , ecc.)	0.50	0.50	0.50	---	30	40
XA3	Agenti chimici fortemente aggressivi (SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , ecc.)	0.45	0.45	0.45	---	40	50

* I valori minimi di aria 4%, 5% e 6% si riferiscono rispettivamente ad inerti con diametro massimo di 32,16 ed 8 mm

Figura 17: vincoli composizionali (a/c ed aria) e copriferro (Eurocodice 2) in base ad alcune classi di esposizione ambientale

Nella Figura 17 sono mostrati i valori massimi di a/c e minimi di a' (aria, % in volume) in relazione alla classe di esposizione ambientale ed alla tipologia strutturale (normale, armata, precompressa), così come appaiono nella vigente norma europea e nazionale; per ragioni di comodità, sono anche riportati i valori minimi del copriferro per le strutture in c.a. e c.a.p. come previsti dall'Eurocodice 2.

Selezionata la classe di esposizione ambientale nella quale l'opera è destinata a sorgere (per esempio 2a), e scelta la tipologia strutturale (per esempio armata), si individua il valore di (a/c)', in questo caso 0.60, che non deve essere superato nel confezionare l'impasto se non si vuole mettere a rischio la durabilità dell'opera. Questo valore va confrontato con il rapporto a/c correlato con la R_{ck} (scelta per ragioni di calcolo strutturale) in base ai grafici di Figura 18. Sono possibili tre situazioni:

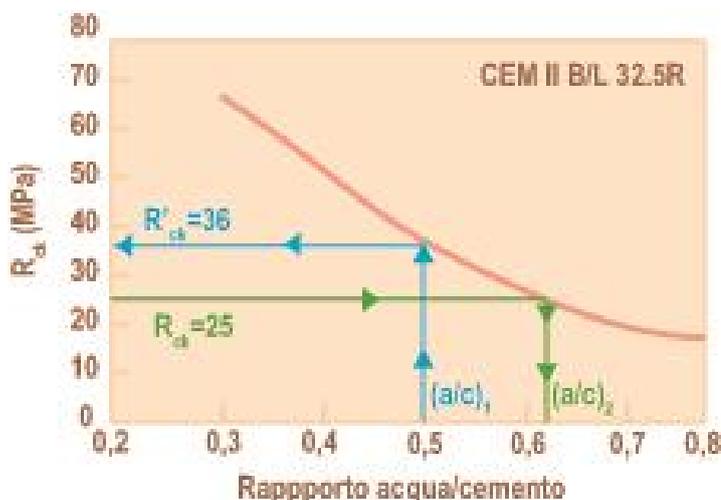


Figura 18: scelta della effettiva resistenza caratteristica per ragioni di durabilità

- il valore del rapporto acqua-cemento (a/c)' imposto dai vincoli di durabilità (*Figura 18*) coincide con quello (a/c) derivante dalla R_{ck} (*Figura 18*): in questo caso non esistono, ovviamente, problemi sulla scelta di a/c e quindi per la prosecuzione del mix-design;
- il valore di (a/c)' imposto dai vincoli di durabilità è maggiore di quello (a/c) derivante dalla R_{ck} ; in questo caso, che si verifica solitamente per valori di R_{ck} elevati, si sceglie, per la prosecuzione del mix-design, il valore di a/c derivante dalla R_{ck} il quale soddisfa anche il vincolo nel rapporto (a/c)' massimo imposto dalla durabilità;
- il valore di (a/c)' imposto dalla durabilità è inferiore a quello di (a/c) derivante dalla R_{ck} ; in questo caso, che si verifica quasi sempre per valori di R_{ck} bassi o medio-bassi (15-25 MPa), il valore del rapporto acqua-cemento con cui proseguire il mix-design è quello (a/c)' imposto dalla durabilità, ed il valore di resistenza caratteristica risulterà di fatto più alto (R'_{ck}) rispetto a quello previsto originariamente (R_{ck}) sulla base di considerazioni meramente strutturali.

Quest'ultimo aspetto del problema, che è un punto chiave nel processo di mix-design in relazione alle due proprietà fondamentali del calcestruzzo in servizio (resistenza meccanica e durabilità) è illustrato esemplificativamente nella *Figura 18* dove è riportata la resistenza caratteristica in funzione del rapporto acqua-cemento per un determinato cemento (per esempio CEM II B/L 32.5R).

Il mix-design può essere approfondito per determinare anche il ritiro, la deformazione viscosa, il modulo elastico, la resistenza meccanica a flessione o a trazione, la resistenza meccanica allo scasso, il calore di idratazione, i gradienti termici – tutte proprietà ingegneristiche importanti, ma solitamente richieste per casi un po' particolari. Così pure, sempre attraverso il mix-design si può entrare nel merito del trasporto del calcestruzzo e della corrispondente perdita di lavorabilità, dell'impiego di additivi riduttori di acqua o acceleranti, della correzione da apportare alla "ricetta" per tener conto dell'umidità degli inerti, o di altri dettagli esecutivi.

In caso di miscele preconfezionate di componenti per calcestruzzi, il produttore, nel sia da aggiungere in cantiere l'acqua di impasto, deve documentare per ogni componente utilizzato e la conformità alla relativa norma armonizzata europea.

1.10 Il calcestruzzo armato

Il calcestruzzo armato (denominato anche conglomerato cementizio armato o cemento armato) è un materiale da costruzione, costituito da:

- **calcestruzzo**: materiale con una notevole resistenza alla compressione, ma con scarsa resistenza alla trazione
- **acciaio**: materiale dotato di un'ottima resistenza a trazione.

Il cemento armato può essere realizzato in cantiere o in stabilimento.

Il calcestruzzo gettato in opera è sicuramente più usato; risulta più performante nelle unioni travi/pilastro ed è più vantaggioso da un punto di vista economico, ma le prestazioni possono essere influenzate dall'incertezza delle condizioni climatiche. La produzione in stabilimento permette invece di ovviare al problema delle eventuali avverse condizioni climatiche e consente un miglior controllo sulla qualità del calcestruzzo. Un esempio di calcestruzzo prodotto in stabilimento è il **calcestruzzo armato precompresso**.

L'**acciaio** per cemento armato è generalmente prodotto in stabilimento sotto forma di *barre o rotoli, reti o tralicci*, per utilizzo diretto o come elementi di base per successive trasformazioni. Prima della fornitura in cantiere gli elementi di cui sopra possono essere saldati, presagomati (staffe, ferri piegati, ecc.) o preassemblati (gabbie di armatura, ecc.) a formare elementi composti direttamente utilizzabili in opera.

La *sagomatura e/o l'assemblaggio* possono avvenire in cantiere, sotto la vigilanza della Direzione Lavori oppure in centri di trasformazione. Tutti gli acciai per cemento armato devono essere ad aderenza migliorata, aventi cioè una superficie dotata di nervature o indentature trasversali, uniformemente distribuite sull'intera lunghezza, atte ad aumentarne l'aderenza al conglomerato cementizio. Le barre sono caratterizzate dal diametro \emptyset della barra tonda liscia equipesante, calcolato nell'ipotesi che la densità dell'acciaio sia pari a 7,85 kg/dm³.

Il *diametro delle barre di acciaio* deve rispettare le seguenti limitazioni:

- diametro \emptyset compreso tra 6 e 40 mm (per gli acciai B450C)
- diametro \emptyset compreso tra 5 e 10 mm (per gli acciai B450A)

Le Norme Tecniche per le Costruzioni definiscono due tipologie di acciaio in barre, B450A e B450C, dove il secondo è più duttile del primo e presenta un allungamento a rottura maggiore e presentano le seguenti caratteristiche:

- stesse resistenze nominali ($f_{yk}=230$ N/mm², $f_{tk}=450$ N/mm²)

- differenti classi di duttilità, individuate con lettere A (acciaio trafilato a freddo) e C (acciaio laminato a caldo), che corrispondono a quelle definite nella UNI EN 1992-1-1 (Eurocodici 2).

Sulla Gazzetta Ufficiale n. 270 del 19 novembre 2011 è stato pubblicato il Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 15 novembre 2011 che apporta modifiche al D.M. 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) circa l'utilizzo dell'acciaio B450A. La modifica riguarda il punto 7.4.2.2 della norma. In particolare, il nuovo testo prevede che l'acciaio B450A, nei diametri da 5 a 10 mm, possa utilizzarsi:

- per reti e tralicci;
- per staffe di qualsiasi elemento strutturale, in strutture di Classe di Duttilità Bassa;
- per armatura trasversale di elementi in cui è impedita la plasticizzazione mediante il rispetto della gerarchia delle resistenze;
- per armatura trasversale di elementi secondari;
- per armatura trasversale in elementi di strutture poco dissipative, con fattore di struttura non maggiore di 1,5.

Per le strutture occorre utilizzare il B450C.

L'uso di *acciai forniti in rotoli* è ammesso, senza limitazioni, per:

- diametri fino a $\emptyset \leq 16$ mm (per acciai B450C);
- diametri fino a $\emptyset \leq 10$ mm (per acciai B450A);

Gli *acciai delle reti e tralicci elettrosaldati* sono soggetti alle seguenti regole:

- devono essere saldabili;
- l'interasse delle barre non deve superare 330 mm;
- gli elementi base devono avere diametro \emptyset che rispetta la limitazione: $6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 16 \text{ mm}$ (per gli acciai B450C);
- gli elementi base devono avere diametro \emptyset che rispetta la limitazione: $5 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 10 \text{ mm}$ (per acciai B450A);
- il rapporto tra i diametri delle barre componenti reti e tralicci deve essere: $\emptyset_{\text{min}} / \emptyset_{\text{max}} \geq 0,6$.

1.11 La durabilità del calcestruzzo armato

Il D.M.17.01.2018 – “Norme Tecniche per le Costruzioni” dà la seguente definizione: **“Durabilità**: capacità della costruzione di mantenere, nell’arco della vita nominale⁴ di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione”.

Definisce anche che “un adeguato *livello di durabilità* può essere garantito progettando la costruzione, e la specifica manutenzione, in modo tale che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto”. Tale requisito può essere soddisfatto attraverso l’adozione di appropriati provvedimenti stabiliti tenendo conto delle previste condizioni ambientali e di manutenzione ed in base alle peculiarità del singolo progetto, tra cui:

- scelta opportuna dei materiali;
- dimensionamento opportuno delle strutture;
- scelta opportuna dei dettagli costruttivi;
- adozione di tipologie costruttive e strutturali che consentano, ove possibile, l’ispezionabilità delle parti strutturali;
- pianificazione di misure di protezione e manutenzione; oppure, quando queste non siano previste o possibili, progettazione rivolta a garantire che il deterioramento della costruzione o dei materiali che la compongono non ne causi il collasso;
- impiego di prodotti e componenti chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche, indispensabili alla valutazione della sicurezza, e dotati di idonea qualificazione;
- applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata;
- adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l’opera può essere sottoposta.

Mentre per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all’azione dell’ambiente, si devono adottare i provvedimenti atti a

⁴ D.M. 17.01.2018 definisce la Vita Nominale “il tempo durante il quale le strutture e/o i materiali conservano le loro prestazioni iniziali mantenendo il livello di sicurezza e di efficienza funzionale di progetto, per qualsiasi azione e condizione ambientale prevista”.

limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e quelli derivanti dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo.

Il degrado del calcestruzzo armato

Le principali cause di degrado di strutture in calcestruzzo armato sono:

- Tecnologiche (42%);
- Costruttive (22%);
- Strutturali (12%);
- Sovraccarichi (8%);
- Fondazioni (7%);
- Accidentali (4%).

Tra le cause indicate come tecnologiche sono comprese le azioni dovute a calcestruzzo di scadente qualità, attacco chimico del calcestruzzo, corrosione dei ferri dovuta ad inadeguata protezione da parte del conglomerato.

L'azione sulla struttura si definisce come ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite alla struttura stessa. Tali azioni si distinguono in *dirette*, quelle forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili; mentre *indirette*, quei spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincoli, ecc.; **degrado endogeno** è l'alterazione naturale del materiale di cui è composta l'opera strutturale; e **degrado esogeno** è alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni.

Vediamo nel dettaglio quali sono le cause principali di degrado chimico fisico e meccanico.

- Cause chimiche:

1. I solfati

Nelle acque ricche di solfati (SO_4^-), come le acque di mare, questi si combinano con gli alluminati del calcestruzzo formando un solfoalluminato di calcio idrato noto come ettringite. Questa reazione causa un aumento di volume per cui le parti corticali del calcestruzzo si gonfiano e producono fessurazioni che espongono la massa interna del calcestruzzo al degrado. In ambienti marini si rende quindi necessario l'uso di cementi pozzolanici o d'altoforno, questi infatti a causa della modesta quantità di calce libera presente, sono poco soggetti alla formazione dell'ettringite. È inoltre opportuno realizzare in questi casi calcestruzzi poco porosi e quindi con bassi rapporti A/C.

2. I solfuri

I solfuri ($S^{=}$) e H_2S causano attacco acido del materiale contro il quale è necessario prevedere intonaci di sostanze protettive (malte di resina epossidica). I solfuri sono presenti in terreni argillosi ricchi di pirite.

3. Anidride carbonica

L'anidride carbonica (CO_2) presente in acque di montagna attacca i carbonati con formazione di bicarbonati solubili che causano il dilavamento del calcestruzzo. Anche in presenza di tali condizioni è utile ricorrere a cementi pozzolanici o d'altoforno, e comunque realizzare calcestruzzi impermeabili con il giusto rapporto A/C.

La **carbonatazione** è un fenomeno grave e frequente caratteristico delle strutture esposte all'aria. Al contatto con l'anidride carbonica presente nell'aria, specialmente in atmosfere ricche di questo gas, la calce presente nel calcestruzzo ($Ca(OH)_2$), si trasforma in carbonato di calcio con gravi conseguenze sulle armature. Infatti il copriferro, con il suo PH elevato, esplica una funzione di protezione delle armature ossidate in superficie, che in ambiente basico mantengono una pellicola di ossido in superficie. Il fenomeno della carbonatazione causa un abbassamento del PH da circa 13 a circa 9 facendo così venire meno le condizioni per una efficace protezione delle armature che si degradano riducendo la loro sezione efficace e facendo "saltare" il copriferro così da esporre sempre di più agli attacchi esterni il calcestruzzo armato. Tali problemi sono ancora più evidenti negli elementi in c.a.p. per le elevate tensioni di lavoro utilizzate in tale materiale. Per ridurre i rischi di carbonatazione si possono impiegare appositi additivi oltre che verificare le sezioni alla fessurazione e adottare idonei spessori di copriferro (minimo 1 cm).



Figura 19: degrado promosso da carbonatazione

4. Cloruri

I cloruri (Cl) attaccano direttamente le armature distruggendo la pellicola di ossido protettivo che le ricopre. Sono particolarmente esposti a questo agente i manufatti realizzati in ambiente marino e le travi che sorreggono ponti stradali in zone dal clima freddo per l'uso di spargere sali allo scopo di favorire lo scioglimento della neve e del ghiaccio.

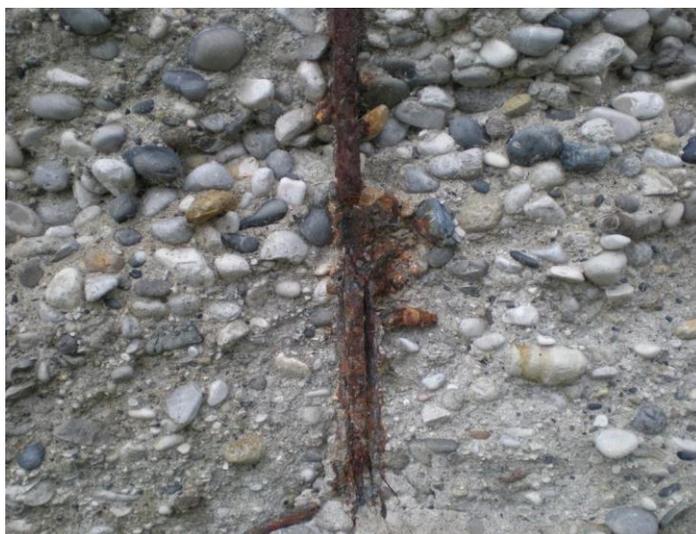


Figura 20: degrado da attacco da cloruri provenienti dal mare

5. Alcali aggregati.

Un altro attacco chimico ai danni del calcestruzzo avviene da parte degli alcali aggregati (Na^+ e K^+) soprattutto per calcestruzzi confezionati con aggregati silicei contenenti elevate percentuali di silice amorfa o forme criptocristalline. In questi casi è necessario verificare la compatibilità del cemento con gli inerti silicei per evitare la formazione di un silicato alcalino gelatinoso che si espande disgregando il calcestruzzo.

- Cause fisiche:

1. Gelo disgelo

Le variazioni di temperatura che avvengono a cavallo dello $0\text{ }^\circ\text{C}$ sono molto più pericolose delle altre, anche di maggiore entità, che vengono normalmente prese in considerazione durante la progettazione. Per fortuna il comportamento viscoso del calcestruzzo (per la gradualità con cui avvengono le variazioni), unito alla duttilità delle strutture (che permette deformazioni plastiche), permette di assorbire le punte di tensione che nascerebbero dai calcoli in regime perfettamente elastico delle variazioni termiche. Tali tensioni imporrebbero altrimenti onerosissimi accorgimenti. L'unico vero accorgimento che in strutture di grande dimensione planimetrica possa ovviare all'azione delle variazioni termiche è l'inserimento di giunti di dilatazione. Variazioni termiche, specialmente se cicliche, causano stati di coazione

tra gli inerti e la pasta cementizia che compongono il calcestruzzo. Infatti i coefficienti di dilatazione termica dei due materiali, pur essendo tra di loro confrontabili, non sono uguali: cemento $0,9 \cdot 10^{-5} \alpha(C^{-1})$; inerti calcarei $0,5 \cdot 10^{-5} \alpha(C^{-1})$; inerti silicei $1,0 \cdot 10^{-5} \alpha(C^{-1})$.

I getti vanno effettuati con la certezza che la temperatura non sia vicina allo $0^\circ C$. In tali condizioni infatti l'idratazione del cemento avviene con una eccessiva lentezza che porta a scarse resistenze meccaniche del conglomerato. Per evitare l'insorgere di questi problemi si può effettuare l'aggiunta di additivi acceleranti come il cloruro di calcio oppure provvedere alla copertura del getto ed eventualmente al suo riscaldamento per insufflaggio di aria calda. I cicli termici attorno allo $0^\circ C$ sono dannosi anche per le strutture che hanno già subito la stagionatura. Infatti in tali condizioni l'acqua assorbita dal calcestruzzo per capillarità, gela aumentando di volume e causando gravi conseguenze se l'umidità del conglomerato supera un valore critico pari a circa il 92 % dei vuoti totali. Oltre questi limiti l'aumento di volume dell'acqua gelata non può essere compensato dai vuoti e causa sicuramente danni per disgregazione del calcestruzzo. Un rimedio contro questo pericolo è rappresentato dall'utilizzo di calcestruzzo con buona compattezza e quindi scarsa tendenza ad assorbire acqua. Un altro rimedio consiste nella creazione di microbolle nella massa di calcestruzzo per mezzo di additivi aeranti che agiscono per via chimica come alluminio, zinco e magnesio, o fisica come i tensioattivi. In tal modo si rende la massa di conglomerato meno conduttrice di calore e quindi meno sensibile agli effetti termici; inoltre le microbolle creano degli sfoghi per l'acqua di capillarità quando questa aumenta di volume. I volumi d'aria che si creano con questo metodo sono dell'ordine del $3 \div 4$ % e causano abbattimenti della resistenza fino al 20 %. In caso di esercizio di una struttura in condizioni di basse temperature si dovrebbe inoltre verificare la non gelività degli inerti utilizzati per la miscela.

2. Ritiro

Avviene a causa della diminuzione per evaporazione dell'acqua interstiziale durante la presa di un calcestruzzo gettato in aria. Se l'umidità relativa ambientale al momento della gettata e della successiva presa è inferiore al 95 % se ne può tener conto in fase di progetto considerando il ritiro come se fosse dovuto ad una variazione termica. Se l'umidità relativa ambientale supera invece il 95 % si hanno fenomeni di aumento del volume della massa di calcestruzzo, ai quali seguono con la diminuzione dell'umidità, deformazioni dovute al ritiro. In tali condizioni è utile bagnare con continuità la superficie del calcestruzzo durante la presa e la prima fase dell'indurimento per evitare che si formino fessure o, se si tratta di grosse gettate, vere e proprie crepe che possono compromettere la funzionalità della struttura esponendo inoltre il calcestruzzo armato all'attacco degli agenti esterni.

Per ridurre il ritiro, soprattutto nelle opere di riparazione, si fa largo impiego di malte antiritiro o espansive. È inoltre opportuno bagnare bene le superfici di ripresa del getto o quelle di contatto tra laterizio e calcestruzzo per evitare che si abbiano localmente delle disidratazioni del calcestruzzo.



Figura 21: degrado per cicli gelo/disgelo

3. Incendio

I danni prodotti dagli incendi sono di notevole gravità. Attorno a $100 \div 150$ °C la pasta cementizia subisce un primo degrado per decomposizione di alcuni componenti. A 570 °C il quarzo contenuto negli inerti silicei varia il suo stato con forti dilatazioni che fanno contrasto con il ritiro dovuto alla disidratazione del cemento. In queste condizioni la resistenza del calcestruzzo si riduce fino al 20 %. Al raffreddamento si ha un'ulteriore diminuzione della resistenza dovuta a microfessure che si aprono come effetto di variazioni di volume contrastate.

I calcestruzzi confezionati con inerti calcarei subiscono invece una forte riduzione di resistenza meccanica attorno ai $700 \div 750$ °C per trasformazione dei calcari in calce viva. Le armature subiscono anch'esse una forte riduzione della resistenza se portate ad alte temperature. Questa riduzione rispetto alla resistenza iniziale è più marcata per gli acciai lavorati che per quelli dolci e laminati.

2 L'evoluzione

Si vuole ora analizzare l'evoluzione del calcestruzzo fino a descrivere quelle che ad oggi sono le innovazioni tecnologiche dello stesso. Non risulta un compito facile tracciare in maniera dettagliata il percorso storico dell'evoluzione della tecnica del calcestruzzo strutturale e di come essa si sia affermata nella pratica del costruire. Ragioni di questa considerazione è la natura del materiale, ovvero la complessità fisico-chimica del calcestruzzo, associata a quella di tipo meccanico, data anche dalla collaborazione con l'acciaio che da una maggiore resistenza, definiscono caratteristiche prestazionali variabili alle diverse applicazioni costruttive.

2.1 Le prime tracce

Il termine calcestruzzo dal punto di vista etimologico deriva dal latino *calcis-structio* cioè una struttura a base di calce. In realtà il termine utilizzato da Vitruvio per definire un conglomerato molo simile al calcestruzzo è l'*opus caementicium*, formato da pietra o rottami di mattone mescolati con calce sabbia ed acqua. Per le opere idrauliche, o esposte all'azione delle acque piovane, la sabbia era sostituita in parte da pozzolana (*pulvis puteolana*) o da coccio pesto; il rottame di pietra usato per confezionare il calcestruzzo era “non più grosso di una mano” e chiamato *caementum*, dal latino *caedo* “tagliare pezzi”, capace di indurire quando miscelato con acqua e in cui, alcuni casi, erano immerse aste di ferro. La scelta dei materiali, la composizione e le modalità di messa in opera del calcestruzzo utilizzato all'epoca dall'impero Romano vengono dettagliatamente riportate da Vitruvio nei suoi 10 libri *De Architectura*. Al di là degli aspetti etimologici la principale differenza tra il calcestruzzo antico e moderno sta nel tipo di legante: i Romani utilizzavano calce e pozzolana o calce ed impurità a base di silice ed allumina che conferivano alla miscela proprietà idrauliche, mentre nel calcestruzzo moderno il legante è il cemento, sia esso Portland o di altro genere. Altra importantissima differenza sta nella specie di inerte e nella sua distribuzione granulometrica (*Figura 22*).



Figura 22: muro in calcestruzzo romano che mostra tra i paramenti in mattone il conglomerato a base di malta e grossi rottami di pietra o mattone (Pompei)

Le proporzioni d'impasto possono essere sintetizzate come segue nella *Tabella 5*:

Resistenza	Legante	INERTE fino	INERTE grosso
c r e s t e n z a	1 parte di calce	3 parti di sabbia di cava	--
	1 parte di calce	1 parti di sabbia di cava	--
		+	
	2 parti di sabbia di fiume		
1 parte di calce	2 parti di sabbia di fiume	1 parte di mattone frantumato e vagliato (dimensione massima contenibile in una mano)	
1 parte di calce	+	2 parti di sabbia di fiume	1 parte di mattone frantumato e vagliato (dimensione massima contenibile in una mano)
2 parti di pozzolana			

Tabella 5: proporzioni impasto calcestruzzo antico

Nel calcestruzzo antico erano impiegati, dunque miscele di inerti a base di sabbia (0-5mm) e rottami di pietra o mattoni (30-50mm), risultando praticamente assenti le frazioni intermedie, contrariamente a quanto accade per il calcestruzzo moderno (*Figura 23*).

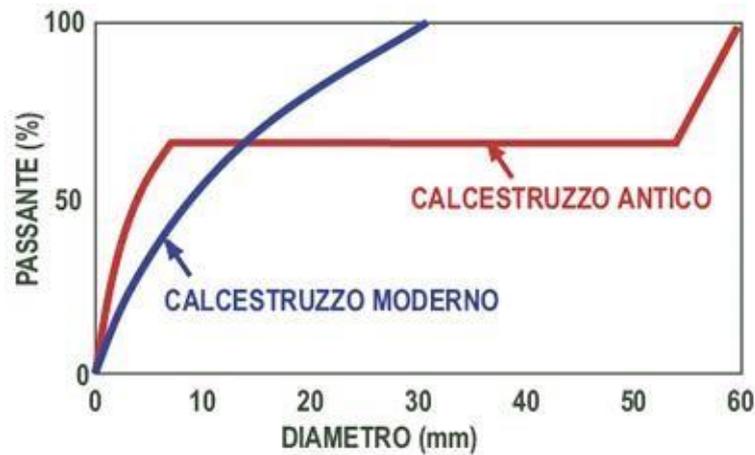


Figura 23: distribuzione granulometrica discontinua nell'aggregato del calcestruzzo antico (con diametro massimo di 60mm) e continua in quello del calcestruzzo moderno (con diametro massimo di 30mm).

Però la prima opera costruttiva che ne dimostra le sue grandi potenzialità è il Pantheon, commissionata da Adriano su progetto di Agrippa, il quale realizzò una volta emisferica avente diametro di 44 metri con ipetro superiore circolare di diametro 9 metri, evidenziata dalla presenza di un elegante cassettonato, in cui all'interno fu volato il calcestruzzo.

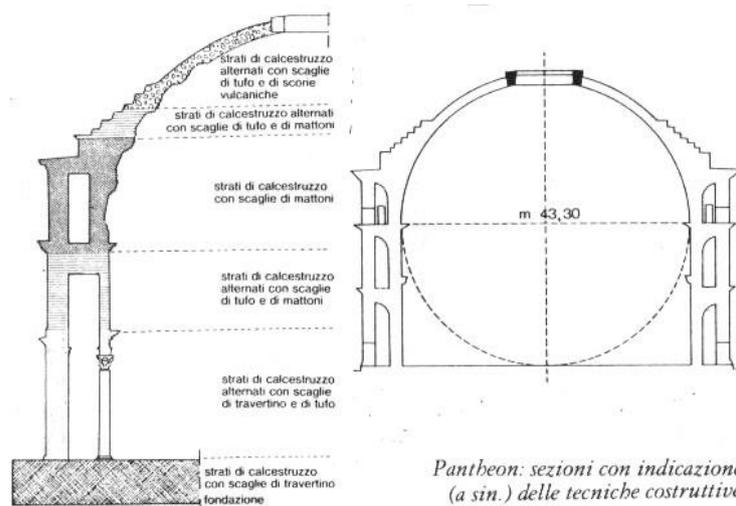


Figura 24: sezione Pantheon con indicazioni delle tecniche costruttive

Il nuovo materiale utilizzato ha un comportamento meccanico, ovvero buona resistenza a compressione, simile a quello delle pietre, ma rapidità di esecuzione dovuta all'uso della pozzolana che mescolatosi con calce conferiva al conglomerato un accelerato indurimento; mentre risulta assai limitata, ma soprattutto non affidabile, la resistenza a trazione. La volta del Pantheon è soggetta all'azione dominante del proprio peso, per cui l'equilibrio di tale azione non sono dominanti gli sforzi di trazione; infatti dalla moderna analisi strutturale di volte sottili sferiche soggette al peso proprio, le tensioni di meridiano sono ovunque di compressione, mentre quelle di parallelo diventano nulle in corrispondenza al valore della

colatitudine⁵ (Figura 25); quindi per valori inferiori le tensioni di parallelo sono di compressione e mentre per valori superiori sono di trazione.

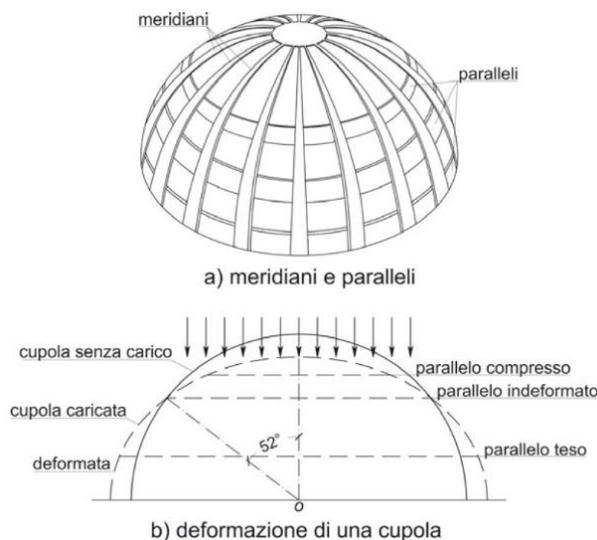


Figura 25: tensioni agenti su cupola

Questi ultimi possono generare stati fessurativi di parallelo, che si possono evitare pensando alla volta costituita da archi disposti in simmetria polare, le cui spinte sono equilibrate dai paralleli aventi spessore verso la base degli archi stessi. Ma l'architetto, ignaro dei principi della moderna meccanica strutturale, decise, invece, di aumentare lo spessore della volta. La ragione di questo, può essere trovata nel fatto che egli d'altra parte conoscesse bene i principi della geometria classica, attraverso i quali il valore di colatitudine coincide, alla quota del parallelo privo di tensione, con la sezione aurea del raggio della sfera. Inoltre in quel periodo, la volta era l'elemento strutturale più utilizzato nelle costruzioni e gli architetti ben conoscevano la possibilità di evenienza di fessurazioni parallele agli archi di meridiano, estese dalla base della volta fino alla quota del parallelo dove la corrispondente tensione cambia di segno. Infatti, l'architetto ha incrementato lo spessore della volta a partire dal parallelo situato alla quota della sezione aurea del raggio, fino alla base della volta. Quindi il Pantheon può essere considerato come antenato delle costruzioni in calcestruzzo utilizzando la statica della struttura, pur ignorando i principi della meccanica delle costruzioni. Infatti pur avendo a disposizione in loco materiali lapidei, naturali o artificiali, questi venivano utilizzati fino alla metà del XVII secolo essenzialmente per colonne, pareti, archi e volte, in quanto era vietata la costruzione di strutture per le quali le tensioni di trazione erano necessarie all'equilibrio. Le sole strutture capaci di resistere a tali sforzi di trazione e

⁵ S. f. [comp. di *co*-² e *latitudine*]. – Il complemento a 90° della latitudine. In geometria, una delle tre coordinate polari di un punto nello spazio (detta anche *distanza zenitale*), e precisamente l'angolo che il raggio vettore congiungente il polo con il punto forma con l'asse polare.

utilizzate spesso in e per grandi dimensioni, furono quelle lignee, che però erano molto sensibili all'azione del fuoco e per tanto avevano una limitata sopravvivenza.

Con la caduta dell'impero Romano si ebbe un declino della qualità delle costruzioni in calcestruzzo, causato non tanto dalla perdita della cultura degli impasti quanto dalla mancata osservanza delle regole Vitruviane. Le fornaci per la produzione calce, un tempo molto curate nei dettagli costruttivi, furono sostituite da forni di campagna, si perse la capacità di scegliere con attenzione le materie di base, si usò con frequenza crescente sabbia sporca ed argillosa, si abbandonò l'uso della pozzolana e del coccio pesto, si confezionarono sempre più spesso impasti con elevato contenuto d'acqua, messi in opera senza pistonatura.

2.2 Dal processo industriale fino alla I Guerra Mondiale

Nel 1750 circa, ad opera dell'inglese John Smeaton, si ebbe la rivoluzionaria scoperta della calce idraulica che permise di abbandonare l'uso di misure a base di calce e pozzolana. Le sperimentazioni sulla cottura di calcari ed impasti a base di calce idraulica portarono, in pochi anni, all'invenzione del cemento Portland, segnando definitivamente la fine del calcestruzzo antico e la nascita di quello moderno. La *Tabella 6* riassume tutte le differenze nelle prestazioni e nella composizione di un calcestruzzo antico e di quelle di un calcestruzzo moderno derivanti principalmente dall'impiego di un diverso legante e di una diversa granulometrica degli aggregati. Una importante differenza tra i due tipi di calcestruzzo (non mostrata in *Tabella 6*) riguarda la durabilità delle strutture paradossalmente migliore in quelle con calcestruzzo romano per l'assenza dei ferri di armatura presenti nelle strutture in c.a. ed esposte a rischio di corrosione.

	CALCESTRUZZO ANTICO	CALCESTRUZZO MODERNO
Legante	calce; calce + pozzolana; calce idraulica;	cemento Portland; cemento pozzolanico; cemento d'altoforno;
Aggregati (inerti)	sabbia e rottami grossi di pietre naturali o mattoni;	sabbia e ghiaia o pietrisco con distribuzione granulometrica continua;
Additivi	prodotti naturali (zucchero, ecc) di non ben definita funzione;	prodotti chimici: fluidificanti, superfluidificanti, aeranti, acceleranti, ritardanti, ecc;
Composizione	suggeriti rapporti tra sabbie, calce, pozzolana e rottami di pietra;	importanza del rapporto acqua/cemento;
Miscelazione	manuale;	con mezzi meccanici (betoniere);
Trasporto	solo a breve distanza;	anche a lunga distanza con autobetoniere e pompe;
Casserature	in legno o con paramenti in mattoni o pietre;	metalliche, di legno, di plastica;

Compattazione	rudimentale con mazze di ferro;	molto efficace, con mezzi meccanici (vibratori ad ago o a parete)
Stagionatura	non precisata;	protezione del getto con teli, nebulizzatori di acqua, pellicole anti-evaporanti;
Indurimento	discreto (fino a 10-15 Mpa)	ottimo ben oltre i 30 MPa

Tabella 6: confronto delle prestazioni e della composizione tra calcestruzzo antico e quello moderno.

Nella seconda metà del XVII secolo con il processo tecnologico-industriale di produzione delle ghise prima e poi del ferro dolce e degli acciai strutturali molte cose cambiarono, come lo sviluppo delle costruzioni, le tecniche esecutive e le forme strutturali. Infatti gli elementi strutturali noti come travi, in configurazione singola, agenti come elementi inflessi o in configurazioni più complesse quali elementi soggetti essenzialmente ad azioni assiali negli organi strutturali denominati strutture reticolari piane o spaziali, oppure a sollecitazioni flessionali e taglianti negli organismi definiti telai sono stati introdotti dopo aver osservato che l'acciaio ha una buona risposta meccanica a stati tensionali monoassiali, essenzialmente di tipo elastico lineare, simmetrica a trazione e compressione. In seguito si sviluppò con grande velocità la strutturistica delle costruzioni metalliche con forme diverse e altezze sempre più prorompenti. Così che nel 1888/89 fu costruita la Tour Eiffel a Parigi (figura 26) seguendo la convergenza della Teoria delle travi di B.De St. Venant, della legge costitutiva elastica generalizzata di R. Hooke e del principio dei lavori virtuali⁶. Altri esempi di strutture metalliche sono negli Stati Uniti il Flatiron Building, primo edificio di circa 100 metri e l'Empire State Building, edificio più alto al mondo fino al 1973 (figura 27).



Figura 26: Torre Eiffel



Figura 27: Flatiron Building e Empire State Building

⁶ Indicato come PLV, afferma che per un sistema in equilibrio statico ad ogni spostamento virtuale infinitesimo nello spazio delle fasi è associato un lavoro meccanico nullo.

Durante questo periodo di grande sviluppo della costruzione metallica, il calcestruzzo iniziò a trovare le ragioni della sua esistenza e della sua crescita nei promettenti risultati che le prime applicazioni lasciarono intravedere e nel loro costo contenuto. La produzione di questo nuovo materiale cominciò successivamente alla scoperta, da parte di J.Asplin⁷ nel 1824 e posta sotto brevetto, del **cemento Portland**, che costituisce la parte idraulica del calcestruzzo. Tale materiale mescolato con acqua e con le parti inerti, costituite da sabbia e ghiaia, permette di formare un conglomerato artificiale, caratterizzato da buona resistenza a compressione e modesta resistenza a trazione. Il grande sviluppo industriale si ebbe più tardi, dopo le scoperte di Isaac, Charles e Johnson (1844) che misero in evidenza l'enorme importanza della cottura fino alla *clinkerizzazione*, e dopo gli studi di Le Chatelier e Michaelis che permisero di fissare la composizione chimica del cemento Portland in modo da poterlo fabbricare artificialmente ovunque, utilizzando e dosando materie prime di diversa origine. Lo stesso Michaelis propose l'aggiunta di pozzolana al cemento Portland affinché, combinandosi con la calce di idrolisi, migliorasse l'idraulicità e l'impermeabilità; con tale intuizione si deve il successivo sviluppo della produzione di cemento pozzolanico con pozzolana naturale o l'impiego di pozzolana artificiale (loppa, cenere volante, fumo di silice) come materiale sia macinato con il clinker sia aggiunto successivamente al cemento. Negli stessi anni in cui assiste al progresso nella produzione del cemento Portland, compaiono anche le prime pubblicazioni relative all'importanza dell'utilizzo di inerti con granulometria assortita al fine di minimizzare il volume di matrice cementizia necessaria al loro riempimento. Il raggiungimento di questo obiettivo ha come effetto sia la riduzione del costo del calcestruzzo (grazie alla riduzione del componente più costoso, il cemento) sia la limitazione degli inconvenienti tecnici legati ad un eccesso di cemento (deformazione viscosa, fessurazioni da ritiro o per gradienti termici). E così si arriva alla formulazione di equazioni che descrivono la combinazione ottimale degli inerti per minimizzare i vuoti tra aggregati, tra quelle ancor oggi utilizzate si può ricordare l'equazione di *Fuller o Bolomey*.

Ma l'invenzione vera e propria del **cemento armato** fu riconosciuta a J.Monier, un giardiniere dell'Orangerie di Versailles, nel 1867, che per impedire l'ossidazione dei cerchioni di ferro che usava per proteggere dal gelo i suoi grandi vasi di fiori, decise di annegare tali cerchioni nella massa di calcestruzzo, di cui i vasi stessi erano costruiti. Da qui il giardiniere realizzò dei recipienti in calcestruzzo di inerte molto fine, le cui pareti avevano

⁷ Imprenditore e fabbricante di cemento che brevettò, nel 1824, un prodotto chiamato Portland Cement il cui colore era simile ad una pietra da costruzione estratta nella località Portland.

uno spessore di 2-4 centimetri ed erano armate con maglie di ferri quadrati o tondi legati ai nodi con filo di ferro, che sostituivano le vecchie casse di legno. Egli pubblicò i suoi brevetti nel 1877 e 1878 e realizzò di tutto con il calcestruzzo armato, da tubi, serbatoi, solette, ponti e scale. Successivamente le premesse teoriche della meccanica strutturale di collaborazione statica tra differenti elementi resistenti, furono alla base della scelta di introdurre all'interno della massa del calcestruzzo, costituente l'elemento resistente, barre metalliche capaci di equilibrare gli sforzi di trazione in esso indotto dalle azioni esterne. Tale collaborazione è incentivata dalla loro elevata aderenza e dalla coincidenza dei coefficienti di dilatazione termica lineare dei due materiali che permette distribuzioni di temperatura uniformi nelle sezioni resistenti degli elementi strutturali, fattore positivo in quanto evita l'insorgenza di fenomeni interattivi negativi. Successivamente, studi teorici e sperimentali, finalizzati a ottimizzare la densità del calcestruzzo, riducendone i vuoti interstiziali fra gli inerti, consentirono di migliorare le caratteristiche meccaniche del materiale, ovvero di resistenza a compressione e aderenza con l'acciaio.

Il primo a elaborare un modello interpretativo del comportamento meccanico degli elementi strutturali in calcestruzzo armato fu l'ingegnere belga F.Hennebique, il quale permise di costruire importanti opere edili e infrastrutturali, come il Ponte Risorgimento sul Tevere a Roma costruito nel 1911, con un arco di luce di circa 100 m e freccia di 10 m (*Figura 28*), nonostante fosse basato su assunzioni errate come la scelta a priori di diagrammi tensionali per elementi inflessi e il dimensionamento delle armature di prete ritenute soggette a tensioni tangenziali. Ad oggi il ponte è in servizio e in buono stato di conservazione, malgrado la presenza di fenomeni fessurativi nella volta a causa della scelta dell'ingegnere del disarmo anticipato, alle quali seguirono ridistribuzioni favorevoli delle sollecitazioni flessionali. Questi effetti evidenziavano gli aspetti di non linearità insiti nella risposta strutturale delle strutture in calcestruzzo armato e gli effetti favorevoli indotti da distorsioni impresse.



Figura 28: Ponte Risorgimento

Successivamente, un grande numero di progettisti, ricercatori ed esperti di meccanica strutturale furono impegnati nella sperimentazione della nuova tecnica costruttiva, facendo emergere le caratteristiche essenziali della risposta strutturale, a seguito della definizione dei fondamenti teorici del dimensionamento formulati su base razionale. Tra questi emerge E. Morsch, professore presso il Politecnico di Zurigo, che pose le basi della cosiddetta Teoria Statica del calcestruzzo armato, mostrando i meccanismi della capacità portante delle strutture con questo materiale. Il modello di Morsch fu posto alla base del primo documento normativo per il progetto e la verifica delle strutture in calcestruzzo armato (“*Der Eisenbetounbau*”, ovvero “*La costruzione in cemento armato*”) pubblicato in Germania nel 1904 e in Francia e in Italia rispettivamente nel 1906 e 1907, seguito da nuove tecniche costruttive oggetto di brevetto. Le ipotesi alla base di tale modello sono in primis la perfetta aderenza dei materiali e la compatibilità deformativa assicurata dalle ipotesi di sezione piana, infine l’assunzione dell’assenza di resistenza a trazione del calcestruzzo, qualunque sia l’orientamento della tensione. Quest’ultima ipotesi permise di introdurre il modello resistente a traliccio per le sollecitazioni di taglio, con angolo di inclinazione delle bielle diagonali di compressione pari a 45° , come richiesto dalle ipotesi di assenza di resistenza a trazione del calcestruzzo, cui corrisponde, al di sotto dell’asse neutro, uno stato di tensione tangenziale costante (Figura 29).

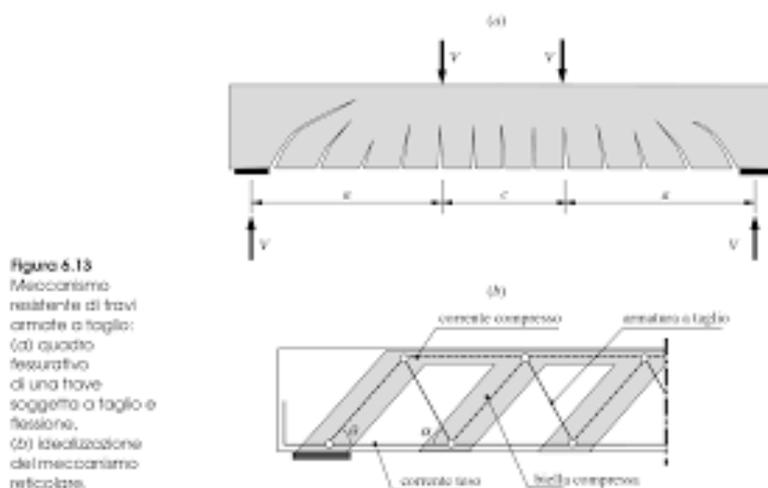


Figura 6.13
Meccanismo
resistente di travi
armate a taglio:
(a) quadro
fessurativo
di una trave
soggetta a taglio e
flessione.
(b) idealizzazione
del meccanismo
reticolare.

Figura 29: meccanismo resistenza a taglio di una trave

Da qui ci fu un grande impulso alle costruzioni in cemento armato, infatti nella prima decade del XX Secolo furono costruiti molti imponenti edifici industriali, in particolare centrali elettriche, dighe e silos per materiali granulari.



Figura 30: Ponte Plougastel

Ma anche infrastrutture come ponti di grande luce, fra i quali emerge il ponte di Plougastel in Francia (Figura 30); un ponte-viadotto ad archi multipli, ciascuno di luce 186m, progettato da E.Freyssinet e costruito nel periodo 1926-30, utilizzando tecniche costruttive innovative, in particolare l'appoggio delle centine sui puntoni galleggianti. Inoltre ad egli va il merito di aver inventato il cemento armato precompresso⁸, in quanto nel 1928 sviluppò dei sistemi di precompressione con acciai ad alta resistenza che generavano compressioni permanenti e sufficientemente elevati e comprese l'importanza dei fenomeni differiti nel tempo. L'idea dalla quale nasce il c.a.p. è molto semplice: se si sottopongono le zone tese, di una trave di calcestruzzo, ad uno sforzo preliminare di compressione (cioè: si «precomprimono»), allorché agiranno i carichi, si potranno registrare sforzi di trazione, nel conglomerato, solo se questi prevarranno su quelli di compressione artatamente impressi.

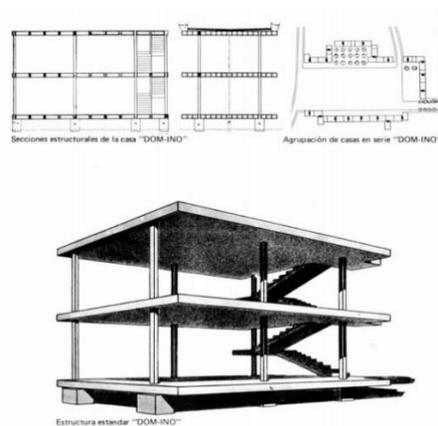


Figura 31: progetto Dom-imo di Le Corbusier

⁸ Se l'acciaio soccorre il cls, sotto forma di barre da annegare nell'elemento di cls, si hanno le strutture in c.a.o. (cemento armato ordinario); quando, oltre ad esserci dei tondini nell'elemento di calcestruzzo, questo è solidarizzato ad una trave d'acciaio (un profilato, una trave composta, ecc.) si hanno le strutture miste acciaio-calcestruzzo; e Se, infine, i cavi d'acciaio vengono assoggettate ad uno sforzo di trazione (prima o dopo la realizzazione dell'elemento di calcestruzzo) si ha il cemento armato precompresso.

Per l'utilizzo nel campo dell'edilizia, invece, dobbiamo aspettare gli anni 1911-1912, in cui l'architetto E.Jeanneret-Gris, detto Le Corbusier concepì il progetto di Dom-ino (*Figura 31*), caratterizzato dalla scomposizione dell'unità di abitazione nei suoi singoli componenti mettendo in luce l'ossatura portante in calcestruzzo armato, ovvero formata da impalcati di spessore costante, colonne, scale, fondazioni, e per unità di maggiore volume ed altezza, i nuclei comprendenti i vani scale ascensori e i cavedi di servizio. Questo progetto, grazie ai bassi costi e all'elevata funzionalità, permise di ricostruire città distrutte dalla I Guerra Mondiale, conferendo alle costruzioni in calcestruzzo armato per l'edilizia un valore sociale ancora oggi percepibile nei condomini cittadini, i cui impianti strutturali, realizzati con getti in opera o mediante elementi prefabbricati si rifanno ai concetti del Dom-ino.

2.3 Tra le due Guerre

Nel ventennio che si estende tra le due Guerre Mondiali emersero le vere potenzialità del materiale, come la plasmabilità del materiale, che permise di realizzare forme e configurazioni strutturali improntate a grande creatività il cui valore era dato dalla stessa forma o dalla complessità statica delle varie membrature. Tale complessità degli impianti strutturali, le loro dimensioni e le particolarità di funzionamento non potevano essere analizzate a quel tempo mediante l'applicazione dei concetti di base della teoria statica, cosicché fu necessaria una collaborazione tra Ingegneria e Architettura e quindi tra approccio concettuale e progetto strutturale. Infatti, tra questi spicca P.L.Nervi, le cui opere esprimono proprio il connubio fra la capacità espressiva del nuovo materiale e la aderenza della forma strutturale alle geometrie della meccanica delle strutture.

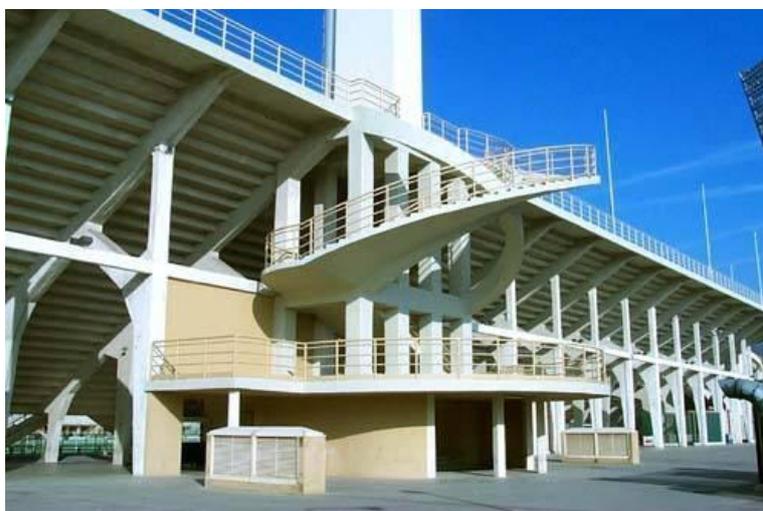


Figura 32: scale elicoidali dello Stadio "Artemio Franchi" di Firenze

Esempio di questo, sono le scale elicoidali (*Figura 32*), la cui progettazione è stata condotta attraverso un'analisi strutturale classica presso l'Università di Bologna, dove egli si laureò, in campo elastico lineare e successivamente gli elementi strutturali attraverso la teoria statica del calcestruzzo armato, arricchita del contributo alla risoluzione del problema della torsione studiato da E.Rausch, che aveva condotto alla formulazione del traliccio spaziale resistente, generalizzazione del modello piano di Morsch stabilito per l'equilibrio in presenza di azioni taglienti.



Figura 33: Hangar di Orbetello

Un'altra opera di connubio tra complessità e raffinatezza è l'Hangar di Orbetello (*Figura 33*). Questa, dal punto di vista della complessità strutturale può esser vista come una volta sottile cilindrica sostenuta da appoggi puntiformi disposti lungo le direttrici perimetrali; in particolare la superficie cilindrica della volta è formata da archi reticolari diagonali che trovano appoggio su una trave di bordo, anch'essa diagonale in modo da contrastare la spinta, e da diaframmi terminali. Tale progetto strutturale si basa su una solida conoscenza delle formulazioni teoriche per lo studio delle volte sottili che il progettista aveva, che lo portò a concepire il continuo bidimensionale quale orditura sottile di elementi essenziali, alleggerendo il sistema e traforando lo spazio. Questa tecnica della maglia strutturale, gli valse il titolo di Architetto-Ingegnere-Costruttore e lo portò a sperimentare per la prima volta la prefabbricazione, che successivamente fu utilizzata nella costruzione di molte sue opere.



Figura 34: Ponte Tavasana

Un'altra figura di Ingegnere-Architetto è quella di R.Maillart, allievo di W.Ritter al politecnico di Zurigo, che sviluppò la sua ricerca sui ponti in calcestruzzo armato. Soluzione innovativa a tali ricerche furono le sezioni trasversali a cassone, dotate di grande capacità flessionale e torsionale e i ponti a travata con voltina irrigidente, come il ponte Tavasana (*Figura 34*); ma anche la scoperta del centro di taglio nelle travi aventi sezione a canale, così da lui chiamato. Nel campo degli impalcati industriali, egli concepì un impalcato con piastra sottile su appoggi puntiformi, rappresentati dalle colonne, esempio di semplicità costruttiva che si distaccava dall'approccio estetico seguito da Nervi. Per questo tipo di impalcato assume ruolo determinante l'effetto di taglio-punzonamento che si manifesta in corrispondenza delle colonne. Per tanto, per assicurare la resistenza dell'impalcato Maillart incrementò la sezione della sottostante colonna mediante un capitello di opportuna larghezza e altezza, aumentando così il perimetro di punzonamento (*Figura 35*). Questo approccio, permise la costruzione di impalcati senza travi, di semplice costruzione ed elevata capacità portante, oggi largamente utilizzati anche negli edifici civili.

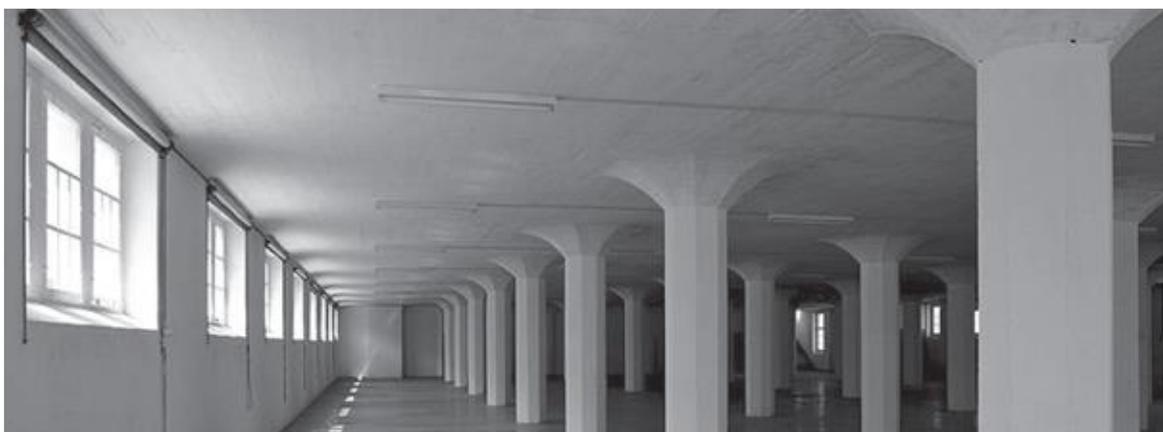


Figura 35: gli impalcati senza travi di R. Maillart

Una terza figura è E.Torroja, i cui aspetti connotativi si evidenziano nella progettazione di strutture a guscio, caratterizzate da grande dimensione e ridotto spessore, in modo da poter realizzare coperture di grande luce, come quelle del mercato di Algeciras e dell'ippodromo della Zarzuela (*Figura 36*), in cui sono presenti elementi a forma di iperboloide di grande aggetto, pur mantenendo la massima leggerezza. Così si sono potute costruire opere con elementi con rapporto tra luce e spessore pari a 250, il cui equilibrio è assicurato da colonne poste lungo la direttrice di affiancamento fra due elementi adiacenti e alla estremità posteriore da un elemento tirante che trova equilibrio nella struttura sottostante, anch'essa aggettante ma avente spessori opportunamente calibrati in modo da offrire un adeguato contrappeso al sovrastante tirante.



Figura 36: ippodromo della Zarzuela

A differenza di Nervi e di Maillart, Torroja aveva un atteggiamento più scientifico⁹ che portò tra le due guerre a nuovi sviluppi significativi della teoria statica del calcestruzzo armato, che permisero di valutare con maggiore precisione aspetti di comportamento e le modalità di misura di sicurezza che tale teoria allora prescriveva. Infatti, furono elaborati nuovi modelli interpretativi che permisero una più completa e affidabile precisione del comportamento strutturale. Tra questi, quelli orientati alla previsione e alla quantificazione dei fenomeni fessurativi, presenti nel calcestruzzo armato quale natura conseguenza dei livelli deformativi consentiti dall'acciaio teso, notevolmente superiori agli allungamenti ultimi del calcestruzzo. Da sapere è che la presenza di fessure comporta la perdita di perfetta aderenza fra i due materiali, il cui effetto riduce la resistenza dell'elemento strutturale nei riguardi della sua durabilità.

⁹ Egli divenne Professore Ordinario di "Fondamenti di Calcolo e Esecuzione di Opere in calcestruzzo armato e precompresso" alla Escuela Special de Caminos, dove fu fra i fondatori delle associazioni europee che a partire dalla metà degli anni 50 si concentrarono sulla progettazione e l'analisi.

Un altro importante campo nel quale molti ricercatori si cimentarono fu la formulazione di leggi costitutive atte a descrivere il comportamento del calcestruzzo precompresso fino alla rottura, da utilizzarsi per la determinazione teorica della resistenza di sezioni in calcestruzzo armato soggette a flessione e forza normale. I risultati della teoria statica, basata sulla ipotesi di comportamento elastico del calcestruzzo precompresso e dell'acciaio teso, dipendevano dal valore del rapporto dei moduli elastici fra acciaio e calcestruzzo, incerto, essendo il calcestruzzo sede di deformazioni differite generate dalle azioni permanenti e pertanto, ci si è voluti orientare su metodi di analisi indipendenti da tale valore. A questa richiesta rispondeva il calcolo allo stato limite ultimo, che però rimase ancorato alla verifica degli stati tensionali del calcestruzzo e dell'acciaio come unico criterio di verifica della corretta risposta strutturale, e quindi in termini di sicurezza, dando luogo a contraddittori risultati.

2.4 Dopo la Seconda Guerra Mondiale

Come è noto, la Seconda Guerra Mondiale portò morte e distruzione in tutte le nazioni europee, le quali al termine di questa avevano la necessità di una estesa ricostruzione che diede così luogo ad una marcata accelerazione del processo evolutivo delle costruzioni in calcestruzzo armato. Furono costruite una grande quantità di costruzioni civili, industriali ed infrastrutturali che fecero emergere l'aspetto economico del problema e la conseguente necessità di ottimizzare il processo costruttivo, non solo nei riguardi delle costruzioni in calcestruzzo armato ma anche quelle in calcestruzzo precompresso che in questo periodo avevano iniziato ad essere realizzate su larga scala.

Per rispondere a tale progresso scientifico, nacquero due Associazioni basate sulla moderna concezione che presiedono all'analisi e al progetto delle costruzioni in calcestruzzo armato. La prima associazione fu la “*Fédération Internationale de la Précontrainte*” (FIP), fondata nel 1952 e la seconda fu il “*Comité Européen du Béton*” (CEB) fondato nel 1953. Particolare attenzione assunse questa seconda associazione, alla quale aderirono ingegneri progettisti, professori universitari, costruttori e tecnici operanti nel campo della direzione dei lavori e della gestione delle costruzioni, in quanto il suo compito riguardò la formulazione di un approccio codificato per la misura della sicurezza strutturale. Infatti su riconosciuto dapprima il carattere di aleatorietà delle grandezze presenti nelle formule di verifica, sia quelle connesse alla resistenza, sia quelle necessarie a definire le azioni applicate alle costruzioni e poi fu definito il concetto di Stato Limite, inteso come quello stato raggiunto il quale l'organismo strutturale o una sua parte non fossero più in grado di garantire le

prestazioni fissate in fase di progetto. Inoltre, in relazione alle caratteristiche prestazionali da prendersi in considerazione per le varie applicazioni, gli stati limite furono suddivisi nelle due categorie di *Stati Limite di Servizio* (SLE) e di *Stati Limite Ultimi* (SLU), i primi relativi a situazioni connesse al corretto funzionamento dell'impianto strutturale durante il suo tempo di vita utile, i secondi relativi a situazioni inerenti il collasso per la perdita di capacità portante. Questo condusse alla necessità di formulare in maniera probabilistica la misura della sicurezza da un lato e dall'altro di dover elaborare modelli affidabili di comportamento per comprendere la capacità dell'organismo strutturale nei riguardi di specifici stati limite. Per quanto concerne il primo aspetto fu introdotto il Metodo Semiprobabilistico agli Stati Limite, il quale fu adottato dai Codici di misura della sicurezza in ambito europeo e per la sua fondatezza anche a livello mondiale. Tale metodo si basa sulla relazione $S \leq R$, ovvero le azioni agenti sulle strutture devono risultare minori o comunque uguali alla resistenza dei materiali; inoltre S e R sono variabili aleatorie, ovvero grandezze cui non si può assegnare un unico valore (deterministico) ma che, se misurate, assumono di volta in volta un valore differente, casuale. Per evitare le difficoltà matematiche e le incertezze statiche dovute alla mancanza dei dati, si riduce la misura della sicurezza al confronto fra due prefissati frattili della distribuzione statica di S,R e definite grandezze caratteristiche, ovvero quali valori di base per le azioni e le resistenze i frattili superiori di probabilità 95% e inferiori di probabilità 5%¹⁰. Invece per quanto riguarda il secondo aspetto, lo sviluppo delle attività del CEB riguardò la formulazione di diversi modelli interpretativi del comportamento strutturale, come il modello di Morsch modificato, formulato da F.Leonhardt e R.Walter per la valutazione della capacità portante di elementi soggetti ad azione di taglio. Tale modello consentì di porre in evidenza gli ulteriori contributi alla resistenza offerti da meccanismi interagenti con il meccanismo resistente a traliccio e introduceva anche i concetti della teoria della plasticità assumendo un angolo di inclinazione delle bielle compresse inferiore a 45° (angolo relativo al modello di Morsch). In relazione agli stati limite di servizio, di significativo interesse furono gli studi relativi allo stato limite di fessurazione e deformazione orientati in particolare alla definizione di una relazione analitica atta a descrivere la deformazione dell'acciaio teso fra le fessure, tenendo conto del contributo irrigidente del calcestruzzo. Lo stesso Leonhardt assunse un contributo irrigidente inversamente proporzionale alla tensione dell'acciaio e tale ipotesi fu introdotta anche nella

¹⁰ Si definisce “frattile superiore al p%” quel valore della variabile aleatoria cui corrisponde la probabilità p% di non essere superato e si definisce “frattile inferiore al p%” quel valore della variabile aleatoria cui corrisponde la probabilità p% di non essere minorato.

definizione del legame momento-curvatura utilizzato per l'analisi deformativa degli elementi strutturali. Inoltre, al fine di descrivere il comportamento in esercizio delle strutture in calcestruzzo armato e precompresso, fu formulato un modello viscoso di puro invecchiamento, descritto da una legge costitutiva di tipo differenziale nella variabile del tempo e per descrivere il comportamento limite del materiale caricato in età avanzata altri modelli di tipo ereditario. Altri importanti contributi riguardano l'ambito dell'analisi strutturale non lineare e in particolare, nelle recenti formulazioni, riguardano la duttilità di sezioni, elementi e strutture, con osservazione specifica al comportamento sotto azione sismica e fatica.

2.5 XXI Secolo

Nel 2000 le due associazioni FIP e CEB si fusero in un'unica associazione “*Fédération Internationale du Béton*” (FIB) e nel 2010 fu pubblicato il Model Code 10, attualmente uno fra i più avanzati documenti nel campo del calcestruzzo strutturale. Inoltre, il CEB seguì la fase preparatoria e redazionale dei documenti Normativi Europei, in particolare l'Eurocodice 2, nel quale si sono riversate, a volte sacrificando la precisione scientifica a favore di una maggiore semplicità d'impiego, molte delle formulazioni di base presenti nei Model Codes. Allo stesso modo i documenti normativi italiani, nella forma di Decreti Ministeriali (DM) hanno tratto ispirazione dai documenti elaborati dal CEB, come il DM 1980 nella quale molte assunzioni presenti nel MC del 1978 furono introdotte nello stesso, in primis il Metodo Semiprobabilistico agli Stati Limite, che poteva essere utilizzato in alternativa al criterio delle tensioni ammissibili¹¹, da sempre utilizzato nei documenti normativi italiani. Tale ambivalenza ha trovato definitiva eliminazione nell'aggiornamento del DM del 2018, dove si prescrive come unico metodo di misura della sicurezza strutturale il Metodo Semiprobabilistico.

A seguito di numerose attività di ricerca, orientate ad una più ampia conoscenza del comportamento del calcestruzzo strutturale e alla definizione dei livelli di rischio sui quali calibrare la misura della sicurezza e altre attività orientate al miglioramento della tecnologia del calcestruzzo, come lo sviluppo di nuovi additivi e di aggiunte, minerali e non, e della sua messa in opera, che a partire dagli anni 80 ad oggi sono stati progettati e formulati

¹¹ La massima tensione a cui un materiale può essere sottoposto con sicurezza nelle condizioni operative e si ottiene dalla tensione di rottura (nei materiali fragili) oppure da quella di snervamento (per i materiali duttili) dividendo per un opportuno coefficiente di sicurezza.

calcestruzzi armati “innovativi”. Si definirono le categorie di “Calcestruzzi ad alta resistenza (HSC)” ed “Calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC)”. La prima categoria, ottenuti mediante l’aggiunta di fumi di silice¹² e poi negli anni 90 con l’aggiunta di fibre d’acciaio, che aumentano la duttilità contribuendo alla riduzione dei fenomeni di rottura che ha permesso di allargare significativamente l’intervallo delle classi di resistenza del calcestruzzo strutturale consentito dai codici di misura della sicurezza, ottenibili senza un eccessivo incremento dei costi di produzione, trasporto e messa in opera senza alterarne sensibilmente le proprietà e le correlate elevate prestazioni.



Figura 37: Kingdom Tower

La crescita dell’efficienza statica del materiale, che nell’attuale millennio ha raggiunto quella dell’acciaio strutturale, risulta un fattore determinante nella costruzione di edifici alti, che ha permesso di elevare notevolmente l’altezza degli edifici con struttura totalmente in calcestruzzo armato. Come nel caso dei 1000 m della Kingdom Tower in Jeddah, Saudi Arabia (*Figura 37*), l’edificio più alto al mondo, in fase finale di costruzione, in cui tutte le parti strutturali sono in calcestruzzo armato.

Molti altri sono i calcestruzzi del XXI secolo: alcuni esempi sono i calcestruzzi reoplastici, caratterizzati da elevata lavorabilità, fluidità, coesività e assenza di segregazione; i calcestruzzi fibrorinforzati includenti fibre polimeriche, vetrose o metalliche, dotati di

¹² I fumi di Silice (SilicaFiume) vengono impiegati per aumentare la densità del calcestruzzo in quanto le sferette di silice tendono a disporsi nei vuoti interstiziali tra i granuli di cemento. Tale addensamento conferisce una maggiore resistenza meccanica rispetto ai calcestruzzi ordinari e una migliore resistenza agli agenti corrosivi ma comporta un notevole aumento dell’acqua necessaria al conferimento del conglomerato. Tale inconveniente viene aggirato grazie all’utilizzo dei superfluidificanti che favoriscono un basso rapporto a/c in favore di un migliore comportamento micro-strutturale.

elevata duttilità nello stadio successivo alla fessurazione; i calcestruzzi autocompattanti, capaci di fruire autonomamente fra disposizioni congestionate di armature e di riempire compiutamente ogni cavità senza necessitare di operazioni di vibrazione; il calcestruzzo a ritiro compensato, contenente agenti espansivi nella fase indurente il cui libero sviluppo, contrastato dalle armature, è in grado di dare luogo a stati di autotensione opposti a quelli indotti dal ritiro, mitigandone gli effetti negativi. Questi e molti altri saranno descritti nel capitolo successivo.

3 L'innovazione

Con questo capitolo, si vogliono descrivere le diverse tipologie di calcestruzzo “innovativo” attualmente presente sul mercato edile e quelle che sono in fase di sperimentazione, in quanto, come è stato scritto più volte all'interno di questa tesi, la ricerca tecnologica è in continua evoluzione al fine di ottenere un materiale sempre più durevole, resistente ma soprattutto sostenibile.

3.1 Le tipologie di calcestruzzo attualmente sul mercato

Al fine di comprendere la finalità dell'evoluzione tecnologica e quindi capire meglio le finalità applicative dei diversi tipi di calcestruzzo “innovativo”, questi si suddividono in quelli il cui utilizzo è legato all'estetica del costruito (ad esempio per risolvere i problemi di attacco chimico degli agenti atmosferici) e quelle finalizzate ad un uso prettamente strutturale (ad esempio in grado di aumentare la resistenza di una struttura). Inoltre, non a caso, si analizza per ultimo il calcestruzzo autocompattante SCC, in quanto si descrivono le caratteristiche fisiche e meccaniche, i riferimenti normativi e i vantaggi e gli svantaggi, in maniera molto dettagliata, con il fine di comprendere meglio i confronti effettuati nella “Parte Seconda: applicazione al caso studio”.

3.1.1 Calcestruzzi estetici

Calcestruzzo drenante

Il calcestruzzo drenante come dice la parola stessa è un calcestruzzo ad elevata porosità con attitudine a lasciarsi permeare dai liquidi, questa sua qualità lo rende un materiale unico ed innovativo. Le pavimentazioni in calcestruzzo drenante costituiscono una soluzione molto efficace per risolvere i problemi connessi allo sviluppo antropico di alcune zone compatibilmente con i valori di rispetto e tutela dell'ambiente.

Intercettando l'acqua superficiale (sia essa piovana o non) e permettendo che si infiltri nel terreno, il calcestruzzo drenante offre molti vantaggi favorendo il reintegro dell'acqua di falda e la riduzione dell'afflusso (inteso come cm di acqua sulla superficie pavimentata) della stessa sulle pavimentazioni stradali. Questa tipologia di materiale elimina l'esigenza di vasche di accumulo, pozzetti e di altri dispositivi per la presa e lo smaltimento dell'acqua piovana e in questo senso, qualitativamente il calcestruzzo drenante comporta una riduzione dei costi generali di progetto derivanti dall'abbattimento in tutto o in parte dei dispositivi tradizionalmente impiegati per l'allontanamento delle acque dalle superfici pavimentate.



Figura 38: differenze permeabilità

Sulle pavimentazioni tradizionali solitamente impermeabili, con particolare riferimento a quelle presenti nelle aree adibite a parcheggio, le acque piovane ricche di sostanze inquinanti, vengono accumulate e convogliate verso i corsi d'acqua naturali dove si versano anche tutti i liquidi inquinanti provenienti dalle autovetture che circolano su esse (carburante, antigelo, solventi, ecc.). L'uso del cls drenante può produrre sostanzialmente due importanti risultati: ridurre l'afflusso generale che arriva su una zona; ridurre il livello di inquinamento contenuto nell'afflusso di cui sopra. Un sistema convenzionale per lo smaltimento della pioggia include strutture di captazione cioè stagni o bacini destinati a bloccare il deflusso della pioggia. Un serbatoio o vasca di accumulo è destinato a trattenere l'acqua che allontanata dalla sede stradale (o dalla pavimentazione in generale) si infiltra nel terreno. Questi elementi sono progettati per scopi di accumulo temporaneo e sono intesi a bloccare il deflusso per poi consentire il successivo scarico nei canali naturali o artificiali o in un sistema di fognatura in un arco temporale sufficientemente lungo da ridurre la portata massima. In quest'ottica i sistemi di pavimentazione in calcestruzzo drenante sono progettati spesso come strutture di captazione ed accumulo. Un vantaggio significativo di questi sistemi è la capacità di "duplicare il valore di una superficie (es. di parcheggio)", ovvero la pavimentazione oltre a fare da supporto per il parcheggio funge da vasca di accumulo. Quindi il calcestruzzo drenante ha benefici funzionali, economici e ambientali.

Il meccanismo di funzionamento è semplicissimo, come si vede in *Figura 39*, l'acqua che arriva sulla superficie in cls drenante viene captata e trasferita al sottosuolo, in questo modo anche la falda può essere rigenerata, con tutte le benefiche implicazioni del caso, una quota parte verrà restituita all'ambiente attraverso l'evaporazione migliorando anche le condizioni termometriche del sito. Il segreto dell'efficacia di questo materiale risiede proprio nella

porosità a pori interconnessi. Generalmente, viene realizzata una porosità fra il 15% e il 25% del volume del calcestruzzo indurito con portate di acqua che lo attraversano intorno a 0.34 cm/s, o 200 L/m²/min, anche se in test di laboratorio sono state registrate portate superiori.

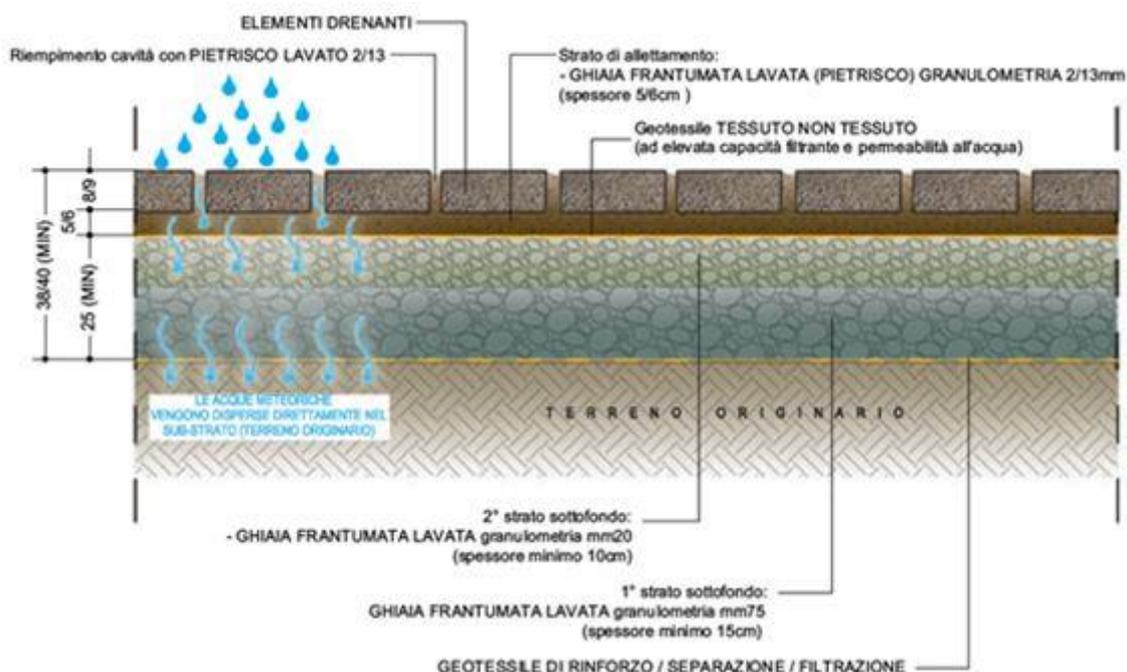


Figura 39: meccanismo di funzionamento calcestruzzo drenante

Applicazioni: sia il basso contenuto di sabbia che l'alta porosità riducono la resistenza meccanica rispetto alle miscele cementizie convenzionali, ma, è comunque garantita una sufficiente resistenza per molte applicazioni nel campo delle **pavimentazioni stradali e pedonali**. Molti altri sono i calcestruzzi innovativi in commercio e che riguardano anche altri campi applicativi come le infrastrutture. Ad esempio il **Calcestruzzo Fotoluminescente**: si tratta di un calcestruzzo strutturale per pavimentazioni con effetto architettonico e fotoluminescente, cioè capace di assorbire energia solare e riemetterla come fonte luminosa di notte. La fotoluminescenza è ottenuta attraverso un particolare processo termico che consente a degli alluminati di aderire al vetro, che in alcuni casi, può essere vetro di riciclo. Può essere fornita in diverse colorazioni, offrendo una vasta possibilità di combinazioni sia cromatiche che di tessitura superficiale. Inoltre il progressivo rilascio della luminescenza può durare diverse ore e dipende anche dalla stagione. La fonte luminosa, naturale o artificiale, che ha contribuito alla carica del materiale deve venire totalmente meno affinché l'effetto di rilascio sia apprezzabile. Va sottolineato che la fotoluminescenza è la fonte di energia pulita, rinnovabile e innocua per gli esseri umani e per l'ambiente circostante.



Figura 40: calcestruzzo drenante con effetto fotoluminescente

Calcestruzzo impermeabile

Al contrario i calcestruzzi impermeabili rendono il calcestruzzo non permeabile, ovvero preservano la struttura e quindi l'edificio dall'ingresso dell'acqua, che a causa del suo composto chimico è la prima causa di degrado delle strutture. Quindi la qualità di tale calcestruzzo è proprio quella di preservare la struttura e quindi la durabilità dell'edificio.

È possibile conferire impermeabilità e capacità di autoriparazione agli impasti cementizi attraverso additivi speciali. Tali additivi si presentano sotto forma di una sospensione colloidale a base acqua di agenti inorganici, caratterizzati da una particolare forma liquida cristallina. Aggiunti in una percentuale del 2-3% del peso di cemento, senza particolari accorgimenti operativi, sono in grado di penetrare all'interno della struttura cristallina del calcestruzzo e di reagire nelle fasi di idratazione, riempiendo con un grande numero di nanocristalli i vuoti capillari, responsabili della porosità del materiale e della permeabilità all'acqua. Il materiale così additivato presenta inoltre una notevole resistenza agli agenti aggressivi e un incremento di resistenza ai cicli di gelo e disgelo, conservando un livello adeguato di traspirabilità. Grazie alla compattezza della micro e nanostruttura del materiale è possibile aumentare fino al 25% la resistenza a compressione, mentre la reattività nel tempo dell'additivo consente di autoriparare le fessurazioni da ritiro.



Figura 41: effetto goccia prodotto dall'additivo

La realizzazione di un calcestruzzo impermeabile consente una notevole riduzione dei tempi e dei costi in fase di costruzione (imputabili alle tradizionali operazioni di impermeabilizzazione) e di esercizio (per l'abbattimento delle operazioni di manutenzione necessarie), in quanto il comportamento degli additivi rimane attivo nel tempo.



Figura 42: utilizzo calcestruzzo impermeabile per trattamento vasche

Applicazioni: Le applicazioni tipiche in realtà sono **sia estetiche** (inteso come rivestimento impermeabile) **che strutturali**, infatti tali calcestruzzi additivati sono utilizzati per serbatoi di acqua potabile; depuratori e vasche per il trattamento dei liquami fognari; tunnel e gallerie; opere di fondazione (platee e muri di contenimento); parcheggi interrati; pavimentazioni; opere sommerse; porti e banchine; dighe e sbarramenti; piscine; elementi prefabbricati.

Calcestruzzo fotocatalitico

Chiamato così perché è caratterizzato dal processo della fotocatalisi, basato sull'uso di catalizzatori, ovvero semiconduttori solidi, in grado di ossidare sostanze nocive e inquinanti fino alla loro completa mineralizzazione e quindi di purificare l'aria, di avere un'azione deodorante e un'azione antimicrobica. Tali effetti autopulente e antinquinante sono ottenuti con l'azione di nanoparticelle di biossido di titanio presenti nel cemento (5-10%). Infatti quantità infinitesime di questo semiconduttore, per effetto dell'assorbimento di energia luminosa, innescano reazioni fotochimiche, partendo da cristalli manometrici che si comportano come particelle fotoattive dell'ordine del micron, cioè ampliate mille volte, creando un sottile film responsabile del raggiungimento delle condizioni di super-idrofilicità, assimilabili a quelli di una foglia di loto, e quindi conferendo la caratteristica di "autopulizia" facendo scivolare via polveri e detriti.

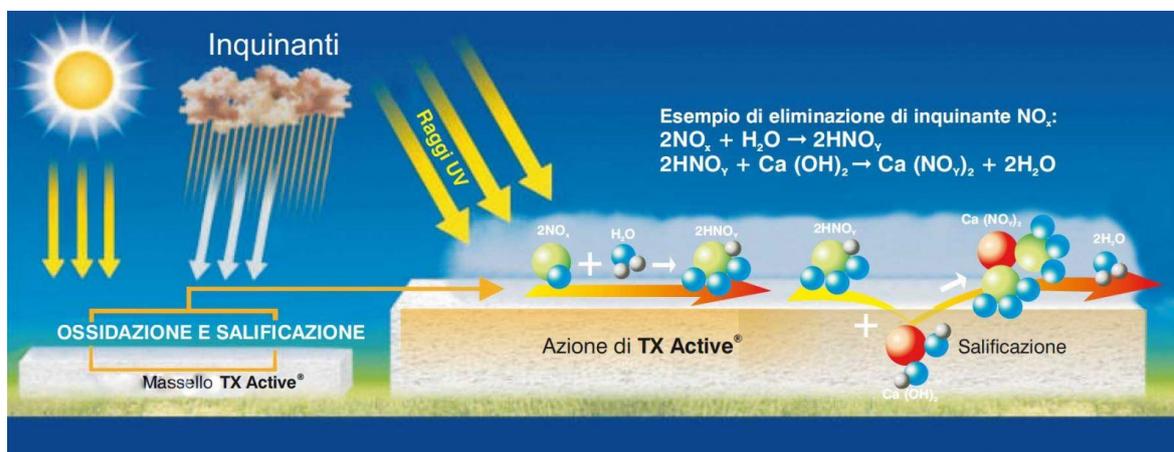


Figura 43: TX Active (Italcementi) – processo fotocatalitico

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 quanto la reazione fotochimica 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 di 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 che sono già presenti in natura anche nelle acque minerali. Il vento e il movimento dell'aria influiscono

favorevolmente sulla fotocatalisi, ovvero spingono le sostanze inquinanti sulla superficie fotoattiva per essere decomposte.

Applicazioni: enormi sono le potenzialità offerte da questi calcestruzzi e molteplici sono anche le destinazioni d'uso sia nelle città che nei piccoli centri, con possibilità, oltre di combattere i problemi legati all'inquinamento, risolvere quelli relativi al **degrado di edifici**, opere infrastrutturali e monumenti, coinvolgendo tutte le superfici intercettate dalla luce, **pavimentazioni e strade comprese**, in un meccanismo di partecipazione attiva.



Figura 44: superficie autopulente della Chiesa Dives in Misericordia a Roma

Calcestruzzo texturizzato¹³

Il sistema Foto-Incisione consiste in un procedimento a controllo numerico, che trasferisce qualsiasi immagine, tramite fresatura o rilievo, su lastre in materiale sintetico, che determina planarità e continuità del facciavista. Come le altre finiture, anche il tipo Foto-Incisione è fortemente influenzato dal gioco solare di luci e ombre. Il maggior risalto dell'immagine è normalmente ottenuto quando i raggi del sole illuminano la facciata a 45° ed è proprio secondo la posizione solare che vengono ottenuti diversi effetti visivi sul calcestruzzo. La lavorabilità, la durabilità e la resistenza dipendono dalle specifiche formulazioni utilizzate.

Applicazioni: il texturizzato è un calcestruzzo più espressivo e quindi utilizzato **a fini estetici** dell'edificio, in quanto caratterizzato da segni e disegni delle superfici lasciate a vista, variabili in relazione agli accessori, alle matrici e alle casseforme utilizzate. Gli effetti

¹³ Il termine texture trae origine dalla parola latina *textura* che significa letteralmente “tessitura” o “trama”, ossia l'intreccio delle parti che compongono un insieme.

ottenibili sono davvero illimitati, considerando la versatilità della tecnologia costruttiva e la possibilità di personalizzare ogni motivo grafico ed effetto “epidermico”.



Figura 45: rifinitura del facciavista con calcestruzzo texturizzato con effetto legno (sinistra) e con foto-incisione (destra)

Calcestruzzo traslucido

È un cemento trasparente, ovvero un manufatto cementizio fibrorinforzato prefabbricato che, in virtù della presenza di inserti polimerici trasparenti (fibre ottiche) opportunamente dimensionati, è in grado di presentare caratteristiche di trasparenza su scala macroscopica. Le caratteristiche di trasparenza si traducono nella capacità di trasmettere la luce, naturale o artificiale, e di consentire all’occhio umano di ricostruire immagini di oggetti posti al di là del manufatto. Inoltre le fibre ottiche possono anche essere colorate, in modo da trasmettere così i colori all’interno dell’edificio. Invece, se al posto delle fibre vengono incorporate nella miscela resine particolari, che reagiscono sia con la luce artificiale che con quella naturale, queste creano una luce calda e morbida all’interno dell’edificio e restituiscono un’immagine di chiaro nitore all’esterno, e quindi oltre a filtrare luce garantiscono solidità e isolamento.



Figura 46: rifinitura del facciavista con calcestruzzo traslucido – Padiglione Shanghai Expo Italia 2016

Applicazioni: tale calcestruzzo può essere utilizzato per applicazioni strutturali connesse a **spoci decorativi**, proprio perché la luce riesce ad attraversare il materiale e ciò consente, come si è detto, di cogliere le ombre degli oggetti posposti e di regalare un effetto superficiale sorprendente. L'ulteriore sviluppo di questo tipo di materiali, che indagano il rapporto tra massa opaca e traslucida, è rappresentato dalle sperimentazioni che hanno come obiettivo quello di rendere "intelligente" il conglomerato: si tratta dello **Smart Concrete**, ideato da Kennedy e Violich di Boston, che integra diodi controllati da sensori per indicare percorsi nell'oscurità, e dello **Smart Brick**, sviluppato da Chang Liu al Centre for Nanoscale Science and Technology dell'Università dell'Illinois, che contiene sensori e dispositivi di microelettronica, basati sulle fibre ottiche, nonché un trasmettitore che rileva temperatura esterna, vibrazioni, presenze umane, e invia le informazioni a un sistema di gestione delle emergenze.



Figura 46: pavimentazione esterna con calcestruzzo Smart Solar Brick

3.1.2 Calcestruzzi strutturali

Calcestruzzo ad alta resistenza

Nominati Ar o HSC (High Strength Concrete) sono quei materiali la cui resistenza caratteristica a compressione risulti superiore a quella ammessa dai regolamenti nazionali vigenti in ciascun paese. Poiché la normativa italiana non consente di assumere nei calcoli statici valori della resistenza caratteristica su cubi superiori a 55 N/mm^2 , automaticamente il limite inferiore di resistenza meccanica dei HSC è individuabile in 60 M/mm^2 . Inoltre le linee guida sul calcestruzzo strutturale a cura del Servizio Tecnico Centrale della Presidenza del Consiglio Superiore dei LL.PP., definisce calcestruzzi ad alta resistenza quelli con R_{ck} variabile tra 85 e 115 N/mm^2 , mentre resistenza cubica > 75 e $\geq 115 \text{ N/mm}^2$ e un rapporto a/c minore di $0,35$. Le caratteristiche del materiale sono un maggior contenuto di alite nel

cemento (il costituente che più contribuisce alla resistenza meccanica); l'elevato dosaggio di cemento ($400-550 \text{ kg/m}^3$); maggiore finezza di macinazione del cemento; l'utilizzo di additivi superfluidificanti di ultima generazione (acrilici) che ha consentito di ridurre drasticamente il rapporto a/c senza penalizzare la lavorabilità del calcestruzzo; l'utilizzo di microsilice come aggiunta minerale, che ha consentito di ridurre la porosità della pasta di cemento e di migliorare, grazie alla diminuzione del bleeding¹⁴, la qualità della zona di transizione (*Figura 47*) e l'eventuale utilizzo di fibre di acciaio per ridurre la fragilità del calcestruzzo.

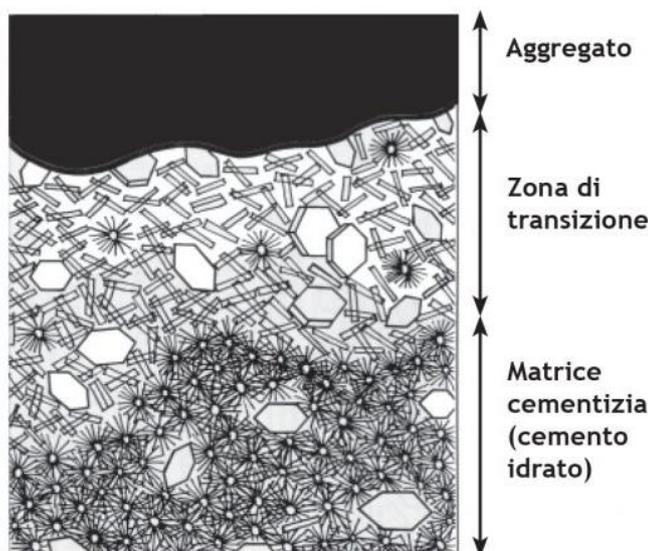


Figura 47: rappresentazione schematica di un calcestruzzo nella zona di transizione tra aggregato lapideo e matrice cementizia

Comparando i diagrammi sforzo-deformazione a compressione degli HSC con calcestruzzi tradizionali si nota come il ramo ascendente dei materiali HSC è molto più lineare e tale linearità si protrae fino a valori dello sforzo prossimi alla resistenza a compressione del materiale; in corrispondenza del massimo sforzo, i materiali HSC presentano una maggiore deformazione; infine una brusca caduta del ramo discendente ed una minore deformazione ultima entrambi indici di una maggiore fragilità dei materiali HSC. Tale comportamento è da imputare al miglioramento della qualità del materiale all'interfaccia pasta cementizia-aggregato (diminuzione del bleeding) grazie alla presenza del fumo di silice, in quanto nei calcestruzzi ordinari le microfratture all'interfaccia pasta-aggregato si iniziano a manifestare

¹⁴ Tradotto significa "essudazione" e consiste nella risalita in superficie, durante il costipamento del conglomerato cementizio, di una parte dell'acqua di impasto con la formazione di uno strato d'acqua e cemento (boiacca) sulla superficie del conglomerato.

quando lo sforzo raggiunge il 65% della resistenza a compressione, mentre nei calcestruzzi ad alta resistenza tale fenomeno si innesca quando lo sforzo raggiunge l'80% della resistenza a compressione. Infine dati sperimentali indicano che la deformazione viscosa di calcestruzzi ad alta resistenza è sostanzialmente inferiore rispetto a quello di un calcestruzzo ordinario.

Applicazioni: i calcestruzzi ad alta resistenza, sono stati largamente utilizzati nella realizzazione delle **piattaforme** offshore dei madel Nord e di **ponti di grande luce**, come il ponte Storebelt in Danimarca e il ponte Perthuiset in Francia (*Figura 48*), dove per le eccezionali sollecitazioni meccaniche ed ambientali era impossibile impiegare calcestruzzi NSC.



Figura 48: ponte Storebelt(sinistra) e ponte Perthuiset(destra)

Altre applicazioni del calcestruzzo ad alta resistenza riguardano la **costruzione dell'edificio** della Grande Arche de la Defense a Parigi, le Two Union Square (*Figura 49*) e Pacific First Center di Seattle e più recentemente per il Ponte della Musica a Roma (*Figura 50*). I calcestruzzi HSC sono stati utilizzati anche nel settore dei **contenitori per reattori nucleari** e **nella realizzazione di grandi tunnel sottomarini** quali ad esempio quelli costruiti al di sotto del Canale della Manica per collegare Francia e Inghilterra.



Figura 49: Grande Arche de la Defense(sinistra) e Two Union Square(destra)



Figura 50: Ponte della Musica

Calcestruzzo ad alte prestazioni

Nominati AP o HPC (High Performance Concretes) sono quei calcestruzzi che hanno resistenza meccanica a compressione variabile tra 60 e 75 N/mm², come indicato dalle linee guida sul calcestruzzo strutturale, con resistenza cubica > 55 e ≤ 75 N/mm² e rapporto a/c minore di 0.45. Rispetto agli HSC i calcestruzzi ad alta prestazione devono garantire, oltre che un'elevata resistenza meccanica a rapido sviluppo, anche una maggiore lavorabilità in fase di getto ed un'elevata durabilità. Tali caratteristiche sono garantite dall'utilizzo di una diversa composizione della miscela, ovvero un ridotto rapporto a/c per l'impiego di superadditivi; impiego di aggiunte minerali, da sole o in combinazione tra loro, ad alto comportamento pozzolanico e/o elevata area specifica (microsilice, ecc.); aggregati di frantumazione di alta qualità (basalto, granito, quarzite, ecc.) capaci di assicurare un'elevata resistenza meccanica intrinseca della roccia ed un'ottima adesione all'interfaccia tra l'elemento lapideo e la matrice cementizia. È bene prestare particolare attenzione alla formulazione e alla stagionatura umida, al fine di evitare fessure di ritiro autogeno che si potrebbero manifestare a causa proprio del basso rapporto a/c della miscela. In caso di temperature ambientali elevate, condizione questa che implicherebbe aggiunta di acqua, è opportuno incrementare il dosaggio di superfluidificante, aggiustando le qualità dei vari componenti. Gli HPC hanno inoltre una grande espressività per la realizzazione di strutture a geometria complessa e con sezione ridotta addirittura del 30%.

Come evoluzione dei calcestruzzi HPC, ci sono cinque particolari tipi di HPC speciali ad altissima resistenza meccanica, che si differenziano per formulazione ma anche modalità di messa in opera:

- **HPLC (High Performance Light Concrete)**, che presentano una massa volumetrica ridotta (anche pari a 2000 kg/m³), mantenendo una resistenza meccanica

elevata, attorno a 70-89 N/mm² e un'impermeabilità ai fluidi naturali. Il suo utilizzo è indicato in tutti i casi in cui vi sia anche necessità di isolamento termico, come ad esempio nella coibentazione di solai, coperture, terrazze, riempimenti di interstizi, protezione di tubazioni e rivestimenti ignifughi;

- **HPS (High Performance Shotcrete)**, o calcestruzzi proiettati ad alte prestazioni, che sfruttano il miglioramento nell'adesione tra impasto e substrato e l'incremento di durabilità di rivestimento, favorito dall'impiego di superfluidificanti e cementi di miscela con fumo di silice. Utilizzato in larga parte per intervenire su calcestruzzo che necessita di ristrutturazione, ad esempio in caso di deterioramento dal tempo e dagli agenti atmosferici, ma anche per garantire elevata impermeabilità al rivestimento;
- **HVFC (High Volume Flyash Concrete)**, caratterizzati da un alto volume di ceneri volanti con composizione variabile in base al tipo di carbone e alla qualità residua di incombusto;
- **RPC (Reactive Power Concrete)**, che prevedono resistenze meccaniche a compressione superiori a 200 N/mm² (RPC₂₀₀) e con tecniche produttive sofisticate si può arrivare fino a 800 N/mm² (RPC₈₀₀). Con i RPC oltre alla maggiore resistenza meccanica, viene modificato il comportamento da fragile a duttile del calcestruzzo mediante l'utilizzo di fibre, generalmente in acciaio. Per quanto concerne la resistenza meccanica a compressione del conglomerato, questa viene aumentata riducendo il rapporto a/c e quindi diminuendo la porosità capillare. Poi il secondo passo è l'aggiunta di additivi superfluidificanti, a base di naftalina o melammina e dotata di fumo di silice, permettendo l'adozione di rapporti a/c molto bassi (0,35 – 0,45) senza dover rinunciare alla lavorabilità del conglomerato, i quali sono andati a migliorare l'azione dei fluidificanti¹⁵. Altri ingredienti utilizzati sono il cemento a basso tenore di celite e assenza di aggregato grosso e presenza solo di polvere reattiva, come la sabbia quarzosa in modo che la matrice cementizia del materiale RPC si presenta molto più densa e quasi completamente priva di porosità capillare. Così facendo la maggiore caratteristica è la duttilità del materiale sollecitato a

¹⁵ La differenza tra i due additivi è più quantitativa che qualitativa. Infatti l'inconveniente dei superfluidificanti è legato al loro massimo dosaggio, ovvero 2-3% sul cemento, poiché si è constatato che valori superiori comportano una lieve caduta nella resistenza meccanica provocata dalla raccolta d'acqua (bleeding) nella zona di transizione tra la matrice cementizia e gli aggregati lapidei, limitando quindi la massima resistenza meccanica a valori dell'ordine di 80-90 N/mm², problema che si è risolto con l'aggiunta del fumo di silice privo di incombusti.

trazione o flessione grazie alla compartecipazione delle fibre che intervengono nella distribuzione dei carichi, eliminando l'uso dei rinforzi convenzionali;

- **UHPC (Ultra High Performance Concrete)**, che evidenziano un incremento resistenze a compressione superiore dei 200 MPa, grazie alla struttura particolarmente densa che è dovuta alla compattazione prolungata dell'impasto durante il confezionamento e la presa, nonché per trattamento termico a 400°C, cui vengono sottoposti a indurimento avvenuto, trattamenti che li assimilano ai materiali ceramici. L'assenza di impurità e vuoti nella matrice cementizia permettono di ottenere ottime caratteristiche di durabilità e resistenza agli agenti aggressivi, riducendo drasticamente i costi di manutenzione delle strutture e mitigando gli impatti ambientali propri del normale ciclo vitale di un manufatto in calcestruzzo ordinario (dalla produzione, alla manutenzione, alla dismissione).

Applicazioni: il materiale è stato inizialmente utilizzato per realizzare **opere di ingegneria civile sottoposte a elevati carichi statici e dinamici**, ad azioni ambientali aggressive, come il contatto con acqua marina, o per realizzare opere soggette adisposizioni per le zone sismiche. Grandi infrastrutture, manufatti di ingegneria chimica e ambientale, costruzioni resistenti all'urto (antiscoppio e antiproiettile) e all'abrasione trovano nel calcestruzzo ad alte prestazioni il materiale più idoneo per l'elevata resistenza meccanica ma anche la duttilità e la tenacità che riesce ad assicurare. Anche le opere di architettura e ingegneria meno sollecitate favoriscono una sempre maggiore diffusione dell'HPC, soprattutto per l'elevata durabilità, garantita da ridotti rapporti acqua/cemento, nonché per la rapidità produttiva, correlata all'ottima lavorabilità. Per quanto concerne, l'HPLC, che non consente di raggiungere resistenze meccaniche elevatissime, il suo utilizzo è indicato in tutti i casi in cui vi sia anche necessità di isolamento termico (nella coibentazione di solai, coperture) ma anche per garantire elevata impermeabilità al rivestimento.

Calcestruzzo fibrorinforzato

Denominato FRC (Fiber Reinforced Concrete) è costituito da una matrice di calcestruzzo ordinario, malta o pasta di cemento, nel quale vengono aggiunti e distribuiti in maniera omogenea elementi fibrosi discontinui per rinforzare la matrice cementizia. Tali elementi fibrosi possono essere di diversa natura, come acciaio, plastica, vetro, ghisa ecc. L'aggiunta di fibre in forma dispersa ne modifica le proprietà meccaniche e fisiche e, in particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure

dovute al ritiro igrometrico, conferendo una significativa resistenza residua a trazione, buone caratteristiche di tenacia e durabilità, buona resistenza all'urto (resilienza) e alla fatica all'abrasione. Infatti le fibre esercitano sul calcestruzzo una vera e propria azione di cucitura delle aperture creando una sorta di ponte di collegamento (crack-bridging) tra lembi delle fessure stesse, consentendo il trasferimento degli sforzi di trazione (tension-softening).

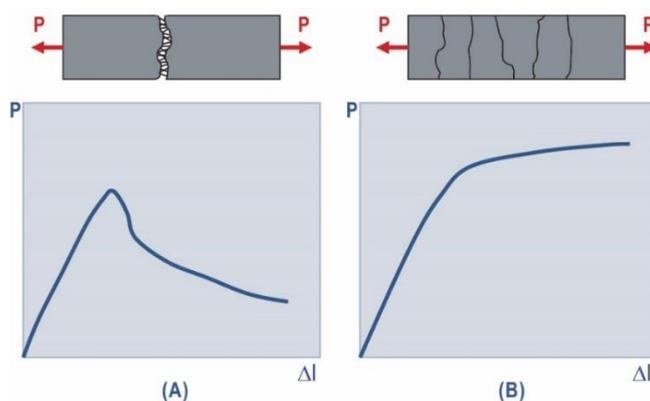


Figura 51: calcestruzzo fibro-rinforzato sottoposto a carico di trazione (P) con allungamento Δl : comportamento degradante (A) e incrudente (B)

I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo di fibre sono sia costruttivi che strutturali, come ad esempio l'eliminazione o notevole riduzione dei tempi di posa in opera dell'armatura, con conseguente riduzione dei costi della manodopera e dei tempi di controllo della direzione lavori e il miglioramento della duttilità del conglomerato. Essendo l'allungamento a rottura delle fibre circa 2-3 ordini di grandezza superiori alla deformazione a rottura della matrice cementizia, la crisi del conglomerato avviene molto prima che si possa verificare la rottura delle fibre, permettendo quindi di ridurre il comportamento fragile della matrice cementizia. Raggiunta la deformazione di prima fessurazione, il calcestruzzo fibrorinforzato ha un comportamento elasto-plastico, quindi duttile, nella fase postfessurata, cioè è in grado di sopportare carichi anche dopo l'insorgenza delle prime fessurazioni.

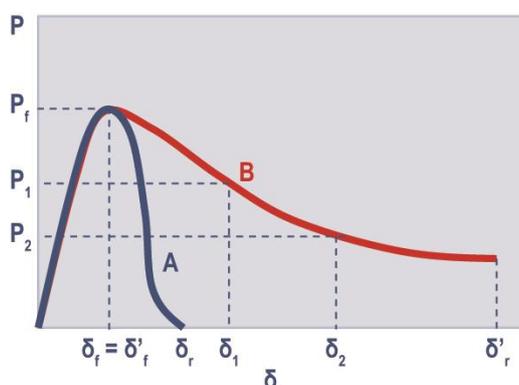


Figura 52: schematizzazione della curva $P-\delta$ in una prova di flessione senza intaglio per un calcestruzzo ordinario (O) e fibro-rinforzato (FRC)

Altri pregi sono la maggiore resistenza a fatica; maggiore resistenza agli urti; maggiore resistenza allo stress termico e maggiore resistenza all'abrasione. Mentre tra gli svantaggi dei calcestruzzi fibrorinforzati vi è solo la minore lavorabilità dell'impasto, risolta facilmente con l'aggiunta di additivi superfluificanti all'impasto, inoltre le fibre non apportano nessun vantaggio significativo in termini di resistenza a compressione del calcestruzzo.

Applicazioni: le fibre si distinguono a seconda dei benefici che apportano alla matrice cementizia in fibre strutturali e fibre non strutturali. Le prime, in acciaio o materiale polimerico con modulo di elasticità più alto della matrice di cemento, vengono utilizzate per la realizzazione di **pavimenti industriali**, in cui le fibre sostituiscono le reti elettrosaldate utilizzate per contrastare la propagazione delle fessure; la realizzazione di conci prefabbricati per i rivestimenti definitivi delle gallerie e per i rivestimenti sia provvisori che definitivi realizzati con calcestruzzi spruzzati. Le seconde, in materiale polimerico (fibre polietileniche, di poliestere, di nylon, di carbonio o acriliche) o vetro o di natura organica con modulo di elasticità più basso della matrice di cemento, utilizzati per la realizzazione di calcestruzzi destinati prevalentemente a **solette e pavimenti di piccolo spessore per attuare il rischio fessurativo** derivante dal ritiro plastico del conglomerato.

Calcestruzzo da materiali riciclati

Obiettivo è stato sviluppare tecnologie che permettessero di riutilizzare materiali di scarto, come plastiche miste provenienti dalla selezione dei rifiuti solidi urbani; pneumatici a fine vita; scarti da demolizione di edifici e il riciclo dell'acqua di lavaggio delle autobetoniere in sostituzione di quella potabile in modo da ridurre la percentuale di rifiuti edili; schiume di poliuretano recuperate da frigoriferi dismessi; plastiche provenienti da apparecchiature elettriche e elettroniche e sottoprodotti del processo di produzione dell'acciaio, destinati a essere smaltiti, per la realizzazione di nuovi prodotti da costruzione con alto valore aggiunto.

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	percentuale di impiego
Demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100%
Demolizioni di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C30/37	≤ 30%
	≤ C20/25	fino al 60%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe	≤ C45/55	fino al 15%
da calcestruzzi > C45/55	Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%

Figura 53: valori limite in % materiale da riciclo della Tab. 11.2.III della UNI EN 12620

In questo quadro, tendente a favorire l'utilizzo di aggregati riciclati limitando lo sfruttamento di risorse naturali non rinnovabili, non solo tale utilizzo non è decollato, ma la disponibilità di aggregati riciclati si è drasticamente ridotta, rendendo di fatto irrealizzabili anche le sparse applicazioni in cui l'impiego di tali aggregati era previsto in capitolati di amministrazioni pubbliche nel rispetto del D.M. 08 maggio 2003 n. 203 (noto anche come "Decreto 30%"), emanato con l'obiettivo di incentivare il ricorso a materie prime seconde e quindi a sostenere la nascita e lo sviluppo di un mercato dei materiali riciclati e recuperati, imponendo ad amministrazioni pubbliche e società a controllo pubblico il ricorso a prodotti riciclati per coprire almeno il 30% del fabbisogno annuo di materiali e beni.

Sulla base di una recente indagine condotta da ATECAP, secondo gli operatori dell'industria delle costruzioni le cause del mancato utilizzo risiedono nell'ordine in: scarsità o addirittura assenza di domanda di calcestruzzo preconfezionato prodotto utilizzando aggregati riciclati; mancanza di certezza sulle caratteristiche tecniche degli aggregati riciclati; difficoltà nel reperimento di tale materia prima seconda; mancanza di compatibilità delle proprietà degli aggregati riciclati con le norme tecniche sulla produzione di calcestruzzo; assenza di offerta di aggregati riciclati nel territorio di competenza; mancato sviluppo di adeguate miscele.

Applicazioni: il risultato è un prodotto cementizio leggero, ecologico ed economicamente sostenibile, in grado di assicurare **l'isolamento termico e acustico**, ovviamente verificato in termini di proprietà meccaniche e resistenza al fuoco, che può essere utilizzato sia per applicazioni premiscelate che prefabbricate. Inoltre permette di ridurre anche le emissioni di CO₂ e di incrementare il rapporto costo/efficacia grazie ai costi più bassi dei materiali che compongono il calcestruzzo. Tale tipo di calcestruzzo alleggerito è utilizzato soprattutto per il massetto, sottofondi, pannelli per facciate, blocchi cementizi per murature e pavimentazioni. Inoltre, negli ultimi anni si sta spingendo all'utilizzo di questi materiali riciclati e quelli provenienti da aggregati di recupero anche nella **produzione di calcestruzzo strutturale**, infatti la norma UNI 11104:2016 (insieme alla UNI EN 12620) consente l'utilizzo del materiale di riciclo nel calcestruzzo definendone la conformità, le modalità (cementi, aggiunte ed aggregati) ed i limiti d'utilizzo.

Calcestruzzo polimero-impregnato

Più noto come PIC (Polymer-Impregnated Concrete), è un materiale composito molto speciale che si ottiene impregnando il conglomerato cementizio (precedentemente essiccato) con un liquido monomero, di solito metil-metacrilato (MMA) o anche stirolo, che riempie

quasi tutte le cavità entro il calcestruzzo; poi facendo polimerizzare il monomero all'interno del calcestruzzo e formando così un solido a porosità trascurabile o nulla, e quindi con capacità notevoli di resistere agli agenti aggressivi, inclusi gli acidi, ma soprattutto con prestazioni meccaniche così straordinarie da poter essere lavorato e rifinito con operazioni meccaniche tipiche dei materiali metallici. Il processo di trasformazione da tante molecole di monomero (per esempio metil-metacrilato, liquido) in poche macromolecole polimeriche (polimetil-metacrilato, solido) è solitamente molto lento, quasi nullo, al punto che il composto può persistere nello stato monomerico anche per un tempo molto lungo a temperatura ambiente.

Il calcestruzzo è un tipico conglomerato prodotto in un impianto di betonaggio convenzionale con cemento Portland (circa 350 kg/m³), a/c di circa 0,50, diametro massimo dell'inerte di circa 20 mm. A meno che non si adoperi il processo di maturazione a vapore ad alta temperatura, non si consiglia l'impiego di pozzolana, cenere volante o loppa che, a temperatura ambiente, richiederebbero una lunga stagionatura prima di essere coinvolte nella produzione di C-S-H secondario. Nella maturazione si preferisce una stagionatura a vapore a quella eseguita a temperatura ambiente in linea con una produzione accelerata e quindi industrializzata del PIC. Le migliori prestazioni si ottengono con un trattamento a vapore ad alta pressione, cioè a temperatura maggiore di 100°C (solitamente a circa 175°C per 3 ore) e quindi con una pressione del vapore ben maggiore di quella atmosferica, che comporta l'impiego di un'autoclave. I conglomerati così ottenuti, detti calcestruzzi autoclavati, sono quindi riscaldati con aria calda a 110-150 °C per rimuovere l'acqua libera. La rimozione dell'acqua libera del calcestruzzo, eventualmente accelerata con un riscaldamento sotto vuoto, è seguita dall'immersione in liquido monomerico (solitamente MMA) per circa 20 minuti al fine di impregnare il calcestruzzo saturandone tutta la porosità interna e superficiale. Il processo di polimerizzazione può avvenire riscaldando il manufatto di calcestruzzo impregnato con monomero e catalizzatore (processo termo-catalitico), oppure esponendo il manufatto alle radiazioni gamma del ⁶⁰Co. Il processo termo-catalitico si realizza molto semplicemente immergendo il manufatto in un bagno di acqua calda (50 cm di altezza) a 75°C preliminarmente saturata con il monomero MMA: questo accorgimento evita che durante il riscaldamento a circa 75°C, necessario per la polimerizzazione in tempi relativamente brevi, il monomero situato nella parte corticale del calcestruzzo possa parzialmente evaporare prima ancora di polimerizzare. La presenza di acqua, satura essa stessa di monomero, impedisce a quello che si trova nel calcestruzzo di fuoriuscire e si realizza pertanto una completa polimerizzazione soprattutto nella parte corticale più

attaccabile dalle azioni aggressive alle quali il manufatto sarà esposto in servizio. Lo stadio finale di lavorazione e finitura superficiale con le tecniche tradizionali di tornitura, trafileatura, ecc. tipiche dei materiali metallici è di fondamentale importanza per ottenere manufatti funzionali oltre che esteticamente molto pregevoli.

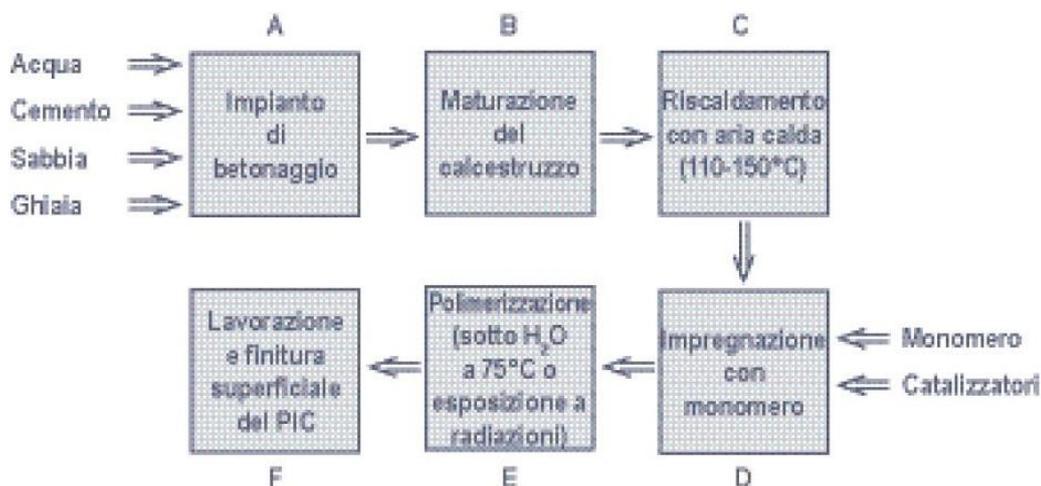


Figura 54: schematizzazione processo produttivo PIC

La principale caratteristica prestazionale del PIC è la elevata resistenza meccanica a compressione che varia da 100 MPa, se il calcestruzzo è confezionato con aggregati porosi fino a circa 180 MPa, con calcestruzzi contenenti aggregati ordinari e maturazione a vapore ordinaria. Un ulteriore incremento fino a circa 200 MPa può essere ottenuto se si impiegano i calcestruzzi “autoclavati” che comportano, però, costi più elevati non sempre giustificati dal miglioramento prestazionale. Miglioramenti prestazionali (da calcestruzzo ordinario a quello polimero-impregnato) del 200-300% sono conseguibili anche nella resistenza meccanica a trazione e flessione. Il modulo elastico, invece, aumenta solo di circa il 70-80% con forte estensione del comportamento elastico-lineare fino a circa il 50-70% del carico di rottura di tipo fragile. Miglioramenti altrettanto significativi quanto quelli relativi alle prestazioni meccaniche, e anch’essi correlati con l’annullamento pressoché totale della porosità capillare della matrice cementizia, sono stati registrati per la durabilità. Oltre a resistere alle più severe condizioni di aggressioni convenzionali per le opere dell’ingegneria civile quali il gelo-disgelo o l’attacco solfatico, il PIC resiste particolarmente bene all’azione dilavante di acqua demineralizzata ed all’attacco di acque acide.

Applicazioni: sono tutte di “nicchia” e quasi sempre destinate a **settori dell’ingegneria industriale** o a rivestimenti per costruzioni di grande valore architettonico per l’aspetto tipo-marmo che si riesce ad ottenere. Un’altra importante applicazione riguarda il **settore delle tubazioni**. Tubi in PIC senza armature metalliche si comportano molto meglio delle

corrispondenti tubazioni in calcestruzzo armato non solo per quanto concerne la pressione idrostatica che possono sopportare ma anche, e soprattutto, per la migliore resistenza all'attacco chimico di carattere acido come, per esempio, quelle di acque reflue-domestiche ed industriali. **Rivestimenti** in PIC possono essere utilizzati per proteggere il substrato in calcestruzzo in molte applicazioni industriali esposte a sollecitazioni di carattere straordinario.



Figura 55: pavimentazione industriale (sinistra) e tubazione per smaltimento acque (destra)

Applicazioni per il pregevole aspetto del PIC vanno da elementi decorativi per giardino, pavimentazioni a mosaico e moduli per posto-barca attrezzato in porti turistici e, perfino, statue di rilevante pregio artistico. Il PIC presenta, invece una scarsa durabilità se è messo in contatto con acque contenenti cloruro (opere marittime e autostradali esposte a sali decongelanti nei periodi invernali). Il cloruro provoca infatti la de-polimerizzazione del PMMA (cioè riduce il polimero solido in monomero liquido) con conseguente penetrazione dell'acqua contenente cloruri.

Calcestruzzo a ritiro compensato

Il calcestruzzo a ritiro compensato è un conglomerato cementizio speciale, contenente un particolare ingrediente (agente espansivo) grazie al quale il ritiro, che subisce normalmente un calcestruzzo ordinario in ambienti insaturi di vapore ($UR < 95\%$), è in parte compensato da un fenomeno espansivo controllato nella durata e nella sua entità, il cui scopo essenziale è ridurre in modo significativo la creazione di fessurazioni durante l'evaporazione progressiva dell'acqua dal conglomerato, ovvero durante la fase di ritiro igrometrico. Gli agenti espansivi normalmente impiegati per il calcestruzzo a ritiro compensato sono di due tipi: il primo comprende l'ossido di magnesio e soprattutto l'ossido di calcio che aumentano il volume dell'impasto trasformandosi, per reazione con l'acqua, nei corrispondenti

idrossidi. Il secondo tipo di agente espansivo è fondamentalmente basato sulla trasformazione, per reazione con l'acqua, di alcuni alluminati in un sale complesso denominato ettringite.

Gli altri parametri che possono influire sulla velocità del fenomeno espansivo sono la granulometria e la porosità dell'agente espansivo. Poiché la reazione che provoca l'espansione avviene all'interfaccia acqua-solido (agente espansivo) è evidente che, riducendo la dimensione delle particelle solide di agente espansivo, si aumenta la superficie esposta all'azione dell'acqua e quindi si accelera il processo riducendo la durata dell'espansione. Analogamente, un agente espansivo sotto forma di granuli porosi diventa più facilmente penetrabile dall'acqua. La porosità dei granuli di agente espansivo, in particolare quello basato sul CaO, può essere regolata dal produttore mediante la temperatura di cottura della materia prima (calcare o dolomite); temperature più alte portano ad un prodotto compatto per effetto della sinterizzazione favorita dalle alte temperature.

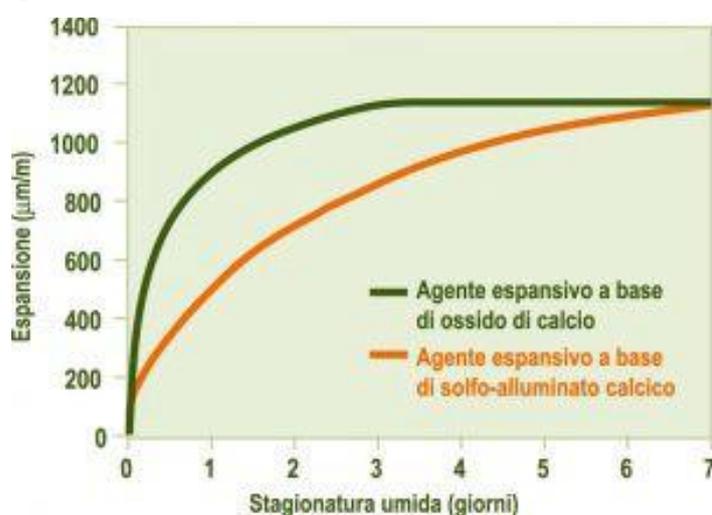


Figura 56: esempio di andamento nel tempo dell'espansione di due calcestruzzi con due diversi agenti espansivi in fase di indurimento

Come si vede nella Figura 56, basandosi sulla composizione chimica, sulla granulometria e sulla porosità dell'agente espansivo si può regolare il tempo che occorre a far reagire con l'acqua tutto l'agente espansivo presente nella malta o nel calcestruzzo, e conseguentemente si può regolare la durata del processo espansivo durante il quale occorre garantire una stagionatura umida.

Applicazioni: questo tipo di calcestruzzo è particolarmente adatto per **pavimenti interni/esterni** su massiciata, su pavimentazioni esistenti o su elementi prefabbricati privi di giunti di contrazione; per realizzare **le strutture di fondazioni o opere di sotto-muratura** di fondamenta di edifici; per realizzare **pareti da taglio o per l'inghisaggio** tra materiali di

diversa tipologia e consistenza, ad esempio, dei pilastri prefabbricati sulle fondazioni a plinto. Altra applicazione indicata dalle specifiche di questo prodotto riguarda il ripristino volumetrico di strutture degradate in calcestruzzo armato, in cui va a sostituire il calcestruzzo rovinato, riducendo notevolmente il tempo di aderenza alla struttura preesistente.



Figura 57: esempio ripristino strutturale

Calcestruzzo proiettato

Più noto forse con il termine tedesco di *spritz beton* o inglese di *shotcrete*, può essere definito come conglomerato cementizio pneumaticamente indirizzato ad alta velocità su una superficie. Esistono due distinti processi per questa tecnologia applicativa: per via secca, quando tutti gli ingredienti solidi del conglomerato sono accuratamente mescolati e la miscela secca è spinta da un flusso di aria compressa fino all'ugello della pompa dove viene aggiunta l'acqua prima di proiettare la miscela su una superficie; la prima applicazione, nota come gunita (dall'inglese *togun*, sparare), risale al 1910 e la seconda per via umida, quando tutti gli ingredienti, inclusa l'acqua, sono accuratamente mescolati e l'impasto più o meno fluido viene sospinto fino all'ugello della pompa dove l'aria compressa lo proietta sulla superficie; la prima applicazione, nota come shotcrete (dall'inglese *to shot concrete*, sparare calcestruzzo) risale agli anni '60 del secolo precedente. Nel processo per via secca, l'acqua viene immessa a discrezione del "lancista" a seconda delle locali condizioni del sottofondo (umidità, inclinazione, ecc.). Inoltre l'acqua, passa preferibilmente attraverso un percorso radiale e periferico bagnando così più il flusso esterno di calcestruzzo che non quello interno. Ciò comporta un rapporto a/c variabile da zona a zona del calcestruzzo in situ, e quindi anche variazioni nelle prestazioni. L'inconveniente può essere ridotto da un attento controllo

dell'acqua immessa e da un leggero movimento circolare dell'ugello (*Figura 28*) per sovrapporre zone più asciutte con quelle più bagnate.

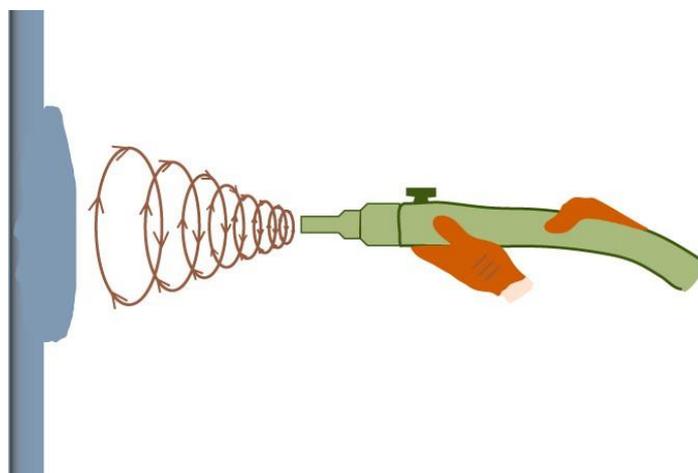


Figura 58: leggero movimento circolare dell'ugello

Questa problematica non esiste nel processo per via umida dove il calcestruzzo in situ è molto più uniforme perché il rapporto a/c può essere preliminarmente determinato e controllato e non è sotto il controllo discrezionale del “lancista”. A causa del rimbalzo dell'aggregato grosso da parte del sottofondo e dei ferri di armatura il rapporto aggregato/cemento del calcestruzzo che lascia la lancia è maggiore di quello in situ. Ciò comporta un arricchimento nel dosaggio di cemento del calcestruzzo in situ e quindi un maggior rischio di fessurazione per ritiro igrometrico. Il fenomeno è maggiore nel processo per via secca (rimbalzo del 30-40%) che non in quello per via umida (non più del 10%) ed è aggravato da una consistenza asciutta (per la via secca), dalla presenza di ferri di armatura, e dall'inclinazione ridotta ($<90^\circ$) del getto di calcestruzzo rispetto alla superficie.

Uno dei maggiori problemi alla corretta applicazione dello shotcrete è rappresentato dalla presenza delle armature metalliche soprattutto se molto congestionate. È preferibile evitare barre metalliche di diametro superiore a 12 mm, come anche è consigliabile impiegare reti elettrosaldate (possibilmente galvanizzate) con diametro di 3-4 mm e spaziatura quadrata di almeno 100 mm. La rete va posizionata a metà dello spessore dello strato di shotcrete quando questo è inferiore a 10 cm e un po' più verso l'esterno per spessori maggiori di 10 cm. In ogni caso la rete elettrosaldata e le barre debbono essere allocate in modo sufficientemente rigido per resistere all'impatto del calcestruzzo proiettato.

Applicazioni: la tecnologia del calcestruzzo a proiezione originariamente fu ideata come rivestimento provvisorio per il **consolidamento e protezione primaria nelle opere sotterranee**. Attualmente viene sempre più considerato anche come rivestimento portante

definitivo grazie allo sviluppo della tecnologia dei materiali, in questo caso, come in tutti i casi in cui lo spritzbeton ha funzioni strutturali, le caratteristiche meccaniche devono soddisfare le prescrizioni della legislazione vigente sui calcestruzzi ordinari. È forse il calcestruzzo più versatile tra quelle disponibili per la costruzione delle opere in c.a.: si può applicare su qualsiasi superficie (terreno, roccia, acciaio, calcestruzzo vecchio, muratura in pietra o mattone); consente illimitate possibilità di forma per strutture con configurazioni geometriche complesse; può essere applicato laddove il getto tradizionale presenta difficoltà esecutive (su soffitto e su pareti dietro tubazioni o altri ostacoli meccanici).



Figura 59: il calcestruzzo è proiettato da un operatore, noto come “lancista” sulla superficie rocciosa da una galleria appena scavata

Calcestruzzo autocompattante

Il calcestruzzo autocompattante SCC (*Self-Compacting-Concrete*) è un conglomerato cementizio che oltre a possedere una elevata fluidità allo stato fresco¹⁶ e elevata deformabilità, possiede anche una elevata resistenza alla segregazione¹⁷. Sono conglomerati che non necessitano, durante la posa in opera, di alcuna forma di compattazione o vibrazione in quanto sono in grado di riempire completamente la cassaforma, consentendo nel contempo una efficace espulsione dell'aria intrappolata in eccesso rispetto a quella fisiologica e, quindi, capaci di garantire valori della resistenza in opera sostanzialmente coincidenti con quelli conseguibili sui provini prelevati a *bocca di betoniera*.

¹⁶ Calcestruzzo che non ha ancora fatto presa. La presa è un processo in cui il conglomerato perde la propria plasticità e lavorabilità e, nel giro di qualche ora, si irrigidisce.

¹⁷ È la capacità di mantenere propria la composizione omogenea e invariata sia in movimento sia in riposo durante il trasporto e la messa in opera.

Da questo punto di vista, quindi, i calcestruzzi autocompattanti possono ritenersi una naturale evoluzione di quelli superfluidi (classe di consistenza S5) e sono stati sviluppati per esasperare la possibilità di rendere la qualità del conglomerato in opera sostanzialmente indipendente dalle operazioni di posa e compattazione oltre che per accelerare le operazioni di betonaggio per la realizzazione di strutture in cui siano rilevanti i volumi di calcestruzzo impiegati.



Figura 60: operazioni di betonaggio

Le origini

Le prime miscele che possono essere considerati i precursori del calcestruzzo autocompattante (SCC) risalgono a oltre 70 anni fa, quando negli USA, si mettevano in opera calcestruzzi molto fluidi denominati “calcestruzzi colati”. Essi avevano delle buone caratteristiche autocompattanti e autolivellanti. La loro buona fluidità, però, andava a discapito della durezza in quanto questi calcestruzzi potevano essere confezionati solo con rapporti A/C molto elevati. I calcestruzzi che oggi sono classificati come SCC, comunemente attribuiti all’invenzione del professore Okamura, sono stati impiegati, con la denominazione “Self Compacting” a partire dal 1988 in Giappone e Canada. Solo nel 1990 però sono stati eseguiti i primi grandi progetti in Giappone.

L’introduzione in Europa (Francia, Svezia) avvenne con un prototipo che fu sperimentato per la prima volta nel 1988 e realizzato utilizzando materiali facilmente reperibili sul mercato e fu denominato “High Performance Concrete”; quasi nello stesso periodo però questo nome fu dato, da Altcin e altri, ad un tipo di calcestruzzo a basso rapporto A/C ed elevata durabilità. Il nome del calcestruzzo di cui trattiamo fu allora cambiato in quello odierno di “Self Compacting Concrete”. Un primo documento sul calcestruzzo autocompattante fu presentato

nel 1989 da Ozawa all'EASEC-2, la seconda East-Asia and Pacific Conference in “Structural Engineering and Construction”. Successivamente, sempre per merito del prof. Ozawa, ci fu la presentazione dell'SCC al CAMMET & ACI International Conference di Instambul nel 1992; seguì l'ACI workshop nel novembre del 1994 a Bangkok, attraverso il quale l'SCC diventò conosciuto fra i ricercatori e gli ingegneri di tutto il mondo interessati alla durabilità del calcestruzzo ed alla razionalizzazione delle metodologie di costruzione. Nel Novembre del 1996 il prof. realizza il Ferguson Lecture at ACI Fall Convention a New Orleans, che diffonde la conoscenza dell'SCC fra i ricercatori in America; nel Gennaio 1997 viene fondato il comitato del RILEM che tratta di calcestruzzo autocompattante; nell'Agosto del 1998, a Kochi, in Giappone, si realizza il primo workshop dedicato al Self-Compacting Concrete e per finire, nel Settembre del 1999, il First International RILEM Symposium di Stoccolma, getta le basi per una collaborazione ed un confronto a livello mondiale su questo tema così importante.

Lo sviluppo

Il calcestruzzo autocompattante è ormai considerato da tutti gli esperti mondiali il calcestruzzo del futuro. Committenze, progettisti e imprese possono guardare avanti con rinnovata fiducia alle loro opere nel rispetto delle esigenze di qualità, design architettonico e costi di costruzione.



Figura 61: le ragioni dello sviluppo

Infatti, le nuove tecniche costruttive e l'attenzione dei committenti al “costo globale” delle opere, che include anche i costi di manutenzione nel periodo di vita in servizio, richiedono una sempre maggiore attenzione alla durabilità delle strutture. È per questo che continue ricerche, anche in Italia, vengono fatte per migliorare gli attuali difetti di questo calcestruzzo (di cui si parlerà in seguito), come ad esempio la “Messa a punto di un calcestruzzo autocompattante, alleggerito, fibrorinforzato e a ritiro compensato innovativo per l'unione delle caratteristiche di eco-sostenibilità (sostituzione di parte del legante con ceneri pesanti da termovalorizzatore e parte dell'aggregato leggero con aggregato plastico riciclato),

capacità di ridurre il rischio sismico, elevata durabilità ed affidabilità”, cui committente è il Fondo Europeo di sviluppo regionale in collaborazione con Tre Erre Ingegneria Srl - Preganziol (TV) e la ENCO s.r.l.

Inoltre, la mancanza sempre più sentita di personale qualificato e ben preparato al getto ed alla costipazione del calcestruzzo porta l'impresa ad affrontare una serie di problematiche che incidono sia sui costi di esecuzione dei lavori sia nella qualità dell'opera. E quindi, l'obiettivo primario per il futuro delle costruzioni rimane, oltre alla durabilità, il miglioramento della produttività e il calcestruzzo autocompattante, contribuisce in modo sostanziale al raggiungimento di questo risultato riducendo drasticamente i costi di produzione.

Dall'evoluzione dei calcestruzzi autocompattanti (SCC) si è giunti agli autostagionati (Self-Curing) e agli autocompresi (Self-Compressing Concrete) con una serie di automatismi che si ottengono nella fase di stagionatura, oppure inducendo un'espansione contrastata dalle armature che si trasforma in stato di co-azione, esercitando una leggera precompressione. Le tre proprietà tipiche dei calcestruzzi 3SC sono ottenute integrando additivi superfluidificanti (a base di eteri policarbossilati), viscosizzanti (Viscosity Modifying Agent, VMA) antiritiro (Shrinkage Reducing Admixture, SRA, a base di eteri poliglicoli) e agenti espansivi (a base di ossido di calcio). L'uso di superfluidificanti a base di eteri policarbossilati (PCE) rende molto più lavorabile il conglomerato anche con bassi rapporti acqua/cemento e, a differenza dei tradizionali fluidificanti, non riduce la resistenza del cls nel breve periodo, permettendo una rapida eliminazione delle strutture di sostegno e incrementando inoltre di gran lunga la vita utile delle cassetture. Oltre ai pregi già esposti per gli SCC, nei 3SC sono migliorate l'aderenza delle barre di armatura e il modulo elastico, mentre sono notevolmente ridotte le principali cause di degrado del calcestruzzo quali il ritiro igrometrico, la deformazione viscosa (creep) e la permeabilità all'acqua. Ulteriori ricadute riguardano la notevole semplificazione delle operazioni di posa in opera, velocizzare le operazioni di cantiere e la possibilità di impiego in applicazioni strutturali particolarmente complesse, dimostrando il raggiungimento di un livello di industrializzazione senza precedenti.

[Le norme di riferimento](#)

La normativa di riferimento per il calcestruzzo autocompattante, è la **UNI 11040:2003**, complementare alla **UNI 206-1**, e riguarda la definizione, i materiali, la formulazione, la produzione e il controllo della qualità del calcestruzzo SCC. La UNI 11040 elenca precisi

termini e definizioni sul calcestruzzo SCC tra cui la capacità di riempimento, la capacità di passare attraverso gli ostacoli, la resistenza alla segregazione, ecc.

Il calcestruzzo autocompattante SCC viene definito dalla stessa norma come un: *"calcestruzzo omogeneo che viene messo in opera e compattato senza intervento di mezzi esterni (vibrazione) ma per effetto della sola forza gravitazionale. Il calcestruzzo autocompattante, oltre a soddisfare i requisiti di classe di resistenza e di esposizione definiti nella UNI EN 206-1, ha la specifica proprietà, allo stato fresco, di un'elevata fluidità con assenza di segregazione"*.

Tra le definizioni, si evidenziano quelle di:

- "tempo di spandimento":
tempo necessario a raggiungere il diametro di 500 mm dopo l'efflusso dall'imbuto;
- "tempo di lavorabilità":
tempo necessario per ridurre la consistenza del calcestruzzo fresco dal valore iniziale a 600 mm;
- "finissimo":
materiale minerale (somma di cemento, filler, aggiunte, finissimi dell'aggregato) passante allo staccio da 0,125 mm.

In riferimento alle *aggiunte minerali*, la norma evidenzia l'uso di due tipi di aggiunte: tipo I, ovvero filler conformi alla EN 12620 e pigmenti conformi alla UNI EN 12878 e tipo II, ovvero ceneri volanti conformi alla UNI EN 450 e fumi di silice conformi alla EN 13263-1; sottolineando l'importanza che ogni fornitura di filler sia corredata di documentazione circa la finezza in termini di superficie specifica di Blaine. Invece, per quel che riguarda l'*aggiunta di additivi*, in particolare i modificatori della viscosità, deve essere garantita la compatibilità con gli impasti cementizi nei riguardi dello sviluppo della resistenza e della durabilità.

I requisiti prestazionali degli autocompattanti allo stato fresco sono regolati dalle norme EC 1-2011, UNI EN 12350-8-9-10-11-12 (ex. UNI 11041-2-3-5), ed UNI 11044, ognuna delle quali tratta un preciso metodo di verifica, identificando i criteri e le modalità esecutive con i relativi limiti di accettazione, che sono riportati per praticità in una tabella (Figura X) nella norma UNI 11040.

Caratteristica	Intervallo di accettazione	Metodo di prova	Prova di laboratorio	Prova di cantiere
Fluidità	>600 mm	UNI 11041	si	si
Tempo di spandimento (per raggiungere il diametro di 500 mm)	≤12 s	UNI 11041	si	si
Deformabilità (tempo di efflusso dall'imbuto a V)	(4 ± 12) s	UNI 11042	si	si
Scorrimento confinato (attraverso l'anello a J)	$\Delta\Phi \leq 50$ mm rispetto allo scorrimento senza anello	UNI 11045	si	si
Scorrimento confinato (scatola ad L)	$H_2/h_1 > 0,80$	UNI 11043	si	no
Scorrimento confinato (scatola ad U)	$\Delta h \leq 30$ mm	UNI 11044	si	no
Stabilità alla sedimentazione (imbuto a V dopo 5 min)	Valore iniziale +3 s	UNI 11042	si	si

Figura 62: caratteristiche dei calcestruzzi autocompattanti allo stato fresco e relativi valori di accettazione

Le proprietà dei calcestruzzi autocompattanti

Un calcestruzzo autocompattante deve essere caratterizzato:

- da una elevata **deformabilità** (o capacità di scorrimento in assenza di ostacoli), che individua la capacità del materiale di modificare la sua forma per effetto del solo peso proprio ed è connessa alla possibilità che lo stesso sia in grado di raggiungere distanze più o meno elevate dal punto in cui viene introdotto all'interno del cassero;
- da una elevata **resistenza alla segregazione**, che consenta di realizzare elementi in calcestruzzo armato il cui volume è costituito interamente da materiale di caratteristiche omogenee. Questo significa, in sostanza, che la massa volumica e, quindi, le proprietà elasto-meccaniche del calcestruzzo in opera risultino sostanzialmente identiche in tutto il volume dell'elemento strutturale realizzato.

Per conseguire questo ultimo obiettivo il calcestruzzo autocompattante deve essere dotato:

1. di **resistenza alla segregazione esterna**: esso, cioè, deve poter minimizzare il rischio di separazione degli ingredienti durante il getto all'interno dei casseri. È evidente che la segregazione esterna è strettamente connessa con le modalità delle operazioni di posa e, in particolare, con l'altezza di caduta libera del conglomerato all'interno della cassaforma, tuttavia, questa problematica può essere opportunamente mitigata scegliendo accuratamente gli ingredienti per il confezionamento del calcestruzzo e adottando specifici provvedimenti in termini di composizione dell'impasto;
2. di **resistenza alla segregazione di flusso**: per i conglomerati tradizionali la stesa, dopo il getto, avviene per strati di circa 20-30 cm muovendo avanti e indietro il tubo forma e, quindi, senza apprezzabili scorrimenti del calcestruzzo dal punto in cui viene introdotto all'interno del cassero. Grazie all'elevata fluidità agli SCC, invece, si

richiede di percorrere anche alcuni metri dal punto di introduzione nella cassaforma. Pertanto, gli SCC non debbono subire durante lo scorrimento la smiscelazione degli ingredienti. A questo proposito, in particolare, la malta di cemento (acqua, cemento, aggiunte minerali e frazioni fini della sabbia) deve essere dotata di sufficiente viscosità per poter trasportare i granuli grossi degli aggregati, soprattutto quando il conglomerato deve poter fluire attraverso dei restringimenti di sezione o in zone particolarmente congestionate dalle armature. Questa particolare resistenza di flusso viene identificata come mobilità in spazi ristretti o anche come capacità di attraversamento (*passing ability*) e risulta una delle proprietà fondamentali degli autocompattanti attesa la naturale tendenza degli aggregati grossi, per effetto dell'aumento del numero di collisioni in prossimità del restringimento di sezione, a procedere con una minore velocità rispetto alla malta di cemento e, quindi, a creare il blocco del flusso del conglomerato;

3. di **resistenza alla segregazione interna**: a riempimento avvenuto della cassaforma il calcestruzzo autocompattante, infine, deve evitare un'eccessiva sedimentazione degli aggregati grossi sul fondo e limitare il volume di acqua di *bleeding* che perviene sulle superfici estradossali del getto.

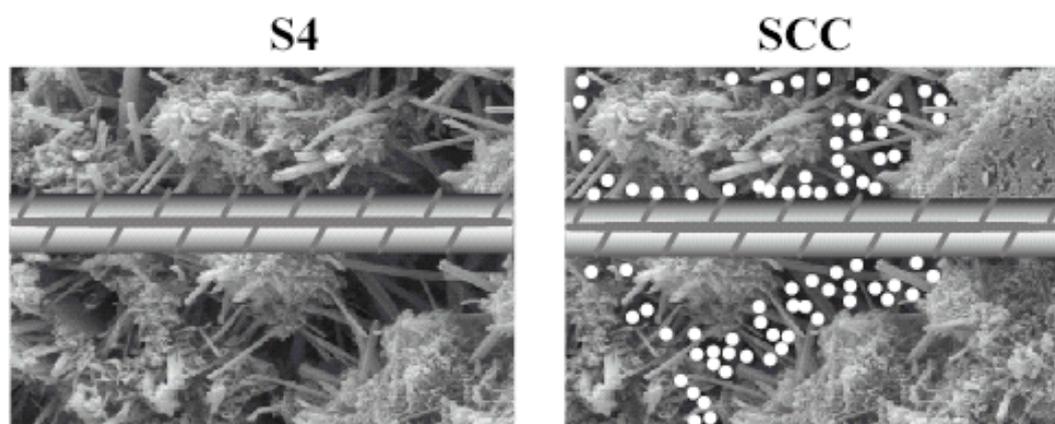


Figura 63: modello di aderenza acciaio-calcestruzzo con relative differenza tra un S4 e un SCC

Pertanto, le specifiche di capitolato relative a questi calcestruzzi dovranno riguardare non solo la capacità di scorrimento del materiale, ma dovranno essere finalizzate anche a definire la resistenza alla segregazione del calcestruzzo fondamentale per poter ambire ad una qualità della struttura sostanzialmente indipendente dalle modalità di posa e di compattazione del conglomerato.

L'**autocompattabilità**, come specificato al precedente paragrafo, è il risultato del soddisfacimento di diverse proprietà reologiche del conglomerato e la quantificazione di queste proprietà può essere effettuata avvalendosi di diversi metodi di misura ognuno finalizzato alla misurazione di una caratteristica specifica degli SCC.

Quindi, contrariamente a quanto avviene per i calcestruzzi tradizionali, dove la misura della lavorabilità è sufficiente per avere un quadro abbastanza esaustivo delle proprietà reologiche del materiale, per i calcestruzzi autocompattanti è, invece, necessario ricorrere a diverse metodologie di indagine se si vogliono cogliere i vari aspetti della autocompattabilità.

Metodo di prova	Proprietà
Spandimento (Slumpflow) UNI 12350-8	Fluidità
Imbuto a V (V-funnel) UNI 12350-9	Deformabilità allo stato fresco
	Resistenza alla segregazione
Scatola ad L (L-box) UNI 12350-10	Mobilità in spazi ristretti
Scatola ad U (U-box) UNI 11044	Mobilità in spazi ristretti
Anello giapponese (J-Ring) UNI 12350-12	Mobilità in spazi ristretti
Prova di resistenza a Segregazione (al setaccio) UNI 12350-11	Resistenza alla segregazione

Figura 7: test di caratterizzazione e le proprietà che definiscono la lavorabilità di un calcestruzzo autocompattante

La norma 11040 e successive hanno definito i parametri di riferimento per ciascun test di lavorabilità; risulta chiaro che essendo complementari tra loro, i test di caratterizzazione specifici per le proprietà dell'autocompattante esplicitate nel paragrafo precedente, devono dare risultanze positive perché una miscela di calcestruzzo possa essere classificata come SCC.

1. Il cono di Abrams e la misura dello Slump-flow, UNI 12350-8

Il cono di Abrams impiegato per la misura dello slump nei calcestruzzi tradizionali può essere utilizzato per valutare la capacità di scorrimento del calcestruzzo autocompattante in assenza di ostacoli oltre che per trarre utili indicazioni sulla tendenza del conglomerato alla segregazione di flusso. Per tanto la metodologia di prova (precedentemente descritta) è la stessa.

Le determinazioni che vengono effettuate sono le seguenti:

- tempo necessario perché la focaccia di calcestruzzo raggiunga un diametro pari a 500 mm (t_{500});
- diametro finale della focaccia di calcestruzzo ($d_f = \text{slump-flow}$) dopo che lo stesso ha cessato di fluire, che è la media di due diametri D1 e D2 misurati ortogonalmente.

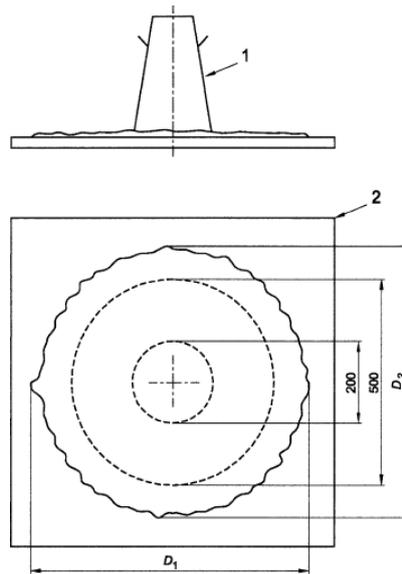


Figura 64: cono di Abrams-differenze diametri

La misura dello slump-flow è proporzionale alla capacità di scorrimento del materiale in assenza di ostacoli: maggiore il valore di d_f e più elevata è la deformabilità del materiale, cioè la sua capacità di raggiungere zone distanti dal punto di introduzione del calcestruzzo nel cassero. I valori minimi di d_f richiesti per un calcestruzzo autocompattante variano a seconda delle normative e raccomandazioni: ad esempio, la norma UNI 11040 e le raccomandazioni EFNARC richiedono per d_f valori superiori rispettivamente a 600 mm e 650 mm. Le Linee Guida europee e la UNI 206-9, oltre a fissare un valore minimo per d_f (550 mm), suddividono i calcestruzzi autocompattanti, relativamente alla misura dello slump-flow, in tre classi (Tabella 8).

NORMA	SFmin (mm)	SFmax (mm)	SF1 (mm)	SF2 (mm)	SF3 (mm)
UNI 12350-8	600	-	-	-	-
EFNARC	650	800	-	-	-
LINEE GUIDA	550	850	550-650	660-750	760-850

Tabella 8: Valori massimi e minimi di d_f richiesti da diverse norme e classificazione dei calcestruzzi autocompattanti in base al valore dello slump-flow in accordo alle Linee Guida europee

I valori di t_{500} , invece, sono connessi con la viscosità del materiale e, quindi, indirettamente con la resistenza alla segregazione. Calcestruzzi che evidenziano bassi valori di t_{500} risultano poco viscosi con una capacità di scorrimento elevata, ma allo stesso tempo con una maggiore tendenza alla segregazione rispetto a quelli che denotano alti valori di t_{500} . Anche per questa misura le normative e raccomandazioni presentano visioni abbastanza difformi se si tiene conto che la norma UNI 12350-8 impone per t_{500} un valore massimo di 12 secondi, mentre le raccomandazioni EFNARC suggeriscono valori compresi tra 2 e 5 secondi. Le Linee

Guida europee e la UNI 206-9, invece, suddividono i calcestruzzi in due classi quelli con t_{500} inferiori o pari a 2 s o con t_{500} maggiore di 2 s (Tabella 9).

NORMA	t_{500} min (s)	t_{500} max (s)	t_{500} (s) VS1	t_{500} (s) VS2
UNI 12350-8	-	12	-	-
EFNARC	2	5	-	-
LINEE GUIDA	-	-	≤ 2	> 2

Tabella 9: valori massimi e minimi di t_{500} richiesti da diverse norme e classificazione dei calcestruzzi autocompattanti in base al valore dello slump-flow in accordo alle Linee Guida europee

2. L'imbuto a forma di V (V-funnel), UNI 12350-9

La resistenza alla segregazione del calcestruzzo autocompattante può essere accertata anche attraverso la prova condotta con il V-funnel: essa consiste nel misurare il tempo necessario per il calcestruzzo a fuoriuscire completamente da un imbuto a forma di V subito dopo il termine della miscelazione dell'impasto (t_0) e dopo 5 minuti (t_5) di permanenza all'interno dell'imbuto.

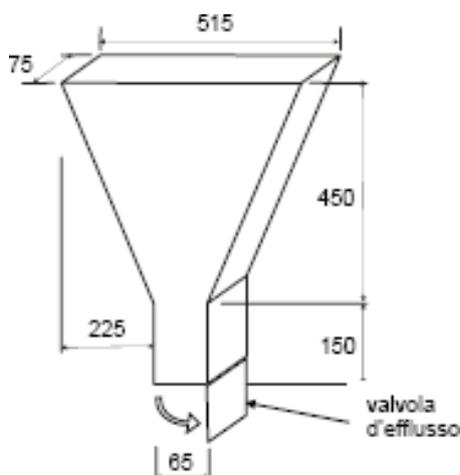


Figura 65: imbuto a V

Il valore di t_0 è correlato alla viscosità del materiale: maggiore è il tempo di svuotamento, più elevata è la viscosità del sistema e, quindi, minore è la sua capacità di flusso. Per contro, valori di t_0 elevati sono indice di una maggiore resistenza alla segregazione dell'impasto. Anche riguardo a questa misura le diverse raccomandazioni non presentano uniformità di vedute. Infatti, sia la norma UNI 12350-9 che le raccomandazioni EFNARC suggeriscono tempi di svuotamento compresi tra 4 e 12 secondi. Le Linee Guida europee, invece, non specificano il valore minimo per t_0 , ma suddividono i calcestruzzi autocompattanti in due classi relativamente al tempo di svuotamento al V-funnel: la prima caratterizzata da valori

di t_0 inferiori o uguali a 8 secondi; la seconda classe con t_0 compreso tra 9 e 25 secondi (Tabella 10).

NORMA	t_{0min} (s)	t_{0max} (s)	$(t_5-t_0)_{min}$ (s)	$(t_5-t_0)_{max}$ (s)	VS1/VF1/SR1 (t_{500} , t_0 , SR1)	VS2/VF2/SR2 (t_{500} , t_0 , SR2)
UNI 11040	4	12	0	3	-	-
EFNARC	6	12	0	3	-	-
LINEE GUIDA	-	25	-	-	≤ 2 S, ≤ 8 S, $\leq 20\%$	>2 S, 9-25 S, $\leq 15\%$

Tabella 10: valori minimi e massimi del tempo di svuotamento al V-funnel in accordo alla norma UNI 12350-9, alle raccomandazioni EFNARC e classificazione dei calcestruzzi in termini di resistenza alla segregazione in accordo alle Linee Guida europee

Le Linee Guida, inoltre, ritengono che la misura del tempo di svuotamento sia correlata a quella del t_{500} nella prova dello slump-flow procedendo alla classificazione del calcestruzzo, relativamente alla resistenza alla segregazione, utilizzando indistintamente una delle due misure (Tabella 10). È importante notare che ai fini della resistenza alla segregazione è altresì opportuno che la differenza tra t_5 e t_0 risulti compresa tra 0 e 3 secondi (Tabella 10). Se la differenza tra le due misure, infatti, dovesse risultare maggiore, questo sarebbe indice di una tendenza del conglomerato alla segregazione interna e al blocking durante il flusso. Relativamente alla resistenza alla segregazione le Linee Guida europee prevedono anche l'esecuzione di una **Prova di resistenza a segregazione con setaccio UNI 12350-11**: la prova di resistenza a segregazione al setaccio è utilizzata per valutare la resistenza alla segregazione del calcestruzzo autocompattante. Dopo il campionamento, il calcestruzzo fresco è lasciato riposare per 15 minuti e si prende nota dell'eventuale separazione di acqua d'essudamento. La parte superiore del campione viene successivamente versata in un setaccio che presenta aperture con maglia quadrata di lato 5 mm di lato. Una massa pari a $(4,8 \pm 0,2)$ kg, da un'altezza di (500 ± 50) mm. Dopo 2 minuti si registra la massa del materiale che è passato attraverso il setaccio.

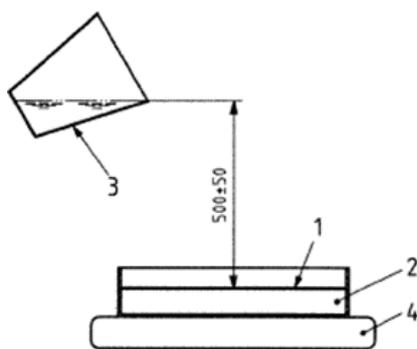


Figura 66: apparecchiatura della prova con setaccio

Il rapporto disgregazione è infine calcolato come la percentuale del campione che è passata attraverso il setaccio. Ovviamente, la tendenza alla segregazione dell'impasto sarà tanto maggiore quanto più elevata è la perdita causata dalla separazione della pasta di cemento dall'aggregato grosso a causa della sua scarsa coesione ed eccessiva fluidità. Due sono le classi previste: SR1 e SR2 (Segregation Resistance: SR) con perdita di massa inferiore rispettivamente al 20% e al 15%.

3. La scatola ad L (L-Box), UNI 12350-10

La scatola ad L è costituita da una porzione verticale in cui viene introdotto il calcestruzzo il quale, inizialmente, è impedito a fuoriuscire dal basso grazie alla presenza di una saracinesca alla cui apertura il conglomerato fluisce nella porzione orizzontale dell'attrezzatura attraversando un graticcio costituito da due oppure da tre armature disposte verticalmente.

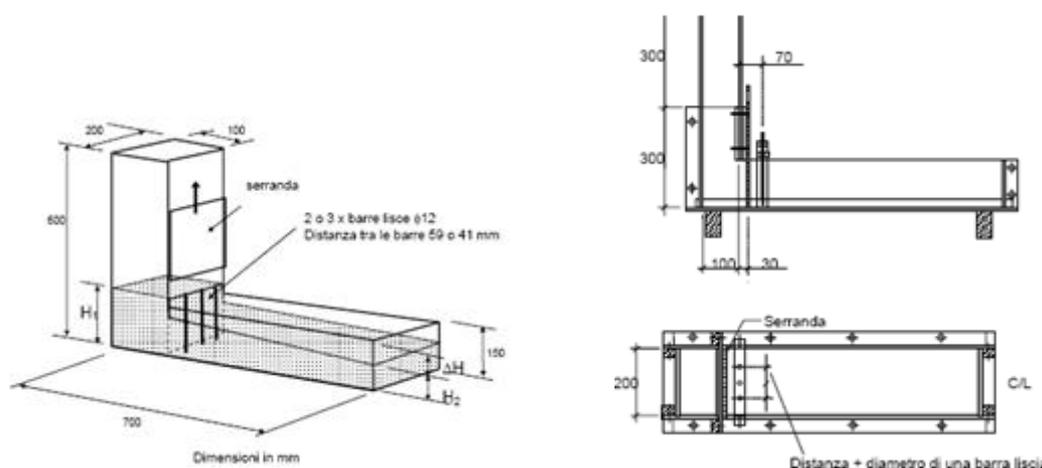


Figura 67: scatola a L

La valutazione della capacità di attraversamento viene effettuata misurando la differenza di altezza del conglomerato nel punto più lontano (h_1) raggiunto, e quella valutata a tergo della saracinesca nella porzione verticale dell'apparecchiatura (h_2). La capacità di attraversamento (*passing ability*) sarà tanto più elevata quanto più il rapporto h_1/h_2 si approssima ad 1 e viene ritenuta sufficiente (sia dalla norma UNI 12350-10 che dalle raccomandazioni EFNARC) se il rapporto h_1/h_2 risulta almeno pari a 0.80. Le Linee Guida, come per le altre proprietà che caratterizzano l'autocompattabilità, distingue i calcestruzzi in termini di *passing ability* in due classi: entrambe debbono possedere un rapporto h_1/h_2 almeno pari a 0.80, ma la prima (PA1) e la seconda classe (PA2) di calcestruzzi conseguono questo risultato fluendo, rispettivamente, attraverso due o tre armature (Tabella 11).

NORMA	SCATOLA AD L:	SCATOLA AD L	PA1	PA2
	(h1/h2)min	(h1/h2)max	(due barre)	(tre barre)
UNI 12350-10	0.80	1.0	-	-
EFNARC	0.80	1.0	-	-
LINEE GUIDA	0.80	1.0	> 0.80	> 0.80

Tabella 11: valori massimi e minimi per le prove di passing ability con la scatola ad L in accordo alla norma UNI 12350-10, alle raccomandazioni EFNARC e classificazione dei calcestruzzi in termini di capacità di attraversamento secondo le Linee Guida

4. La scatola ad U (U-Box) UNI 11044

La scatola ad U (sviluppata nel centro di ricerca e Tecnologia della Taisei Corporation in Giappone) è costituita da un condotto a sezione rettangolare che è diviso in due comparti da una botola mediana sollevabile.

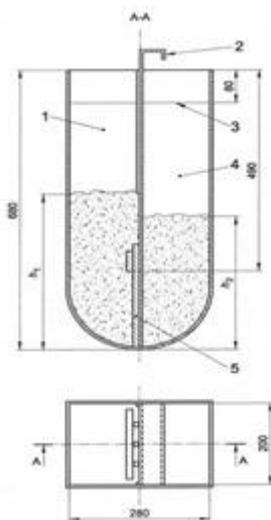


Figura 68: scatola ad U

Una griglia è posta tra i due comparti ed è composta da barre di rinforzo con diametro di 13 mm ad interasse di 50 mm; questo crea uno spazio di 35 mm tra le barre. La sezione a sinistra viene riempita di calcestruzzo, una volta aperta la botola quest'ultimo fluisce verso l'alto nell'altro comparto, attraverso la griglia, e viene misurata l'altezza del calcestruzzo in entrambe le sezioni. Se il calcestruzzo fluisce liberamente come l'acqua, al termine del moto di flusso, si disporrà allo stesso livello in entrambi i comparti, così Δh detta *altezza di riempimento* = $H_2 - H_1 = 0$. Pertanto tanto più vicino è il valore di prova, altezza di riempimento allo zero, tanto più fluido sarà il calcestruzzo.

La norma UNI 11040 limita l'altezza di riempimento a $\Delta h \leq 30\text{mm}$ affinché l'autocompattante abbia ottime capacità di mobilità negli spazi ristretti.

5. Anello Giapponese - Japanese Ring – J-RING, UNI 12350-12

J-ring è un anello di acciaio forato dove sono alloggiati delle barre a sezione circolare simulanti le armature presenti negli elementi in calcestruzzo armato.

La prova consiste nel riempire di calcestruzzo il cono di Abrams sistemato all'interno dell'anello, appoggiati entrambi su una piastra liscia con una superficie piana di almeno 900 mm x 900 mm e, successivamente, nel sollevarlo lasciando fluire il calcestruzzo attraverso le barre dello J-Ring.

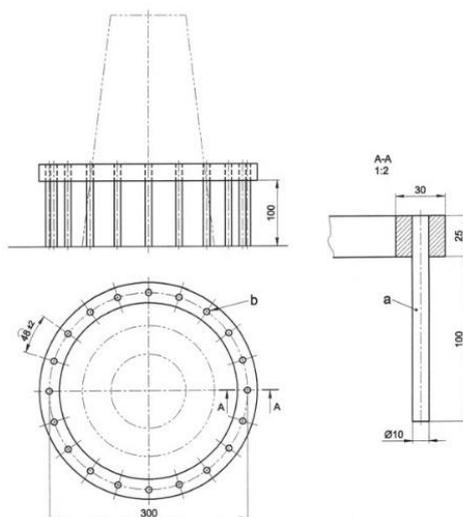


Figura 69: anello giapponese

La differenza tra la misura di spandimento con e senza J-Ring deve essere inferiore a $\Delta\phi \leq 50\text{mm}$, e l'altezza tra il calcestruzzo all'interno ed all'esterno dell'anello deve risultare inferiore a 10 mm affinché l'autocompattante abbia buone capacità di attraversamento alle barre. Per tal motivo le linee guida definiscono due classi di capacità di attraversamento nell'anello con intercapedini larghe a 12 barre o intercapedini strette a 16 barre (Tabella 12).

CLASSI DI CAPACITÀ DI ATTRAVERSAMENTO – ANELLO J	
a), b) "PASSING ABILITY" - IL J-RING	
Altezza all'interno e all'esterno dell'anello J in mm	
J-RING CON INTERCAPEDINI LARGHE 12 BARRE D'ARMATURA	J-RING CON INTERCAPEDINI STRETTE 16 BARRE D'ARMATURA
CLASSE PJ1	CLASSE PJ2
< 10	< 10

Tabella 12: valori per le prove di passing ability per il j-ring in accordo alle Linee Guida

La composizione del calcestruzzo autocompattante

Si è già analizzata nel capitolo precedente la composizione del calcestruzzo, pertanto si analizzerà ora, nello specifico, quella del calcestruzzo autocompattante, ma in termini di reologia. La reologia è la scienza che studia le deformazioni subite da un corpo per effetto delle sollecitazioni cui esso è sottoposto. Essa, pertanto, può applicarsi allo studio dei sistemi cementizi che sono deformabili e capaci di scorrere sotto l'effetto di sforzi tangenziali.

I fattori che governano la reologia del calcestruzzo sono influenzati dalla coesione e dalla viscosità plastica, infatti generalmente, i fattori che aumentano la coesione inducono anche un incremento della viscosità plastica (e viceversa).

Il cemento

Il conglomerato dal punto di vista reologico può essere schematizzato come un sistema costituito da due fasi di cui una la pasta (acqua, cemento e polveri finissime di dimensioni inferiori a 0.125 mm) costituisce il fluido trasportatore; l'altra, invece, costituita dagli aggregati lapidei, rappresenta la fase trasportata.

Un calcestruzzo autocompattante è caratterizzato dalla necessità di aumentare il volume di materiale finissimo, che costituisce il fluido trasportatore, a scapito di un minor volume di aggregato e di quello grosso in particolare. Il volume di pasta di cemento in eccesso rispetto a quella necessaria per avvolgere la superficie dei granuli dell'aggregato grosso, lo strato di pasta in eccesso di sufficiente spessore attenua le collisioni dei granuli evitando l'arresto del flusso di calcestruzzo. Una regola pratica è quella di garantire un volume di materiale finissimo compreso tra 160 e 190 l/m³ circa. Un volume così rilevante di materiale finissimo non può essere ottenuto ricorrendo all'impiego del solo cemento in quanto occorrerebbero dosaggi di legante di circa 500-600 Kg/m³ improponibili per gli inevitabili rischi di fessurazione dei getti conseguenti sia ai gradienti termici che al ritiro idraulico. Pertanto, il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti si basa sull'utilizzo combinato di cemento e di materiale finissimo con lenta o pressoché nulla velocità di idratazione quali la cenere volante, il calcare macinato, la loppa d'altoforno e il fumo di silice.

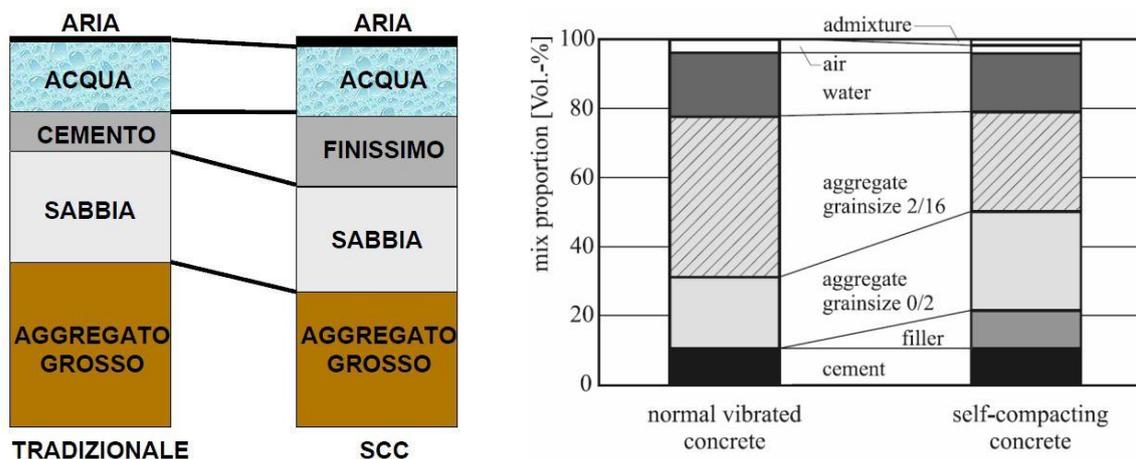


Figura 70: differenze composizione calcestruzzi tradizionale e autocompattante

Quindi, le caratteristiche del cemento che influenzano la reologia del calcestruzzo sono sostanzialmente la finezza e il contenuto di C3S. Cementi fini e ricchi di C3S aumentano il limite di scorrimento e la viscosità. Per contro, i cementi di tipo II al calcare e quelli alla loppa d'altoforno e ancor più i cementi d'altoforno sono caratterizzati, a pari classi di resistenza, da una minore coesione, ma anche da una minore viscosità. Pertanto, ai fini del soddisfacimento dei requisiti di autocompattabilità sarà opportuno preferire cementi di alta classe di resistenza e ricchi in clinker quando l'obiettivo è quello di migliorare la resistenza alla segregazione dell'impasto e aumentare la viscosità del sistema. Invece, l'impiego di cementi al calcare o d'altoforno può essere previsto se è più importante esaltare le capacità di scorrimento del materiale.

Le polveri di calcare (*filler*) offrono il vantaggio di una maggiore costanza di qualità in termini di granulometria e, quindi, consentono un più agevole controllo della richiesta d'acqua d'impasto e, conseguentemente, delle proprietà di scorrimento del calcestruzzo. Per contro, rispetto alla cenere volante, conferiscono all'impasto una minore resistenza alla segregazione.

Il rapporto acqua/cemento

L'influenza del rapporto a/c sulle proprietà del calcestruzzo fresco è la stessa a quelle esercitate dalla finezza e dal contenuto di cemento, ovvero diminuendo il rapporto a/c aumenta la coesione e anche la viscosità plastica. Da questo si intuisce che per soddisfare le esigenze di autocompattabilità è necessario adottare rapporti acqua/cemento non troppo bassi se non si vuole pregiudicare le capacità di scorrimento dell'impasto, pertanto sarà necessario adottare un rapporto tra il volume di acqua e quello dei materiali finissimi che

consenta di ottimizzare sia la capacità di scorrimento che la resistenza alla segregazione dell'impasto.

Infatti, il volume di acqua complessivo nel calcestruzzo deve risultare compreso tra 170 e 210 litri/m³. Il volume di complessivo di pasta, inoltre, deve essere compreso tra 350 e 380 litri/m³ e il rapporto in volume acqua/finissimo¹⁸ tra 0.85 e 1.10. Questi provvedimenti finalizzati ad ottimizzare volume e reologia della pasta debbono essere integrati da quelli relativi a limitare il volume dell'aggregato grosso che deve risultare inferiore a 360 l/m³.

COMPONENTE	VALORI SUGGERITI IN MASSA (Kg/m ³)	VALORI SUGGERITI IN VOLUME (l/m ³)
FINISSIMO	450-550	160-190
PASTA	-	350-380
ACQUA	170-210	170-210
AGGREGATO GROSSO	< 970	< 360
ACQUA/FINISSIMO	0.31-0.36	0.85-1.10
SABBIA	-	45-55% DEL VOLUME TOTALE DEGLI AGGREGATI

Tabella 13: requisiti compositivi per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti

Gli additivi

Gli additivi esplicano sulle proprietà reologiche influenze diverse a seconda della loro natura. Gli additivi **ritardanti**, ad esempio, determinano, a parità di tempo trascorso dalla miscelazione, una riduzione sia della coesione che della viscosità plastica rispetto ad un impasto non additivato. Conseguentemente, essi possono apportare benefici sulle capacità di scorrimento del conglomerato, ma tendono, per effetto della diminuzione di viscosità, ad esasperare i fenomeni di segregazione del calcestruzzo. Essi, inoltre, possono determinare un allungamento dei tempi cui le casseforme sono sottoposte alla massima spinta.

Gli additivi maggiormente utilizzati per la produzione degli SCC sono quelli **superfluidificanti**. Essi vengono impiegati, generalmente, per aumentare la fluidità mantenendo invariato il dosaggio di cemento (pari rapporto a/c). Questi, al contrario di quanto avviene nei calcestruzzi tradizionali, dove vengono impiegati per ridurre l'acqua di impasto e il dosaggio di cemento, lasciando immutata la lavorabilità, nella produzione degli autocompattanti vengono utilizzati mantenendo fisso il dosaggio di cemento per aumentare la lavorabilità del conglomerato. Pertanto, essi consentono di ridurre la viscosità del sistema,

¹⁸ Il finissimo è costituito dalla somma del cemento, delle aggiunte pozzolaniche, delle frazioni del filler calcareo e delle sabbie di dimensioni inferiori a 0.125 mm.

e quindi un aumento della capacità di scorrimento del calcestruzzo, lasciando sostanzialmente invariata la resistenza alla segregazione dello stesso. Per migliorare questa proprietà nel confezionamento degli SCC si fa ricorso all'utilizzo di additivi modificatori di viscosità.

Il termine di additivi **modificatori della viscosità** (Viscosity Modifying Agent: VMA) individua una categoria di prodotti cellulosici modificati o polimeri ad alto peso molecolare utilizzati già in passato per rendere pompabili i calcestruzzi magri (con dosaggi di cemento inferiori a 260 Kg/m³). Gli agenti modificatori di viscosità impiegati per la produzione dei calcestruzzi autocompattanti, invece, includono, oltre ai polimeri idrosolubili a base di cellulosa, anche quelli a base di glicole e i bio-polimeri. Indipendentemente, dalla loro natura gli agenti modificatori di viscosità destinati al settore del calcestruzzo autocompattante debbono possedere i seguenti requisiti:

- solubilità elevata nell'ambiente alcalino della sospensione cementizia;
- ridotta interferenza sulla reazione di idratazione del cemento;
- capacità di conferire al calcestruzzo la capacità di attraversamento senza pregiudicare le proprietà di flusso del conglomerato;
- possibilità di essere introdotti negli impasti mediante i dosatori di liquidi normalmente disponibili nelle centrali di betonaggio;
- incidenza sul costo unitario del conglomerato inferiore a quello che si dovrebbe sostenere con altre soluzioni per conseguire lo stesso miglioramento prestazionale determinato dall'aggiunta dell'VMA;
- conferire all'impasto "robustezza", cioè la capacità di non modificare le proprie prestazioni per effetto delle oscillazioni nel dosaggio dell'acqua introdotta nel mescolatore.

Le principali differenze composizionali tra calcestruzzi tradizionali superfluidi e conglomerati autocompattanti possono essere riassunte in: un minor volume di aggregato grosso, un maggior volume di pasta, un basso rapporto acqua/finissimo, un contenuto più elevato di additivo superfluidificante (il quale viene utilizzato in percentuali simili a quelle impiegate nei calcestruzzi tradizionali, ma viene dosato rispetto alla massa del cemento e delle aggiunte), un volume di aria leggermente superiore (per il maggior volume di pasta) e un agente modificatore di viscosità.

La produzione del calcestruzzo autocompattante

Come si può dedurre dal paragrafo precedente, il calcestruzzo autocompattante, rispetto ai conglomerati tradizionali, presenta una maggiore dipendenza delle sue caratteristiche reologiche dalle variazioni del dosaggio degli ingredienti rispetto al valore nominale. Pertanto, la sua produzione non può che avvenire in impianti dotati di processo industrializzato certificato da un organismo terzo prevedendo, inoltre, stringenti controlli sia sulla distribuzione granulometrica degli aggregati che sul contenuto di umidità che necessariamente deve essere determinata ad ogni carico nel mescolatore. Per il minore attrito generato, i tempi di miscelazione per la produzione degli SCC risultano più lunghi rispetto a quelli richiesti per un conglomerato tradizionale. Per evitare il problema della formazione dei grumi generalmente è conveniente iniziare il mescolamento ad una consistenza più bassa (tipica dei conglomerati tradizionali) e, solo dopo aver ottenuto una efficace dispersione di tutte le particelle, procedere all'aggiunta di ulteriore acqua, dell'additivo residuo e, infine, dell'VMA.

Il trasporto e la posa in opera del calcestruzzo autocompattante

Il trasporto del calcestruzzo può avvenire attraverso l'autobetoniera e/o autopompa, come nel caso di quelli tradizionali, dovendo però rispettare in maniera più restrittiva i tempi di trasporto, proprio per rispettare la consistenza del conglomerato, e quindi le varie percentuali granulometriche, il rapporto a/c e i diversi additivi miscelati. Infatti l'aggiunta di acqua, come già ripetuto più volte, potrebbe variare il risultato finale.

Per quanto concerne la posa in opera, l'impiego del calcestruzzo autocompattante nella realizzazione delle strutture impone l'adozione di alcuni accorgimenti nella fase di preparazione dei casseri e delle operazioni di finitura che risultano in molti casi completamente differenti rispetto a quelli richiesti per le operazioni di betonaggio da effettuarsi con i conglomerati tradizionali. Un primo aspetto riguarda la tipologia, i sistemi di controventamento e di fissaggio delle casseforme.



Figura 71: esempio di casseforme

Spinta sui casseri

Durante la messa in opera del conglomerato e ad operazioni di betonaggio ultimate il calcestruzzo prima di completare la presa esercita sui casseri una spinta laterale che è funzione dei seguenti parametri fondamentali:

- le caratteristiche reologiche dell'impasto;
- la velocità di riempimento della cassaforma;
- la modalità di esecuzione del getto (dall'alto per caduta oppure per pompaggio dal basso)
- dalla eventuale vibrazione esercitata durante le operazioni di posa;
- dalla permanenza del calcestruzzo allo stato plastico (e quindi dai tempi di presa del conglomerato cementizio).

A parità di tutte le condizioni, la spinta aumenta al diminuire della coesione e della viscosità del calcestruzzo; pertanto, si intuisce come il calcestruzzo autocompattante, per la maggiore fluidità e scorrevolezza, determini un incremento della pressione esercitata sui casseri rispetto ad un conglomerato tradizionale. Tuttavia, occorre tener presente che la maggiore spinta derivante dall'impiego del calcestruzzo autocompattante diventa significativa soltanto quando il getto viene effettuato per caduta del calcestruzzo dall'alto e quando le velocità di riempimento diventano relativamente alte ($> 4-7$ m/h).

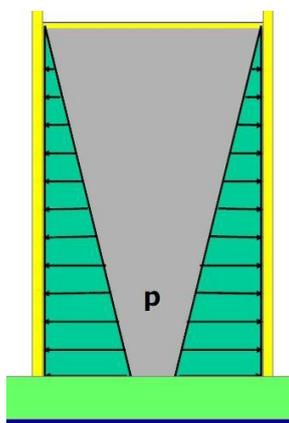


Figura 72: andamento delle pressioni sui casseri

Quando la velocità di riempimento supera i 7 m/h il calcestruzzo autocompattante imprime sulle sponde dei casseri una spinta triangolare assimilabile a quello idrostatica di un fluido che possiede una massa di 2500 Kg/m^3 circa; nel maggior parte dei casi per ragioni cautelative si considera la spinta idrostatica sui casseri pari a $p = 25 \text{ KN/m}^3 \cdot \text{m}$. Il conglomerato tradizionale, la cui velocità di posa in opera non supera, salvo casi eccezionali, i 4 m/h, per via della maggiore coesione e viscosità, esercita sulle sponde del cassero una spinta variabile all'incirca tra il 40 e 65 % di quella idrostatica a seconda della consistenza

che possiede al getto (i valori più bassi sono quelli tipici di classi di consistenza S2 e quelli più elevati sono relativi a lavorabilità maggiori di 21 cm di slump). Nel caso del calcestruzzo pompato dal basso la spinta esercitata sui casseri è tipicamente di tipo idrostatico quando le velocità di riempimento superano i 10 m/h.

In definitiva, atteso che una delle motivazioni che induce le imprese a utilizzare i calcestruzzi autocompattanti è proprio quella di accelerare i lavori di esecuzione dell'opera, le velocità di riempimento dei casseri quando vengono impiegati gli SCC superano generalmente i 10 m/h (per i calcestruzzi tradizionali non si possono superare i 5-7 m/h) e, pertanto, le reali pressioni indotte dal calcestruzzo sulle casseforme sono di tipo idrostatico. Ne consegue che per l'impiego di calcestruzzi autocompattanti è necessario ricorrere all'utilizzo di casseri opportunamente progettati in quanto quelli tradizionalmente destinati alla realizzazione di strutture impiegando i calcestruzzi convenzionali sono dimensionati per resistere a spinte notevolmente minori.

Altezza di caduta, distanza laterale di scorrimento e vibrazione

I calcestruzzi autocompattanti posseggono una minore tendenza alla segregazione esterna rispetto ai calcestruzzi tradizionali. Pertanto, l'altezza di caduta del conglomerato può risultare maggiore di quella massima (500 mm) prevista per i conglomerati convenzionali. Tuttavia, il calcestruzzo autocompattante, soprattutto quello caratterizzato da basse viscosità (VF1), possiede maggiore tendenza a segregare. Pertanto, è buona norma durante la posa tenere il manicotto della pompa annegato nel calcestruzzo o al massimo prevedere altezze di caduta del conglomerato non superiori a 1-2 m in relazione alla viscosità dell'SCC. È da tener presente, infine, che un'eccessiva altezza di caduta del conglomerato può peggiorare il facciavista delle strutture per la maggiore difficoltà ad espellere l'aria dall'impasto.

Per quanto attiene, infine, allo scorrimento laterale del calcestruzzo autocompattante, laddove la logistica lo permette, è buona norma spostare il tubo getto in modo che il conglomerato debba percorrere pochi metri lateralmente. Occorre tener presente che maggiore è la distanza percorsa e più elevato sarà il rischio di separazione degli ingredienti. Una ragionevole regola pratica è quella di non superare distanze laterali di scorrimento pari a 8-10 m circa.

Infine, i calcestruzzi autocompattanti sono progettati per poter riempire gli stampi senza vibrazione alcuna. Sottoporre comunque il conglomerato all'azione del vibratore ad immersione non migliora affatto le caratteristiche del calcestruzzo in opera, ma può, invece, accentuarne la tendenza alla segregazione, soprattutto in quegli impasti caratterizzati da

bassi tempi di svuotamento al V-funnel. Si può derogare a questa regola nel caso di solette che possono essere sottoposte ad una blanda azione della staggia vibrante onde migliorarne la qualità estetica della superficie.

Finitura delle superfici e maturazione dei getti

A causa della minore capacità di bleeding i calcestruzzi autocompattanti possono presentare dei problemi rispetto ai calcestruzzi tradizionali in termini di finitura. La mancanza di acqua superficiale e la tendenza ad assumere un comportamento tixotropico rende questi calcestruzzi difficili da rifinire in quanto si presentano appiccicosi ed esposti, soprattutto in climi asciutti e ventilati, alla precoce formazione di croste superficiali. Per questo motivo le operazioni di **finitura** delle superfici debbono essere anticipate rispetto ai tempi dei calcestruzzi tradizionali.

La minore quantità di acqua che perviene sulle superfici per effetto del bleeding è responsabile di una maggiore tendenza degli autocompattanti a evidenziare quadri fessurativi per effetto del ritiro plastico. Pertanto, per questi conglomerati le operazioni di **maturazione** diventano indispensabili e debbono iniziare immediatamente dopo aver ultimato le operazioni di finitura superficiale.

Infine, nelle strutture realizzate con i conglomerati tradizionali la vibrazione, soprattutto se effettuata a parete, tende a richiamare le bolle di aria verso la sponda del cassero e a schiacciarla determinando, al disarmo, la presenza di una serie di bolle di dimensioni variabili da qualche mm a un cm circa che, sebbene non costituiscano un problema per la durabilità dell'opera essendo profonde 1-2 mm circa, ne deturpano l'estetica. Le esperienze di cantiere hanno, tuttavia, confermato che l'ottenimento di un eccellente **faccia-vista** dipende dagli stessi parametri che influenzano quello delle strutture realizzate con i convenzionali conglomerati quali la tipologia del cassero (assorbente o meno); la qualità del disarmante e le modalità di posa in opera (getto dal basso o dall'alto).

Sebbene diventa difficile generalizzare alcune affermazioni si possono fare alcune considerazioni in merito alla qualità estetica dei getti:

- il problema delle bolle superficiali è fortemente attenuato dall'impiego di casseri assorbenti in legno o con controstampi in materiali assorbenti poggiati sulla superficie interna del cassero;
- le bolle superficiali si accentuano quando il getto viene effettuato dall'alto,

all'aumentare dell'altezza di caduta e della velocità di riempimento del cassero;

- è fondamentale effettuare prove preliminari di compatibilità tra disarmante e tipo di cassero prima di accingersi alla realizzazione di strutture dove il faccia-vista viene ritenuta una proprietà fondamentale.

Le caratteristiche dei calcestruzzi autocompattanti

La qualità della zona di transizione all'interfaccia pasta-aggregato influenza significativamente il comportamento deformativo del calcestruzzo e ne governa le modalità di collasso. I calcestruzzi autocompattanti, caratterizzati da una maggiore coesione rispetto ai conglomerati tradizionali, essendo interessati da fenomeni di bleeding interno minori, sono contraddistinti da una zona di transizione di migliore qualità e, pertanto, da una minore percentuale di difetti e di microfessurazioni rispetto ai calcestruzzi convenzionali.

Quindi, le principali caratteristiche rispetto ai calcestruzzi tradizionali sono:

1. Resistenza meccanica a compressione

Prove sperimentali condotte su calcestruzzi autocompattanti e tradizionali hanno messo in evidenza che gli SCC posseggono maggiori resistenze a compressione rispetto ad un impasto convenzionale di pari rapporto a/c. Questo miglioramento sembra da ascrivere ad una zona di transizione meno porosa e priva di fessure. Inoltre, è da evidenziare come i calcestruzzi con filler calcareo presentino, rispetto a quelli con cenere volante di pari a/c, resistenze a compressione maggiori alle brevi stagionature. Questo effetto del filler calcareo sembra sia dovuto ad un incremento della cristallinità dell'ettringite e a una riduzione del periodo dormiente con conseguente accelerazione dei processi di presa e di indurimento. Questi dati sono confermati dal fatto che l'incremento di temperatura in condizioni adiabatiche è sistematicamente più alto nei calcestruzzi confezionati con filler calcareo rispetto a quelli prodotti ricorrendo ad aggiunte pozzolaniche quali la cenere volante.

2. Resistenza a trazione

Il miglioramento della qualità della zona di transizione all'interfaccia pasta-aggregato sembra, inoltre, essere responsabile nei calcestruzzi autocompattanti di un limitato incremento di resistenza a trazione rispetto ad un conglomerato convenzionale di pari resistenza a compressione.

3. Modulo elastico

A causa del minor volume di aggregato grosso il calcestruzzo autocompattante possiede moduli di elasticità a compressione inferiori di quelli evidenziati da un conglomerato

tradizionale di pari resistenza meccanica a compressione. Pertanto, in base ai valori di resistenza a trazione e di modulo elastico si può affermare che i calcestruzzi autocompattanti presentano una minore tendenza alla fessurazione di un conglomerato tradizionale di pari classe di resistenza caratteristica a compressione.

4. Assestamento plastico

La riduzione del bleeding interno nei calcestruzzi autocompattanti è responsabile di una minore tendenza dell'impasto ad evidenziare fenomeni di assestamento plastico nella fase immediatamente successiva alla posa in opera.

5. Ritiro plastico

La riduzione della capacità di bleeding nei calcestruzzi autocompattanti è responsabile di un maggior ritiro plastico rispetto ai conglomerati tradizionali. I dati disponibili in letteratura indicano che il ritiro plastico degli SCC è all'incirca il doppio di quello dei conglomerati tradizionali. Questo effetto sembra sia da ascrivere al maggior rapporto acqua/polveri dell'autocompattante e a tempi di presa più lunghi, determinati dal maggior dosaggio di additivo. I risultati sperimentali giustificano la necessità evidenziata al precedente paragrafo di procedere, immediatamente dopo le operazioni di finitura, alla maturazione umida delle superfici non casserate.

6. Ritiro idraulico

Il ritiro idraulico dei calcestruzzi autocompattanti dipende dagli stessi fattori compositivi che influenzano la contrazione dimensionale dei conglomerati tradizionali (rapporto a/c e volume di pasta di cemento equivalente rispetto al volume complessivo del calcestruzzo). Pertanto, si possono fare le seguenti considerazioni:

- a pari rapporto a/c, pari dosaggio di acqua di impasto e di cemento del calcestruzzo convenzionale gli SCC mostrano valori di ritiro sostanzialmente coincidenti o di poco superiori rispetto a quelli del conglomerato tradizionale indipendentemente dal quantitativo e dalla natura dell'aggiunta minerale utilizzata: filler calcareo o cenere volante. Relativamente a quest'ultima aggiunta i risultati sembrano indicare che il beneficio derivante dalla riduzione del rapporto a/c equivalente sia controbilanciato dall'effetto negativo dovuto all'aumento del volume di pasta legante esposto alla contrazione dimensionale;
- a pari rapporto a/c ma con un dosaggio di acqua e conseguentemente di cemento, maggiore di quelli del conglomerato tradizionale il calcestruzzo autocompattante mostra valori di ritiro significativamente maggiori. Questo risultato è da ascrivere

all'aumento del volume di pasta di cemento interessata dalla contrazione dimensionale.

7. Aderenza acciaio-calcestruzzo

Il miglioramento della zona di transizione all'interfaccia calcestruzzo-armatura è responsabile di un incremento delle tensioni di aderenza valutabile all'incirca tra il 15 e il 40% rispetto a quelle dei conglomerati tradizionali.

8. Durabilità

A pari rapporto a/c (0.40) gli autocompattanti presentano un minor coefficiente di diffusione dei gas (9.8 contro $13.6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$). Il coefficiente di diffusione del cloruro diminuisce negli SCC rispetto ai calcestruzzi convenzionali di pari rapporto a/c (16.1 contro $19.2 \text{ m}^2/\text{s}$; rapporto a/c = 0.40).

La resistenza ai cicli di gelo-disgelo rimane sostanzialmente invariata negli SCC rispetto ad un calcestruzzo convenzionale purché si provveda nel confezionamento ad inglobare un volume minimo di aria mediante gli additivi aeranti e si utilizzino aggregati non gelivi. La scarsa compattazione dello strato superficiale, dovuta a difficoltà di vibrazione negli stretti spazi tra la cassetta e le barre di armatura o altri inserti (ad es. guaine per post-tensione), è stata riconosciuta come il fattore chiave della scarsa durabilità delle strutture di calcestruzzo armato esposte ad ambienti aggressivi. La ricerca di una soluzione a questo problema è stata una delle principali ragioni dello sviluppo originale del SCC in Giappone. Il calcestruzzo vibrato tradizionale è soggetto a compattazione attraverso la vibrazione (o costipamento), considerati come un processo discontinuo. Nel caso della vibrazione interna, anche se correttamente eseguita, il volume del calcestruzzo nell'area di influenza del vibratore non riceve la stessa energia di compattazione. Analogamente, nel caso della vibrazione esterna, la compattazione risultante è essenzialmente eterogenea, a seconda della distanza dalla sorgente della vibrazione. In seguito alla vibrazione si ottiene, quindi, un calcestruzzo dalla struttura non omogeneamente compattata, che quindi presenterà diverse permeabilità facilitando l'ingresso di alcune sostanze aggressive. Naturalmente, le conseguenze di una non adeguata vibrazione (vespai, segregazione, essudazione, ecc.) hanno un impatto negativo molto più forte sulla permeabilità e di conseguenza sulla durabilità. Il calcestruzzo autocompattante dalle giuste proprietà sarà esente da questi effetti secondari e costituirà un materiale di permeabilità bassa e uniforme, che offrirà meno punti deboli per l'azione deleteria dell'ambiente, e di conseguenza una migliore durabilità. Il paragone della permeabilità del calcestruzzo autocompattante e quello normale vibrato dipenderà dalla selezione dei materiali e dal rapporto acqua/cemento o acqua/legante effettivo. Esistono

metodi di prova, normalizzati a livello nazionale oppure consigliati da RILEM, per misurare la permeabilità del calcestruzzo, in laboratorio e in situ, come indicatori della durabilità.

La EN 1992-1 e la EN 206-1 tengono conto della durabilità specificando classi di esposizione ambientale che portano all'introduzione di valori limiti per la composizione del calcestruzzo e dei copriferri minimi.

Le specifiche del calcestruzzo autocompattante

Si vuole ora illustrare le specifiche del calcestruzzo compattante in relazione alla *tipologia di struttura da realizzare*, in modo da garantire una scelta adeguata dello stesso. Si è già esplicitato che, per avere un quadro esaustivo circa le proprietà reologiche richieste per gli SCC, si ricorre a diversi metodi di prova. Questo significa che calcestruzzi autocompattanti che posseggono stesse proprietà di scorrimento (ad esempio, perché evidenziano un medesimo valore dello slump-flow) possono, allo stesso tempo, essere contraddistinti da una tendenza alla segregazione o da una capacità di attraversamento completamente differenti. Per questo motivo, basare la scelta del calcestruzzo autocompattante sui risultati desunti da una soltanto delle metodologie di prova può risultare del tutto erroneo. Inoltre, è opportuno far presente che non necessariamente per tutte le strutture è opportuno ricorrere all'impiego di calcestruzzi autocompattanti contraddistinti dalla massima capacità di scorrimento (SF3) o dalla minore viscosità (VF1) perché questa scelta espone al rischio di una maggiore tendenza dell'impasto a segregare. Allo stesso modo, non è detto che la scelta di viscosità elevate possa rivelarsi sempre la soluzione migliore per un calcestruzzo autocompattante in quanto se, da una parte, questo conduce ad una maggiore resistenza alla segregazione, dall'altra riduce la capacità di scorrimento che potrebbe, invece, rivelarsi fondamentale quando per la ridotta accessibilità dei punti di getto si richiede che il conglomerato fluisca per lunghe distanze.

Si intuisce, quindi, che la scelta del calcestruzzo autocompattante deve tenere conto delle particolari esigenze derivanti dalla difficoltà di esecuzione del getto, della geometria e della percentuale dei ferri, della distanza che il calcestruzzo deve percorrere, al pari di quanto avviene nella scelta della lavorabilità dei calcestruzzi tradizionali con l'aggravante che, a causa dell'elevata fluidità del conglomerato per la necessità di non dover ricorrere ad alcuna forma di vibrazione esterna, la tendenza alla segregazione degli SCC risulta esasperata.

In accordo con quanto sopra riportato si possono fare ora alcune considerazioni riguardo alle proprietà dei calcestruzzi autocompattanti in relazione alla geometria dell'elemento strutturale, della densità dei ferri di armatura e della distanza percorsa dal calcestruzzo:

- la **classe di spandimento SF1** è appropriata per strutture debolmente armate quando al calcestruzzo non si richiede di percorrere distanze superiori ai 2.5 m e il getto avviene dall'alto mediante l'utilizzo della pompa (solette di civile abitazione) oppure quando occorre gettare elementi verticali quali pali e paratie di fondazione;
- la **classe di spandimento SF2** si presta per la realizzazione della maggior parte delle applicazioni correnti quali la realizzazione di strutture verticali di notevole altezza, muri di sostegno e pilastri. Inoltre, essa risulta particolarmente indicata per la realizzazione di platee di fondazione e pile da ponte;
- la **classe di spandimento SF3** è idonea per la realizzazione di strutture molto congestionate dalla presenza di ferri di armatura quali i solai con travi a spessore, i nuclei ascensore, le pareti sottili oppure i muri di notevole altezza, soprattutto quando il getto del conglomerato viene effettuato mediante pompa inserita sul fondo del cassero. È da notare come questa possibilità di gettare dal basso verso l'alto viene offerta grazie all'elevata fluidità degli SCC e ha il vantaggio di eliminare completamente i nidi di ghiaia per segregazione esterna oltre a favorire l'espulsione dell'aria dal calcestruzzo e, quindi, a garantire l'ottenimento di un faccia-vista di eccellente qualità. Il pompaggio dal basso verso l'alto del calcestruzzo viene effettuato collegando la pompa con una speciale connettore con valvole a pistone. Dopo aver terminato il pompaggio, la valvola viene chiusa e bloccata e il calcestruzzo che sporge dal filo del cassero viene spinto verso l'interno della sponda mediante un perno apposito;

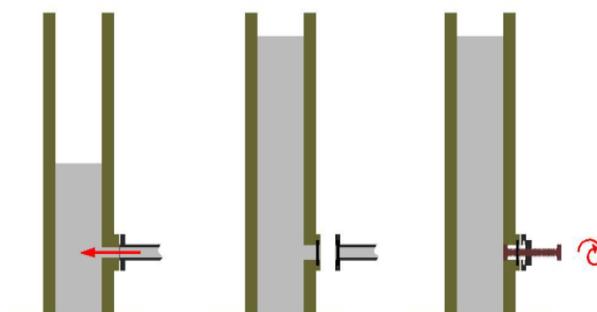


Figura 73: pompaggio dal basso verso l'alto

- la **classe di viscosità VF1** si presta, grazie al buon potere di autolivellamento e alle migliori proprietà di espulsione dell'aria rispetto alla VF2, per essere impiegata in quelle strutture ove il facciavista rappresenta una caratteristica predominante per l'opera. Inoltre, questa classe di consistenza risulta idonea anche per la realizzazione di strutture di grande estensione (ad esempio, le platee di fondazione e i muri di notevole sviluppo lineare) in quanto presenta, per via della più bassa viscosità rispetto alla classe VF2, minore tendenza a creare “giunti freddi” in corrispondenza delle riprese di getto;
- la **classe di viscosità VF2** consente di realizzare strutture sub-orizzontali quali rampe di accesso ai garage o ai parcheggi multipiano;
- la capacità di attraversamento (*passing ability*) è connessa con la dimensione minima dell'elemento strutturale e con l'interferro. Generalmente, si richiede una **classe di attraversamento PA1 o PA2** in quelle strutture rispettivamente con dimensioni minime/interferri compresi tra 80 e 100 mm oppure minori;
- relativamente alla **resistenza alla segregazione (SR)** essa è connessa con la distanza che deve percorrere il calcestruzzo e con le dimensioni dell'interferro: distanze inferiori a 5 m e interferri maggiori di 80 mm richiedono l'impiego di calcestruzzi SR1. La classe SR2, invece, risulta necessaria per distanze di scorrimento superiori a 5 m o per interferri minori di 80 mm.

RESISTENZA ALLA SEGREGAZIONE t_0 : V-FUNNEL; t_{500} : SLUMP-FLOW	VF2	RAMPE E STRUTTURE SUB-ORIZZONTALI	SOLETTE ARMATE DOTATE DI PENDENZA (SPECIFICARE PA)	-			
	VF1 so VF2	PALI E PARATIE	•MURI (VF2); •PILASTRI (VF2); •MURI FACCIAVISTA (VF1); •MURI DI GRANDE ESTENSIONE (VF1);	•NUCLEI ASCENSORE; •TORRI PIEZOMETRICHE; (SPECIFICARE SR e PA)			
	VF1	SOLETTE DI CIVILE ABITAZIONE	PLATEE DI FONDAZIONE (SPECIFICARE SR)	•SOLAI CON TRAVI A SPESSORE; •PARETI SOTTILI; •MURI GETTATI DAL BASSO VERSO L'ALTO;			
	550	SF1	650	SF2	750	SF3	850
	SI LUMP-FLOW (mm)						

Figura 74: proprietà reologiche in funzione della tipologia strutturale cui il conglomerato è destinato

Le prestazioni degli SCC

A seguito del miglioramento della qualità della microstruttura per i calcestruzzi autocompattanti ci si deve attendere sia allo stato fresco che indurito prestazioni più elevate rispetto ad un calcestruzzo convenzionale di pari rapporto a/c equivalente.

Le **prestazioni allo stato fresco** sono:

- L'eccellente fluidità che permette al materiale di riempire facilmente le casseforme senza alcun intervento esterno delle maestranze con le apparecchiature per la vibrazione;
- la possibilità di passare attraverso i ferri d'armatura anche quando la loro densità è molto alta;
- la resistenza alla segregazione che permette di avere un getto omogeneo, monolitico e compatto.

Le **prestazioni allo stato indurito** sono:

- resistenza caratteristica coerente con la classe di esposizione ambientale prescritta;
- non necessita di finiture;
- migliora la faccia a vista delle strutture.

Da tali prestazioni è possibile ottenere sia da parte delle imprese esecutrici dei lavori che per il committente dei vantaggi e benefici.

Per l'*impresa* si avranno:

Vantaggi

- Manodopera ridotta;
- Nessuna operazione di vibrazione e costipazione del calcestruzzo;
- Nessuna operazione di finitura e stuccatura a getto avvenuto;
- Riempimento completo ed omogeneo delle casseforme anche con presenza di ferri d'armatura.

Benefici

- Riduzione dei tempi di posa;
- Riduzione dei costi di costipazione;
- Rispetto delle prescrizioni di progetto;
- Riduzione dell'inquinamento;
- Miglioramento delle condizioni di salute e sicurezza (nessuna operazione di vibratura e minor rumore).

Per il *committente* si avranno:

Vantaggi

- Certezza del rispetto delle prescrizioni di progetto;
- Rispetto delle norme di sicurezza.

Benefici

- Minori costi di manutenzione dell'opera finita;
- Incremento della vita di servizio;
- Compatibilità con criteri di rispetto dell'ambiente e di sicurezza dei cantieri;
- Qualità estetica dell'opera;
- Libertà di progettazione architettonica.

Per contro, gli **aspetti critici** legati all'uso dell'SCC rispetto al calcestruzzo ordinario riguardano:

- il tendenziale maggior costo dell'SCC rispetto a calcestruzzi ordinari di pari resistenza;
- le maggiori spinte esercitate dagli SCC sui casseri e le conseguenti maggiori spese per la loro realizzazione (calibrazione delle velocità e delle altezze di getto);
- l'assenza di modelli validati per un'adeguata previsione di queste spinte;
- l'assenza di modelli pienamente validati per la previsione dei valori del modulo elastico e dei fenomeni lenti (creep e ritiro);
- la maggior attenzione richiesta nella selezione dei materiali;
- la maggior cura necessaria nel proporzionamento e progetto delle miscele (mix design);
- i più alti livelli di conoscenza, organizzazione ed esperienza necessari sia negli impianti di produzione che in cantiere;
- la tendenza a manifestare maggiore ritiro plastico.

Applicazioni: nel settore delle **nuove costruzioni** i calcestruzzi autocompattanti trovano impiego nella realizzazione di strutture a sviluppo verticale di geometrie particolarmente complesse o quando l'estetica (faccia-vista) acquista una rilevanza predominante. Il calcestruzzo autocompattante grazie alla sua elevata deformabilità infatti consente la realizzazione di strutture anche a sviluppo curvilineo e migliora il grado di finitura in corrispondenza dei punti singolari rappresentati da variazioni di sezione, dalla presenza di aperture o rientranze. In linea di massima rispettando gli accorgimenti progettuali ed esecutivi richiesti per getti faccia-vista l'impiego di un conglomerato autocompattante

consente la realizzazione di manufatti che dal punto di vista estetico presentano una migliore finitura rispetto a quella conseguibile con un conglomerato superfluidido. Esempio di questo è il Maxxi Museo a Roma, progettato dall'architetto Zara Hadid.



Figura 75: cantiere del Maxxi Museo

I calcestruzzi autocompattanti vengono impiegati anche nel **settore dei pavimenti** e delle platee di fondazione in quanto il loro vantaggio consiste nella possibilità di accelerare i tempi di esecuzione delle strutture oltre che di ridurre la manodopera, grazie alla eliminazione dei processi di vibrazione. I conglomerati autocompattanti, inoltre, si prestano a realizzare strutture di fondazione a platea in quanto in molti casi la percentuale di armatura nella sezione risulta così rilevante da impedire l'accesso dell'ago del vibratore. Questa operazione ovviamente sarebbe di impossibile o quantomeno difficile attuazione impiegando un calcestruzzo a consistenza S5 o S4.



Figura 75: getto di pavimentazioni industriali

Nel settore del ripristino di **strutture esistenti** sono numerose le applicazioni che si registrano ricorrendo all'impiego dei calcestruzzi autocompattanti per il ringrosso delle sezioni originarie soprattutto di elementi verticali. I vantaggi derivanti dall'utilizzo degli SCC in questo contesto derivano dal fatto che a causa del ridotto spessore del ringrosso è praticamente impossibile procedere alla compattazione di un calcestruzzo tradizionale superfluido. Inoltre, la elevata fluidità degli SCC consente anche di poter gettare attraverso spazi angusti come avviene quando, nel ringrosso di un pilastro, la posa in opera deve avvenire dall'estradosso del solaio attraverso i fori realizzati nelle travi o nelle pignatte di laterizio.

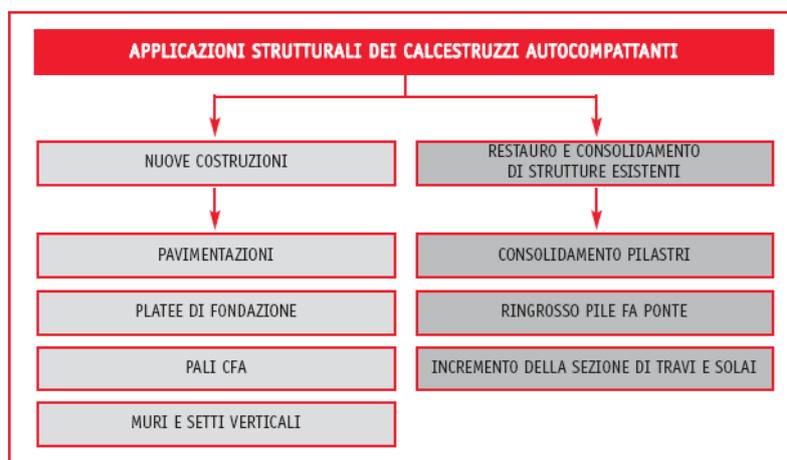


Figura 76: applicazioni strutturali dei SCC

3.2 Le tipologie di calcestruzzo in fase di sperimentazione

Calcestruzzo autoriparante

Dalla ricerca del prof. Hendrik Marius Jonkers, dell'università di Delf in Olanda, che prendendo spunto dalla pelle umana artificiale, che si auto guarisce, nasce il calcestruzzo biologico del futuro in grado di riparare quelle fessure che esporrebbero la matrice cementizia agli agenti atmosferici con conseguente attacco ai ferri d'armatura. Il mix di calcestruzzo contiene batteri *bacillus* (in particolare un fungo della specie *Trichoderma reesei*), una specie che vive in condizioni alcaline e che produce spore che possono sopravvivere per decenni senza cibo, acqua o ossigeno. Ma è il proprio il cibo che permette loro di produrre il calcare biologico e per tanto si è pensato di fornire loro di cibo attraverso minuscole perline biodegradabili di calcio lattato che contengono le spore batteriche che vengono aggiunte alla miscela di cemento insieme ad un mix di azoto, fosforo e agenti nutritivi. Questo approccio innovativo garantisce che i batteri possano rimanere dormienti nel calcestruzzo fino a 200 anni. Il contatto con le sostane nutrienti si verifica solo in presenza di umidità nella miscela indurita e non durante la miscelazione del cemento.

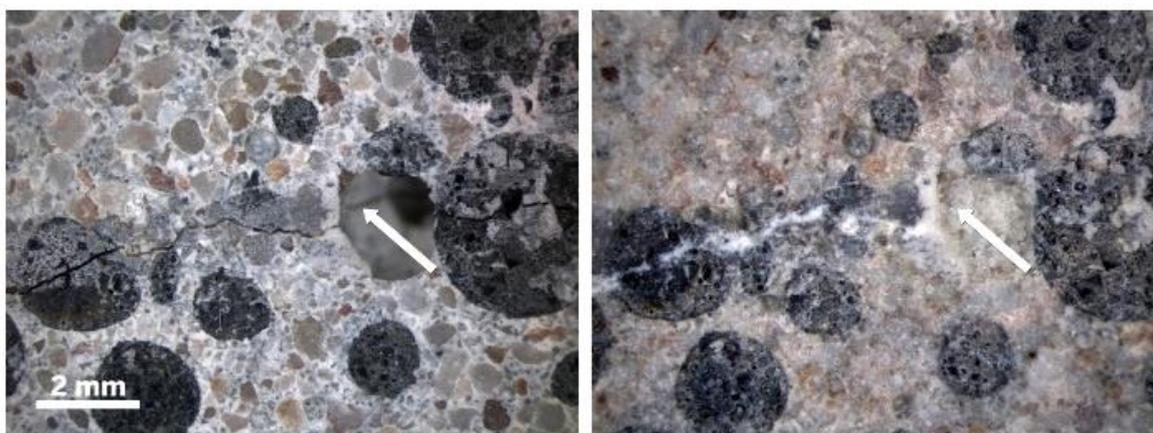


Figura 77: effetto visivo dell'azione autoriparante

Quindi, ogni volta che si forma una crepa nel calcestruzzo indurito, l'acqua che penetra attiva i batteri dormienti, che inghiottendo le sostanze nutritive e moltiplicandosi, il loro metabolismo convertirà il lattato di calcio in carbonato di calcio, creando la calce che lentamente riempirà le crepe. Un altro aspetto positivo di questa proprietà è che i batteri si nutrono di quell'ossigeno che creerebbe a sua volta la corrosione interna del cemento armato. Inoltre, i batteri non rappresentano un rischio per la salute umana, in quanto possono sopravvivere solo alle condizioni alcaline all'interno del calcestruzzo. Sulla base di questi risultati, Jonkers e il suo team di ricercatori hanno sviluppato tre differenti miscele di calcestruzzo batterico: il calcestruzzo autoriparante, in cui la massa di batteri è aggiunta durante la miscelazione delle materie prime; una malta di riparazione e un sistema liquido in cui la massa entra in gioco quando si è verificato un danno evidente nelle **strutture** in calcestruzzo. Tutto questo a vantaggio dei costi di manutenzione che saranno ridotti praticamente a zero.

Calcestruzzo fotocatalitico al grafene

La ricerca di Italcementi ha portato negli ultimi anni alla registrazione di un brevetto per una nuova formulazione di cemento fotocatalitico al grafene al quale hanno collaborato l'Università di Bologna e il Technion – Israel Institute of Technology (TRDF), partner di Italcementi nel progetto iniziale insieme all'Eindhoven University of Technology (TU/e); oggi fanno parte del team di ricerca anche il Cambridge Graphene Center dell'Università di Cambridge (UCAM) e la Technische Universität Dresden (TUD). Tale brevetto unisce alle note proprietà meccaniche di resistenza e flessibilità e alle potenzialità di un materiale comune e largamente diffuso come il calcestruzzo, quelle del grafene, ovvero un materiale incredibilmente forte e leggero, con eccezionale conduttività elettrica e di calore, creando un

composito cementizio elettricamente conduttivo senza comprometterne le performance (resistenza e fluidità).

Applicazioni: il calcestruzzo al grafene potrà essere impiegato nel **riscaldamento a pavimento o a parete**. Grazie alla trasformazione dell'energia elettrica in energia termica, un sottilissimo strato di composto cementizio altamente conduttivo posto al di sotto della pavimentazione o dell'intonaco sarà in grado di offrire un sistema di riscaldamento poco invasivo ed efficace, accrescendo il comfort abitativo e ottimizzando gli spazi. Una soluzione duratura, che richiede poca manutenzione e contribuisce al risparmio energetico, con vantaggi anche dal punto di vista economico. La ricerca sta andando ancora più avanti e Italcementi sta studiando anche altre interessanti applicazioni di questi smart concrete. Il composito cementizio potrà essere utilizzato per **riscaldare superfici esterne**, offrendo una soluzione anti-neve e anti-ghiaccio sicura ed eco-friendly. Nel prossimo futuro, strade e piste ciclabili, rampe del garage di casa, moli e piste aeroportuali potranno essere ripulite da ghiaccio e neve senza bisogno di sale corrosivo e prodotti chimici antigelo, salvaguardando la sicurezza delle persone, la durabilità dei materiali e l'impatto sull'ambiente. Guardando al medio termine, si potranno realizzare ulteriori importanti applicazioni per **il monitoraggio strutturale delle costruzioni**: la conduttività rende possibili soluzioni "self-sensing" in grado di monitorare sforzi, deformazioni e stati fessurativi del calcestruzzo in tempo reale senza la necessità di appositi sensori aggiuntivi (o integrandoli in maniera efficiente). Si tratta di soluzioni che permetteranno di intervenire tempestivamente nel caso di iniziali fenomeni di degrado delle infrastrutture, con grandi vantaggi dal punto di vista della durabilità delle opere. Altre possibili applicazioni riguardano **le pavimentazioni antistatiche**, la schermatura degli edifici dalle interferenze elettromagnetiche (EMI) e la dissipazione delle cariche elettrostatiche, tutte soluzioni non solo all'avanguardia ma anche ottimizzabili in un vicino futuro. In un futuro più a lungo termine, invece, il calcestruzzo elettricamente conduttivo potrà portare grandi novità anche nella mobilità, permettendo di **ricaricare per esempio i veicoli elettrici direttamente in movimento durante la guida**, settore nel quale la ricerca Italcementi è già attiva da tempo.

Calcestruzzo EDCC (Eco-friendly Ductile Cementitious Composite)

L'innovazione arriva da un team di ricercatori dell'università canadese della Columbia Britannica ed è un mix di calce, acqua, sabbia e aggregati con fibre a base di polimeri, ceneri volanti e altri additivi industriali. È stato progettato su scala molecolare per essere forte,

malleabile e duttile, in modo molto simile all'acciaio, spiegano gli studiosi, secondo cui l'applicazione come rivestimento sulle superfici di edifici vulnerabili ne aumenta la resistenza ai terremoti. Il calcestruzzo è stato infatti testato simulando la magnitudo 9.0 del sisma che nel 2011 ha colpito la regione giapponese del Tohoku causando il disastro di Fukushima. E si è osservato che basta spruzzare un sottile strato di 1 cm per riuscire a rinforzare una parete contro gli urti sismici in modo consistente.

Applicazioni: potrebbero andare aldilà **del rinforzo delle pareti**, utilizzandolo anche per la costruzione delle condutture, per le **pavimentazioni industriali**, per i marciapiedi e molto altro. Altra caratteristica interessante di questo tipo di calcestruzzo è la sostenibilità: essendo fatto per il 70% di ceneri volanti, che sono un sottoprodotto industriale, si riesce di fatto a ridurre la produzione di cemento, che è altamente inquinante e al tempo stesso a ridurre l'impatto ambientale di questi scarti industriali riciclandoli per le costruzioni.

Bio-cemento BAAC (Bio Aerated Autoclavated Concrete)

Arriva dai ricercatori Enea, del Centro Ricerche Trisaia e del Centro Ricerche Casaccia, il bio-cemento super isolante basato sull'utilizzo del lievito di birra e acqua ossigenata, con elevate proprietà di isolamento termico e acustico e di resistenza al fuoco.

Applicazioni: è un'**alternativa al calcestruzzo aerato autoclavato**¹⁹ più sicura e più verde: la polvere di alluminio è stata sostituita con lievito di birra miscelato ad acqua ossigenata, che consente di ottenere un prodotto tecnicamente molto leggero per la grande quantità di bolle d'aria al suo interno, lasciando inalterate le caratteristiche meccaniche e fisiche del materiale cementizio. I vantaggi derivanti dall'utilizzo del bio-cemento si riscontrano sia in termini economici che di sostenibilità ambientale, infatti si va dalla riduzione del numero dei componenti addizionali come la calce e il gesso, all'abbattimento delle spese energetiche e dei costi indiretti connessi alla gestione dell'impianto.

¹⁹ Materiale superiore al tradizionale laterizio in quanto dotato di un elevato potere coibente e di isolamento acustico. Grazie alla particolare struttura porosa è anche molto più leggero, senza perdere di resistenza a compressione; ma per creare i pori interni, ossia attivare il processo di lievitazione dell'impasto cementizio, è normalmente impiegato la polvere di alluminio che lo rende poco sostenibile. Un agente aerante che reagendo con gli altri materiali e liberando bolle di idrogeno è molto infiammabile e richiede, pertanto, stringenti misure di sicurezza degli impianti.



Figura 78: bio-cemento superisolante

Calcestruzzo con fibre vegetali

I ricercatori del Dipartimento di Ingegneria della Lancaster University, impegnati nel progetto di ricerca europeo B-SMART, finalizzato a sviluppare nuovi composti cementizi green, hanno dimostrato che l'aggiunta di nano piastrine a base di cellulosa vegetale alle comuni miscele cementizie, come il cemento ordinario Portland, si possa ottenere un composto ecologico e sostenibile che possa anche migliorare notevolmente le proprietà meccaniche del calcestruzzo. Infatti aggiungendo questi biomateriali a basso costo sintetizzati dagli scarti di ortaggi da radice, come ad esempio le carote e le barbabietole, si può ottenere un calcestruzzo molto più resistente con dosaggi minori di cemento, arrivando a contare addirittura 40 kg di cemento Portland in meno per metro cubo di calcestruzzo prodotto. Se il volume di CO₂, emesso nell'atmosfera durante la produzione di un calcestruzzo è direttamente proporzionale alla quantità di cemento utilizzata nella miscela, appare evidente che i risultati ottenuti dai ricercatori inglesi possono offrire notevoli vantaggi sia per l'uomo e sia per l'ambiente, contribuendo alla riduzione delle emissioni di carbonio da costruzioni in atmosfera. Inoltre, l'aggiunta di fibre vegetali alla miscela cementizia tende ad aumentare nel bio-composto la quantità di silicato di calcio idrato, ovvero la sostanza chimica che principalmente determina la resistenza meccanica del cemento stesso.

Applicazioni: anche se la matrice cementizia è costituita da materiali vegetali, tali calcestruzzi, come già detto, conferiscono una buona resistenza meccanica in modo da poter essere utilizzati anche per le **strutture portanti**.

Ad oggi le ricerche sui calcestruzzi innovativi, che si continuano a sviluppare nei laboratori di tutto il mondo, riguardano anche altri campi di applicazione come le infrastrutture. Il fine è lo stesso, ovvero di ottenere calcestruzzi sempre più resistenti e che abbattano i costi di

produzione, messa in opera e manutenzione, ma soprattutto che siano sostenibili, a ridotto impatto ambientale (quasi a zero). Un esempio è il **ConFlexPen**: un calcestruzzo che contiene una mistura di due fibre sintetiche che lo rendono flessibile; infatti sotto pressione il materiale si flette invece di rompersi. Pensato per essere utilizzato per le strade del futuro, in modo da ridurre notevolmente la manutenzione data l'assenza di buche che si formano sul manto stradale.



Figura 79: differenza prova a flessione tra un calcestruzzo tradizionale e quello flettente

Parte Seconda: applicazione al caso studio



1 Caso studio: ville residenziali monopiano

1.1 Presentazione caso studio

Il caso studio ha come oggetto il progetto della realizzazione di n. 4 ville unifamiliari con annesse zone private a verde, area a parcheggio scoperto, n. 5 posti auto interrati sito nel Comune di Bari. Al progetto originale, il quale prevede come materiale da costruzione solamente il calcestruzzo “tradizionale”, si è pensato ad alternative strutturali e architettoniche che prevedono l’utilizzo di diversi tipi di calcestruzzi “innovativi”. Successivamente si prevede un’analisi economica e dal punto di vista delle prestazioni, in modo da poter effettuare un confronto tra gli stessi sia in fase di costruzione che in fase di gestione/manutenzione, al fine di evidenziare vantaggi e svantaggi derivanti dal loro utilizzo. Il progetto attuale prevede dapprima la demolizione di una palazzina esistente:

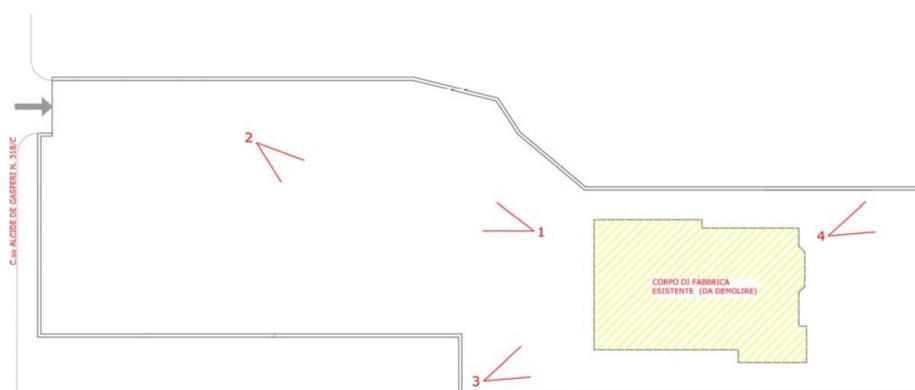


Figura 80: lotto di progetto con corpo di fabbrica esistente

di cui si riportano i diversi dati:

PIANO	SUPERFICIE (m ²)	H1 (ml)	H2 (ml)	Hmedia(ml)	VOLUME (m ³)
Rialzato	165,25	2,9	3,9	3,4	561,85
Terra	147,15	2,36	4,44	3,4	500,31
TOTALE	312,14				1062,16

Tabella 14: dati relativi alla palazzina esistente sul lotto

Tale edificio sarà demolito completamente, rimanendo salvo il diritto di deroga ai confini relativamente alle distanze di legge; la suscettività del suolo è quindi utilizzata tutta per i nuovi volumi monofamiliari che sono disposti come in planimetria di progetto (Figura 80).

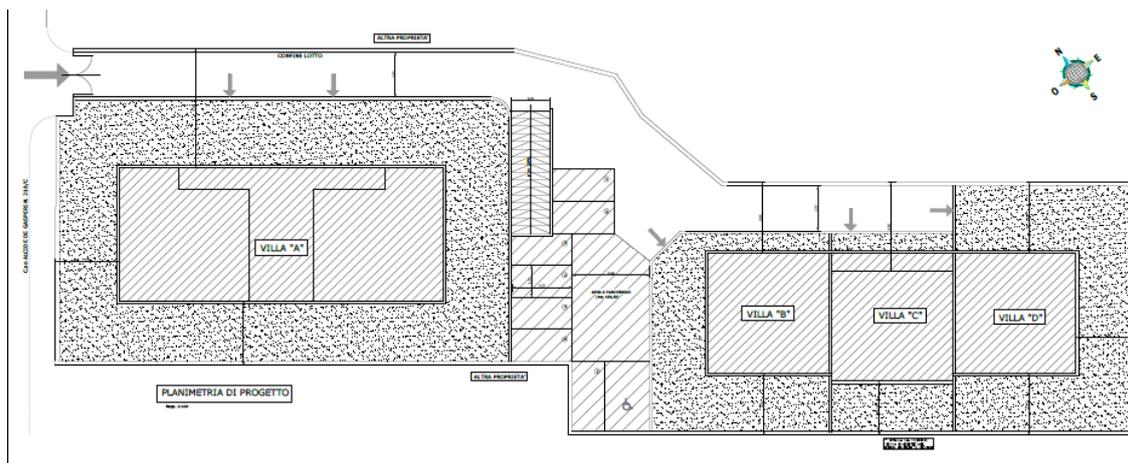


Figura 81: planimetria di progetto

E quindi successivamente è prevista la ricostruzione delle ville monopiano, costituite ognuna da un interrato per deposito e servizi tecnologici e da un unico piano fuori terra di altezza interna = 2,70 ml ed altezza esterna = 3,00 ml.

Di seguito si riportano i dati tecnici dell'intervento previsto:

- Superficie suolo = 1936,34 m²
- Indice di fabbricato = 0.5 m³/m²
- Volume edificio esistente da demolire = 1062,16 m³
- Incremento Volume x piano casa = (1062,16 x 1.35) x 1,05 = 1505,62 m³
- Superficie totale realizzabile = 1505,62:3,25 = 463 m²
- Superficie x parcheggio esterno minima = 134,70 m²
- Autorimesse interrate = n. 5
- Ds = 7,50 ml dal ciglio stradale come da art. 19 delle N.T.A del Comune di Bari

Si riportano di seguito i dati tecnici delle singole ville identificate dalle lettere alfabetiche come in planimetria citata. (int. = interrato, ft = fuori terra):

VILLA	SUPERFICIE INTERRATO (m ²)	VOLUME INTERRATO (m ³)	SUPERFICIE PIANO TERRA (m ²)	VOLUME PIANO TERRA (m)
A	206	618	189	567
B	87	261	87	261
C	85	255	85	255
D	87	261	87	261
TOTALE	465	1395	448	1344

Tabella 15: dati relativi alle ville monopiano da realizzare sul lotto

Il sistema costruttivo di ogni villa è costituita da una struttura in c.a. composta da fondazioni, pilastri, travi a telai e solai in latero – cemento, e da materiali di finitura con particolare riferimento al contenimento del consumo energetico (murature di tompagno in mattoni Poroton o similari, vetri atermici, isolamenti adeguati, ecc) e vernici atossiche. Inoltre, sono previsti gli impianti elettrico, citofonico e telefonico, di messa a terra, idrico/fognante, riscaldamento a pompa di calore e radiatori in acciaio, fotovoltaico, solare termico e quant'altro necessario per rendere ogni villa di categoria A+.

Il complesso, completamente recintato sui confini, avrà un accesso generale da via A. De Gasperi con cancello condominiale, da cui è prevista una viabilità interna adiacente al lato nord – ovest del suolo, con $L = 3,50$ ml. Ogni villa avrà una dotazione di verde recintato con accesso alla viabilità citata che serve anche il piazzale adibito a parcheggio esterno posizionato in zona baricentrica come da planimetria; da tale piazzale si imbecca la rampa carrabile a ($L = 3,00$ ml) che permette di accedere alle 5 autorimesse ubicate al piano interrato.



Figura 82: render del progetto oggetto del caso studio

1.2 Analisi geologica

L'area interessata dall'intervento edile presenta un andamento morfologico subpianeggiante non interessato da fronti di instabilità, forme carsiche e/o tettoniche di notevoli dimensioni, linee di ruscellamento meteorico. L'area presenta una quota variabile da 32.2 m a circa 34 m s.l.m. con una pendenza verso nord pari all'1% circa, la distanza dalla costa adriatica di circa 3.4 km.

Dapprima, sono state effettuate indagini geognostiche, svolte per determinare la natura del terreno e le sue caratteristiche, al fine di progettare fondazioni opportune al tipo di ambiente.

Le indagini effettuate:

- scavo e affioramenti sul terreno adiacente;
- sismica a rifrazione;
- sismica MASW;

hanno permesso di verificare che in passato l'area in esame è stata oggetto di cava per la produzione di "tuffi" per edilizia, come evidente dalle pareti di scavo affioranti lungo i limiti di particella est e sud.



Figura 83: affioramento di calcareniti e scavo in terreno adiacente

Trattandosi l'area in oggetto di una ex cava parzialmente ricolmata, il terreno è inizialmente caratterizzato da materiale di riporto, per uno spessore di circa 2-3 m. Successivamente è presente la calcarenite²⁰ a media compattezza che presenta un angolo di attrito pari a 26°. Man mano che si procede in profondità, le calcareniti diventano più compatte. A circa 8-10 m dal piano si intercetta il passaggio stratigrafico alla formazione calcarea. Il calcare, a differenza della calcarenite, è molto più compatto e resistente; infatti pur presentando

²⁰ La calcarenite è un tipo di roccia sedimentaria clastica, formata da particelle calcaree delle dimensioni della sabbia (0,063-2 mm di diametro). I clasti che compongono la calcarenite sono spesso di origine biologica, ovvero fossili di organismi marini, spesso frammenti di gusci di molluschi, alghe o foraminiferi. La resistenza meccanica di questa roccia cambia con il suo grado di saturazione in acqua. Inoltre processi di dissoluzione chimica del cemento portano ad ulteriori riduzioni di resistenza e rigidità.

significative variazioni di resistenza a compressione e trazioni, le quali dipendono dalla presenza dei vuoti, ma comunque tali valori sono sempre alti. Per tanto, la natura calcarenitica del substrato di fondazione in relazione alla profondità di posa delle strutture fondali ed allo spessore dei sedimenti detritici superficiali, ha caratteristiche geomeccaniche lo rendono idoneo a tale scopo. Inoltre, data la natura dei terreni di fondazione, è opportuno evitare che le acque piovane non interessino il piano di fondazione. In caso di saturazione, le caratteristiche meccanico tendono a scadere anche del 50%. Non si esclude la possibilità di piccole cavità riempite di terra rossa, che in fase di scavo dovranno essere eliminate, al fine di evitare cedimenti successivi.

Stratigrafia	Falda	Descrizione	valori caratteristici			
			densità g/cm ³	angolo attrito	Es Kg/cm ²	c Kg/cm ²
0		terreno vegetale	1.53	21	133	
1		riporto	1.77	26	459	0.000
2						
3		calcareniti	1.93	32	1055	0.200
4						
5						
6						
7		calcareniti	2.05	34	1910	0.300
8						
9						
10						
11		calcare	2.19	39	6945	0.000
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						

Figura 84: stratigrafia del terreno con valori caratteristici derivanti dalle analisi

Valori caratteristici					
Parametri elasto-meccanici		I	II	III	IV
litologia		riporto	calcareniti	calcareniti	calcare
compattezza		medio-bassa	medio-alta	medio-alta	media
spessore	m	2.00	4.50	4.45	>20
densità in sito g	g/cm ³	1.77	1.93	2.05	2.19
modulo di Poisson μ		0.35	0.35	0.35	0.33
mod. statico di Young Es	Kg/cm ²	459	1055	1910	6945
mod. edometrico Edo	Kg/cm ²	299	676	1219	
angolo di attrito Φ	gradi	26	32	34	39
angolo di attrito terr.-fond.	gradi	17	20	22	24
adesione terr.-fond.	Kg/cm ²	0.00	0.12	0.18	0.00
RQD	%	0	43	80	49
Nspt	n°	40	114	230	rifiuto
coesione calcarì	Kg/cm ²				2.01
coesione c	Kg/cm ²	0.000	0.200	0.300	0.000
indice RMR					54
qualità C.S.I.R.					mediocre
coeff. spinta passiva K		2.58	3.25	3.54	4.32

Figura 85: valori caratteristici del terreno

Quindi, le analisi hanno determinato che il sottosuolo in questione è di tipo B:

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositì di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositì di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Figura 86: categorie di sottosuolo

e categoria topografica di tipo T1 e per tanto non si osservano variazioni di quota della superficie topografica degne di valutazioni particolari:

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Figura 87: categorie topografiche

1.3 Scelta dei materiali e dimensionamento strutturale

Successivamente si è passati alla scelta dei materiali da utilizzare, in particolare calcestruzzo e acciaio, idonei al tipo di terreno. Per quanto concerne il calcestruzzo, in base alle specifiche analizzate nella “Parte Prima” di questa tesi, si è evidenziato, appunto, la dipendenza di tale scelta alle condizioni ambientali e quindi anche al tipo di terreno su cui si realizzerà il progetto oggetto di studio. Per tanto, considerando una classe di esposizione XC1-XC2 (caso di corrosione delle armature da carbonatazione) si è optato per un calcestruzzo **C 25/30** (come è possibile vedere dalla *Figura 88*), con R_{ck} uguale a 300daN/cm².

	Classi di esposizione																
	Nessun rischio di corrosione armatura	Corrosione armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione armature indotta da cloruri						Attacco da cicli gelo/disgelo			Ambiente aggressivo per attacco chimico		
						Acqua di mare			Cloruri provenienti da altre fonti								
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Massimo apporto A/C	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Minima classe di resistenza ⁽¹⁾	C12/15	C25/30	C28/35	C32/40	C32/40	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45	32/40	25/30	28/35	28/35	32/40	35/45		
Minimo contenuto in cemento (kg/m ³)	-	300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	360		
Contenuto minimo in aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0 ⁽²⁾	-	-	-		
Altri requisiti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo			È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati ⁽³⁾		

⁽¹⁾ Nel prospetto 7 della UNI EN 206-1 viene riportata la classe CR/10 corrispondente a specifici calcestruzzi destinati a sottofondazioni e ricoprimenti. Per tale classe dovrebbero essere definite le prescrizioni di durabilità nei riguardi di acque o terreni aggressivi.

⁽²⁾ Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni devono essere verificate rispetto a un calcestruzzo aerato, per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo, da determinarsi secondo la UNI 8087, per la relativa classe di esposizione.

⁽³⁾ Qualora la presenza di solfati comporti le classi di esposizione XA2 e XA3 è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati secondo la UNI 9156.

Figura 88: valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo, secondo UNI 11104

Mentre per quanto riguarda l'acciaio si è scelto un **B450C**, in cui il numero esprime la tensione di snervamento e C la classe di duttilità (acciaio laminato a caldo).

Per il **dimensionamento** della struttura di fondazione ed elevazione, si è utilizzato il software di calcolo strutturale “FATA-E”. L’analisi numerica della struttura è stata condotta attraverso l’utilizzo del metodo degli elementi finiti ipotizzando un comportamento elastico-lineare. Il metodo degli elementi finiti consiste nel sostituire il modello continuo della struttura con un modello discreto equivalente e di approssimare la funzione di spostamento con polinomio algebrico, definito in regioni (dette appunto elementi finiti) che sono delle funzioni interpolanti il valore di spostamento definito in punti discreti (detti nodi). Il modello di calcolo può essere articolato sulla base dell’ipotesi di impalcato rigido, in funzione della reale presenza di solai continui atti ad irrigidire tutto l’impalcato. Tale ipotesi viene realizzata attraverso l’introduzione di adeguate relazioni cinematiche tra i gradi di libertà dei nodi costituenti l’impalcato stesso. Il metodo di calcolo adottato, le combinazioni di carico,

e le procedure di verifica saranno descritte nella “Relazione di calcolo” allegata, in cui sono presenti anche i risultati.

Si osservi per tanto che il dimensionamento della struttura è influenzato dalla resistenza caratteristica R_{ck} del calcestruzzo e non dal tipo (tradizionale o innovativo), come si può notare dai dati richiesti dallo stesso software di calcolo:

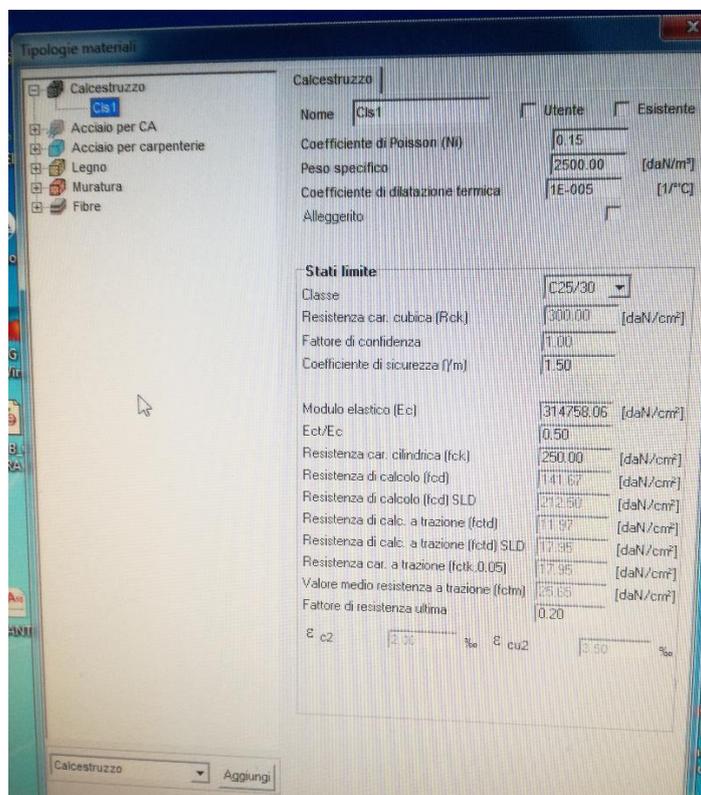


Figura 89: dati richiesti tipologia materiale software FATA-E

Quindi, a meno che il calcestruzzo non abbia minore peso specifico o diverso coefficiente di dilatazione termica e modulo elastico, i risultati dimensionali non subiscono variazioni.

Si riportano in allegato i seguenti documenti di progetto (in ordine):

- Relazione 1: Relazione tecnica;
- Tavola 1: Planimetria stato dei luoghi
Planimetria di progetto
Stralcio aerofotogrammetrico
Stralcio P.R.G.;
- Tavola 2: Piante
Prospetti
Sezioni;
- Relazione 2: Fascicolo calcoli – Villa A;
- Tavola 2.1 - Villa A: Pianta fondazioni
Tracciamento schemi armatura pareti in c.a.;

- Tavola 2.2 – Villa A: Armatura travi di fondazione
Abaco pilastri;
- Tavola 2.3 – Villa A: Pianta carpenteria 1°Impalcato;
- Tavola 2.4 – Villa A: Armatura travi 1°Impalcato;
- Tavola 2.5 – Villa A: Pianta carpenteria 2°Impalcato;
- Tavola 2.6 – Villa A: Armatura travi 2°Impalcato;
- Relazione 3: Diagramma di Gantt;
- Tavola 3: Prospetto calcoli;
Costi di costruzione.

2 Soluzioni tecnologiche progettuali

Dimostrato che i calcestruzzi “innovativi” non nascono per ottimizzare il dimensionamento strutturale e quindi ridurre il numero dei ferri di armatura e/o le dimensioni degli elementi che la compongono, quali travi e pilastri (in alcuni casi possono servire anche a questo), con tale caso applicativo si vuole sottolineare che la continua evoluzione tecnologica degli stessi mira alla risoluzione di problematiche specifiche quali:

- la posa in opera del materiale;
- la ridotta manutenzione nel ciclo di vita della struttura;
- l’aumento della resistenza della struttura stessa;
- l’aumento di durabilità rispetto alla vita utile del materiale e quindi della struttura;
- la sostenibilità dei materiali utilizzati al fine di ottimizzare quelli da riciclo e ridurre le emissioni di CO₂.

Così, si vuole far comprendere la validità di tali materiali, in modo da ridare “fiducia” a un materiale che per anni ha segnato la storia delle costruzioni civili e che ora per diverse cause rischia di essere surclassato da altri materiali quali ad esempio acciaio e legno.

D’altra parte in un periodo di crisi, in cui le imprese cercano di risparmiare proprio sul materiale, si vuole anche dimostrare che è importante analizzare l’intera fase di costruzione per arrivare a delle conclusioni attendibili.

Si parte ora descrivendo le soluzioni tecnologiche “innovative” pensate al fine di sostituire il calcestruzzo “tradizionale” (Figura 90).

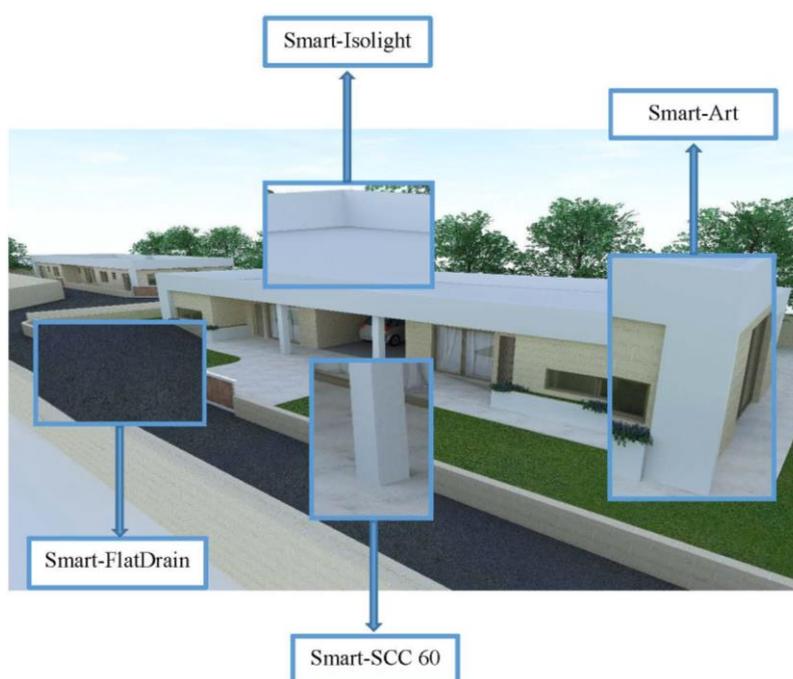


Figura 90: le diverse soluzioni tecnologiche “innovative”

2.1 Calcestruzzo autocompattante

Per la struttura di fondazione, si è pensato al calcestruzzo autocompattante **Smart-SCC 60** della Colabeton, in modo da ridurre i tempi e i costi di posa in opera e garantire maggiore durabilità alla struttura. Questo tipo di calcestruzzo può essere utilizzato con cassetteria tradizione per un massimo di 50 cm in altezza, con aggiunta di schiuma poliuretanic in modo da impedire la fuoriuscita dello stesso, data la sua elevata fluidità.

Schiuma per casseforme DA per pistola

DEBRUNNER ACIFER

Schiuma sigillante per casseri edili

- Resa della schiuma circa 48 l
- Ad alta espansione
- Indurimento rapido
- Buone applicazioni anche a basse temperature (+5 °C)

UNSPSC 112 31201606
eClass 10.0.1 22-17-10-07



Istruzioni per la messa in opera

Temperatura d'uso: da +5 °C a +35 °C

Temperatura minima dell'ambiente, della superficie e della bomboletta: +5 °C

Prima dell'uso lasciare per 24 ore ad una temperatura compresa tra +18 °C e +23 °C

Sicuro al tatto dopo 10/12 minuti, può essere tagliato dopo 30 minuti (a +23 °C)

Non aderisce su teflon, polietilene, silicone e olio

Il sottofondo deve essere sgrassato e privo di polvere. Prebagnare con acqua il sottofondo per consentire alla schiuma di indurire in modo ottimale ed evitare espansioni successive. Agitare energicamente la bomboletta prima dell'uso. Applicare la schiuma orientando la valvola verso il basso.

Pulire immediatamente le macchie di prodotto fresco con Sika Boom Cleaner. Il materiale indurito può essere asportato solo meccanicamente.

Osservare le avvertenze di sicurezza. Conservare la bomboletta esclusivamente in posizione verticale.



Figura 91: scheda tecnica della schiuma poliuretanic

La messa in opera del calcestruzzo avviene tramite pompaggio dello stesso direttamente nelle casseformi dapprima preparate, come si può vedere nella Figura 91:



Figura 92: preparazione casseforme con la schiuma poliuretanic (sinistra) e pompaggio calcestruzzo autocompattante (destra)

Si riporta la scheda tecnica:



DESCRIZIONE E APPLICAZIONI

I calcestruzzi autocompattanti (Self-Compacting Concrete: SCC) - denominati commercialmente con il termine **#smartSCC** - rispetto ai tradizionali impasti a consistenza fluida/superfluida (classe di consistenza S4/S5), non necessitano, dopo il getto all'interno delle casseforme, di alcuna vibrazione/compattazione in quanto capaci di espellere l'aria in eccesso presente nell'impasto. I calcestruzzi autocompattanti, pertanto, risultano particolarmente indicati per tutte quelle strutture ove - per la particolare geometria delle sezioni e/o per la presenza di rilevanti percentuali di armatura - la vibrazione del calcestruzzo risulta problematica o praticamente impossibile da realizzare per difficoltà di inserire i vibratori all'interno della massa del calcestruzzo. Questi conglomerati, tuttavia, possono essere utilizzati anche laddove, di fatto, la vibrazione manuale sarebbe possibile, ma il loro impiego consente di realizzare una forte economia nell'esecuzione dell'opera - soprattutto nelle strutture orizzontali di grande estensione superficiale come avviene nelle platee di fondazione - per la velocizzazione della messa in opera del conglomerato cementizio e, quindi, per la riduzione dei costi di manodopera.

Le materie prime utilizzate per la produzione dei calcestruzzi **#smartSCC** vengono sottoposte ad un rigido procedimento di controllo prima di essere utilizzate al fine di stabilirne la rispondenza alle normative di riferimento.

Per il confezionamento del calcestruzzo in oggetto vengono utilizzati cementi conformi alle normative vigenti UNI EN 197-1 e UNI EN 197-2.

Con lo scopo di ottenere conglomerati cementizi caratterizzati da eccellenti proprietà di flusso e di scorrevolezza attraverso le armature (passing ability), ma allo stesso tempo privi di segregazione e di bleeding sia durante la posa che a getto avvenuto, ma comunque in possesso dei requisiti meccanici e di durabilità previsti dal progetto, i calcestruzzi **#smartSCC** vengono confezionati con additivi riduttori di acqua ad alta efficacia (superfluidificanti) conformi ai prospetti 3.1 e 3.2 (oppure ai prospetti 11.1 e 11.2) della norma UNI EN 934-2. I calcestruzzi **#smartSCC**, inoltre, vengono confezionati con additivi modificatori della viscosità (Viscosity Modifying Admixtures: VMA) costituiti da speciali polimeri ad alto peso molecolare che contribuiscono ad un significativo incremento della coesione dell'impasto senza interferire negativamente sulle proprietà di flusso e di passing ability del conglomerato cementizio. L'impiego congiunto di superfluidificanti e di VMA consente di produrre calcestruzzi **#smartSCC** che sono in grado di fluire per diversi metri dal punto di introduzione nel cassero, senza segregare quando il conglomerato scorre attraverso gabbie di armature anche particolarmente congestionate.

Per il confezionamento dei calcestruzzi **#smartSCC** vengono utilizzati aggregati provvisti di marcatura CE in conformità alle norme UNI EN 12620 e UNI 8520-2, opportunamente selezionati per garantire le proprietà richieste per i calcestruzzi autocompattanti.

In particolare, i calcestruzzi **#smartSCC** vengono confezionati ricorrendo all'impiego di aggregati selezionati di pezzatura massima non superiore a 16 mm, onde contenere la frazione in volume dell'aggregato grosso che costituisce la "fase trasportata" per garantire le proprietà di flusso richieste per i calcestruzzi autocompattanti. Inoltre, sempre nell'ottica di confezionare impasti con eccellenti capacità di fluire anche su lunghe distanze senza segregare, i calcestruzzi **#smartSCC** vengono prodotti ricorrendo all'impiego di filler carbonatici il cui dosaggio viene calcolato con le più avanzate tecniche di mix-design, con l'intento di ottenere un sufficiente volume di particelle di diametro inferiore a 0,125 mm in grado di poter "trasportare" durante il getto gli aggregati di maggiori dimensioni e quelli "grossi" (diametro maggiore di 4 mm), in particolare. Il conseguimento di un volume sufficiente di particelle finissime può avvenire anche tramite il ricorso congiunto di filler calcarei e aggiunte ad attività pozzolanica a base di ceneri volanti, che, grazie anche alla ridotta dimensione delle particelle - all'incirca uguale a quella media dei granuli di cemento - contribuiscono ulteriormente a migliorare le proprietà di flusso e di resistenza alla segregazione dei calcestruzzi **#smartSCC**.

#smartSCC sono calcestruzzi in grado di fluire nelle casseforme sotto l'azione del solo peso proprio e di riempire completamente le casseforme anche in presenza di sezioni particolarmente congestionate dalla presenza di elevate percentuali di armatura.

#smartSCC è il risultato di una attenta progettazione della miscela basata su tecniche di mix-design di ultima generazione ad alto contenuto tecnologico, su un'accurata selezione delle materie prime e sulla massimizzazione delle proprietà di flusso e di resistenza alla segregazione del calcestruzzo conseguita mediante una strategia congiunta che ha come obiettivo la limitazione della dimensione massima dell'aggregato, la riduzione della frazione di aggregato grosso e l'aumento delle frazioni di materiale finissimo. Questa strategia è concretizzata, inoltre, attraverso l'impiego di additivi riduttori di acqua, agenti modificati della viscosità costituiti da polimeri ad alto peso molecolare, filler micronici e aggiunte ad attività pozzolanica.

#smartSCC sono particolarmente indicati per quelle strutture che per geometria e/o per la presenza di elevate percentuali di armatura la posa in opera dei tradizionali conglomerati risulta poco agevole e la compattazione del calcestruzzo inattuabile per la pratica impossibilità di inserire il vibratore ad ago nella massa di calcestruzzo. L'impiego dei calcestruzzi **#smartSCC**, permette di velocizzare le operazioni di posa, realizzando delle sostanziali economie nella costruzione dei manufatti legati alla riduzione sia della manodopera che dei tempi di costruzione.

#smartSCC grazie alla elevata deformabilità (capacità di scorrimento in assenza di ostacoli), alle proprietà di passing ability e alla eccellente resistenza alla segregazione, permette di realizzare strutture caratterizzate da una qualità del calcestruzzo in opera

1



DIREZIONE GENERALE
via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
stc@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

ottobre 2016



CERTIFICAZIONE
COLABETON
UNI EN ISO 9001



CERTIFICAZIONE DEL
PRODOTTO FINITO
UNI EN 12620



SMART

2.2 Calcestruzzo leggero strutturale

Per i solai strutturali si è pensato al calcestruzzo leggero strutturale **Smart-Isolight** per isolamento termico e acustico, in modo da garantire la resistenza strutturale e ridurre i materiali utilizzati per isolare l'edificio con il metodo del "cappotto", i tempi di posa e i costi relativi.

Si riporta la scheda tecnica:



DESCRIZIONE E APPLICAZIONI

I calcestruzzi leggeri **strutturali** - appartenenti alla famiglia dei prodotti **#smartisolight** - sono confezionati mediante l'impiego di aggregati - naturali o artificiali - caratterizzati da una minore massa volumica rispetto alle tradizionali sabbie e inerti grossi utilizzati per la produzione del calcestruzzo ordinario. I calcestruzzi, conseguentemente, posseggono - rispetto ai tradizionali conglomerati cementizi - una minore massa volumica sia allo stato fresco che dopo l'indurimento. Pertanto, i calcestruzzi leggeri **#smartisolight** - rispetto ai tradizionali conglomerati - sono caratterizzati, a dipendenza del tipo e del dosaggio di aggregato leggero che viene utilizzato, da una eccellente resistenza termica (maggiore potere di isolamento termico), da migliori proprietà di assorbimento acustico e da una maggiore resistenza al fuoco. Inoltre, la minore massa volumica tipica dei calcestruzzi **#smartisolight**, grazie proprio alla diminuzione delle masse degli elementi sia strutturali che accessori realizzati con questi conglomerati, presenta inevitabili vantaggi in zona sismica per la riduzione delle forze orizzontali che gravano sugli elementi portanti verticali (setti, pilastri e nuclei).

I calcestruzzi leggeri **strutturali** sono particolarmente indicati per la realizzazione di elementi strutturali portanti in c.a. (ad esempio, solai e impalcati, solette di irrigidimento di solai in legno negli interventi di adeguamento in zona sismica o cappe per il consolidamento di strutture voltate negli edifici esistenti) di prestazioni meccaniche simili a quelle dei tradizionali conglomerati cementizi;

I calcestruzzi leggeri **#smartisolight strutturali** includono:

1. IsoClayS (Strutturali:S)

Il calcestruzzo **isoClayS** è confezionato con argilla espansa strutturale, un aggregato leggero artificiale ottenuto da uno speciale processo di cottura ad elevate temperature, che consente di ottenere dei granuli tondeggianti che associano alla struttura porosa del nucleo una "corteccia" esterna che per effetto della clinkerizzazione raggiunta nel forno si presenta compatta, di bassa porosità, con una eccellente resistenza meccanica e alla frantumazione. Queste proprietà dell'argilla espansa così ottenuta - definita anche strutturale - consente di confezionare calcestruzzi che posseggono masse volumiche nell'intervallo 1600-2000 kg/m³ che, sebbene inferiori rispetto ai conglomerati tradizionali, sono in grado di conseguire prestazioni meccaniche a compressione simili a quella dei calcestruzzi ordinari e, pertanto, utilizzabili nella realizzazione di elementi strutturali in c.a. e c.a.p.

2. IsoPumixS (Strutturali:S)

Il calcestruzzo **isoPumixS** è confezionato con pomice strutturale, un aggregato leggero naturale in cui la struttura porosa è il risultato dell'intrappolamento dei gas nel materiale magmatico effusivo. La pomice strutturale consente di confezionare calcestruzzi che posseggono masse volumiche nell'intervallo 1600-2000 kg/m³ che, sebbene inferiori rispetto ai conglomerati tradizionali, sono in grado di conseguire prestazioni meccaniche a compressione simili a quella dei calcestruzzi tradizionali e, pertanto utilizzabili nella

realizzazione di elementi strutturali in c.a. e c.a.p.

Le materie prime utilizzate per la produzione dei calcestruzzi **#smartisolight** vengono sottoposte ad un rigido procedimento di controllo prima di essere utilizzate al fine di stabilirne la rispondenza alle normative di riferimento.

Per il confezionamento del calcestruzzo in oggetto saranno utilizzati cementi conformi alle normative vigenti UNI EN 197-1 e UNI EN 197-2.

Con lo scopo di ottenere conglomerati cementizi leggeri con eccellenti proprietà di isolamento termico e acustico, con eccellenti resistenze al fuoco e di elevate prestazioni in termini di resistenze meccaniche e durabilità, i calcestruzzi **#smartisolight strutturali** vengono confezionati utilizzando additivi conformi alla UNI EN 934-2 con azioni principali diverse a seconda delle caratteristiche che si intende conseguire. In particolare, i calcestruzzi **#smartisolight strutturali** vengono confezionati con additivi riduttori di acqua ad alta efficacia (superfluidificanti) conformi ai prospetti 3.1.e 3.2 (oppure ai prospetti 11.1 e 11.2) della norma UNI EN 934-2, con lo scopo di conseguire la lavorabilità prefissata mediante il ricorso a modesti dosaggi di acqua di impatto.

L'impiego di questi additivi si rende necessario nei calcestruzzi **#smartisolight** per ridurre al minimo i fenomeni di segregazione e di essudazione di acqua di bleeding contribuendo ad un generale miglioramento della qualità della matrice cementizia finalizzate alla massimizzazione delle proprietà di isolamento termico-acustico, di resistenza al fuoco e di resistenza meccanica a compressione. L'impiego di questi additivi, attraverso la diminuzione dell'acqua di impatto a pari lavorabilità, ha anche lo scopo di ridurre il fenomeno del ritiro idraulico al fine di evitare la comparsa di dannosi quadri fessurativi.

Per il confezionamento dei calcestruzzi **#smartisolight strutturali** vengono utilizzati:

- aggregati di massa volumica ordinaria provvisti di marcatura CE in conformità alle norme UNI EN 12620 e UNI 8520-2, opportunamente selezionati al fine di garantire il raggiungimento delle prestazioni reologiche e meccaniche;
- aggregati leggeri sia naturali, che artificiali che di riciclo, di prestazioni conformi alla UNI EN 13055-1 selezionati in relazione alle specifiche prestazioni da conseguire a dipendenza del calcestruzzo leggero (strutturale e non) da produrre.

Il corretto rapporto, in termini di percentuale in volume, tra aggregati di massa volumica ordinaria e aggregati leggeri viene calcolato con tecniche di mix design che tengono conto della massa volumica prefissata per il conglomerato da produrre. Il calcolo delle percentuali di impiego degli aggregati leggeri tiene conto anche del fatto che per uno stesso aggregato la massa volumica varia in relazione alle diverse frazioni granulometriche. Infine, i calcestruzzi **#smartisolight** associano, in casi particolari, l'impiego di aggiunte ad attività pozzolanica e di filler calcarei.

COLABETON
DIREZIONE GENERALE
via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
stc@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

ottobre 2016
CERTIFICAZIONE
EN ISO 9001
UNI EN ISO 9001

CERTIFICAZIONE DEL
PROCESSO PRODOTTO
EN 14001:2015

SMART



#smartisolight

Calcestruzzi fluidi e leggeri
STRUTTURALI ideali
per l'isolamento termico e acustico



DATI TECNICI

I dati tecnici di riferimento vengono modulati in relazione alle particolari richieste formulate dal progettista/direzione lavori e/o dall'impresa esecutrice.

a) calcestruzzi leggeri strutturali isoClayS

Classificazione prodotto	Classe di M.V.	Intervallo di massa volumica (Kg/m ³)	Resistenza meccanica a compressione minima, R _{ck} (MPa)	Modulo elastico, E (MPa)	Resistenza a trazione diretta, f _{ctm} (MPa)	Coefficiente di dilatazione termica, λ (°C ⁻¹)	Coefficiente di conducibilità termica, λ _{cl} (W/mK)
isoClayS	D1,8	>1600 e ≤1800	22	≈ 18000	≈ 1,9	8*10 ⁻⁶	0,5 + 0,85
			28	≈ 19000	≈ 2,2		
			33	≈ 20000	≈ 2,5		
isoClayS	D2,0	>1800 e ≤2000	38	≈ 25000	≈ 2,6		0,85 + 1,1

a) calcestruzzi leggeri strutturali isoPumixS

Classificazione prodotto	Classe di M.V.	Intervallo di massa volumica (Kg/m ³)	Resistenza meccanica a compressione minima, R _{ck} (MPa)	Modulo elastico, E (MPa)	Resistenza a trazione diretta, f _{ctm} (MPa)	Coefficiente di dilatazione termica, λ (°C ⁻¹)	Coefficiente di conducibilità termica, λ _{cl} (W/mK)
isoPumixS	D1,8	>1600 e ≤1800	22	≈ 18000	≈ 1,9	8*10 ⁻⁶	0,5 + 0,85
			28	≈ 19000	≈ 2,2		
			33	≈ 20000	≈ 2,5		
isoPumixS	D2,0	>1800 e ≤2000	38	≈ 25000	≈ 2,6		0,85 + 1,1

Rif. Normativi:

D.M. 14 Gennaio 2008, Circolare 2 Febbraio 2009 n. 617, UNI EN 206-1: 2006, UNI 1104 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale

VOCE DI CAPITOLATO

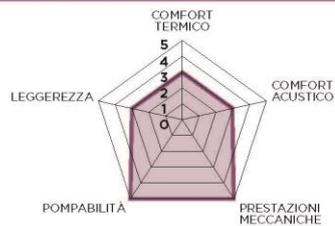
Calcestruzzi fluidi, leggeri e strutturali ideali per l'isolamento termico e acustico (tipo: isoClayS o isoPumixS: Colabeton Spa):

- Tipologia di prodotto ...
- Tipo di aggregato leggero;
- Classe di massa volumica del calcestruzzo M.V. ...
- Resistenza meccanica a compressione minima, R_{ck} ... (MPa)
- Classe di esposizione ambientale ...
- Classe di consistenza S ...
- Classe di contenuto di cloruri ...
- D_{max} aggregato ... (mm)
- Tipologia cemento ...
- Conformità alla UNI EN 206 e/o UNI 1104 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale

Il Servizio Tecnologico Colabeton basa la sua professionalità sulla ricerca e sull'esperienza di cantiere e pone la conoscenza acquisita nel settore a disposizione di progettisti e di imprese per lo studio di particolari mix design. Le nostre esperienze sono da ritenersi indicative e dovranno essere verificate da prove pratiche per verificare l'adeguatezza del prodotto all'impiego previsto.

3

isoClayS - isoPumixS



COLABETON

DIREZIONE GENERALE
via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
stc@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

ottobre 2016



2.3 Calcestruzzo fluido per facciavista

Il progetto prevede sul facciavista una larga fascia e pilastri in calcestruzzo armato, per tanto si è pensato a un calcestruzzo fluido per facciavista **Smart-Art**, il quale oltre a garantire la resistenza strutturale, permette di eliminare l'utilizzo di materiali di rifinitura in quanto esso stesso ha un *finish* colorato. Inoltre, permette anche di ridurre quei fenomeni di fotocatalisi e quindi ridurre il degrado del materiale nel tempo a causa dell'attacco degli agenti atmosferici, in modo da ridurre anche i costi di manutenzione. Si riporta la scheda tecnica:



DESCRIZIONE E APPLICAZIONI

I calcestruzzi - denominati commercialmente con il termine **#smartArt** - sono specificatamente progettati per la realizzazione di elementi in calcestruzzo armato facciavista ove la qualità estetica del manufatto rappresenta - insieme ai requisiti strutturali - un parametro progettuale e architettonico di rilevante importanza.

Appartengono al segmento **#smartArt** i calcestruzzi **artGrey**, **artColor**, **artIvory** e **artWhite** caratterizzati tutti da un' eccellente estetica sia dal punto di vista materico, tessiturale che di colore e, sebbene con specificità diverse - che verranno elencate in dettaglio nel presente documento - indicati per la realizzazione di strutture in calcestruzzo facciavista sia di colore grigio-cemento, che bianche che colorate.

Le materie prime utilizzate per la produzione dei calcestruzzi **#smartArt** vengono sottoposte ad un rigido procedimento di controllo prima di essere utilizzate al fine di stabilirne la rispondenza alle normative di riferimento.

Per il confezionamento dei calcestruzzi in oggetto vengono utilizzati:

- cementi comuni conformi alle normative vigenti UNI EN 197-1 e UNI EN 197-2 per la produzione dei conglomerati denominati **artGrey** e per quelli **artColor** con colorazioni scure;
- cementi speciali bianchi conformi alle normative vigenti UNI EN 197-1 e UNI EN 197-2 per la produzione dei calcestruzzi denominati **artIvory** e **artWhite**.

I calcestruzzi **#smartArt** vengono confezionati con additivi riduttori di acqua ad alta efficacia (superfluidificanti) conformi ai prospetti 3.1 e 3.2 (oppure ai prospetti 11.1 e 11.2) della norma UNI EN 934-2, con lo scopo di conseguire sia le prestazioni meccaniche, di durabilità ed estetiche desiderate che la lavorabilità prefissata. L'impiego di questi additivi, inoltre, consente di ridurre al minimo i fenomeni di segregazione e di essudazione di acqua di bleeding requisiti essenziali per poter ottenere un eccellente facciavista, prevenendo la formazione di antiestetiche macchie sulla superficie dei manufatti tipiche di calcestruzzi confezionati senza questa additivi.

Inoltre, i calcestruzzi **artColor** vengono confezionati con speciali pigmenti colorati conformi ai requisiti richiesti dalla norma UNI EN 12878 che consentono - unitamente alla scelta del tipo di cemento (grigio o bianco) e alle sabbie - di conferire alle superfici in calcestruzzo la colorazione desiderata. I pigmenti utilizzati per la produzione dei calcestruzzi **artColor**, in particolare, sono contraddistinti da una elevata stabilità nell'ambiente alcalino della matrice cementizia, da una trascurabile presenza di sali solubili al fine di eliminare sulle superfici facciavista la comparsa di antiestetiche efflorescenze e da un'eccellente resistenza alla luce (raggi ultravioletti) e agli agenti atmosferici che consentono di ottenere superfici colorate stabili nel tempo con ridotti fenomeni di opacizzazione del colore iniziale.

Per il confezionamento dei calcestruzzi **#smartArt** vengono utilizzati aggregati provvisti di marcatura CE in conformità alle norme UNI EN

12620 e UNI 8520-2, opportunamente selezionati al fine di garantire il raggiungimento delle resistenze meccaniche a compressione e i requisiti materici, di tessitura e di colore tipici delle superfici realizzate con i calcestruzzi **#smartArt**. In particolare, oltre ai requisiti richiesti per i tradizionali conglomerati, gli aggregati destinati alla produzione dei calcestruzzi denominati **artIvory** e **artColor** con tonalità pastello chiare, sono costituiti da calcri (pressochè puri) di colorazione bianca che - insieme al cemento bianco e agli eventuali pigmenti pastello - consentono di ottenere superfici facciavista del colore desiderato.

Oltre ai requisiti di colore, gli aggregati destinati al confezionamento dei calcestruzzi **#smartArt** sono sottoposti a stringenti controlli anche dal punto di vista granulometrico con l'intento di garantire una percentuale di materiale fine (passante allo staccio di 0,125 mm) maggiore rispetto ai tradizionali calcestruzzi destinati a strutture non facciavista.

L'aumento del tenore di fine nella matrice permette di aumentare la coesione del calcestruzzo e la sua resistenza alla segregazione e al bleeding che rappresentano i requisiti basilari per poter ambire all'ottenimento di strutture con un eccellente facciavista prive di macchie e di striature tipiche di conglomerati mal progettati e caratterizzati da una ridotta percentuale di materiale finissimo.

#smartArt sono confezionati con additivi riduttori di acqua ad alta efficacia al fine di minimizzare il contenuto di acqua di impasto - senza ovviamente pregiudicare la fluidità del conglomerato cementizio - onde aumentare la resistenza alla segregazione e al bleeding, la coesione del calcestruzzo consentendo di ottenere superfici facciavista di eccellente qualità per la mancanza di macchie e striature. La resistenza alla segregazione dei calcestruzzi **#smartArt**, inoltre, viene ulteriormente incrementata da un'attenta progettazione (mix-design) finalizzata ad incrementare il tenore delle particelle finissime (di diametro inferiore a 0,125 mm) non inferiore a 400 kg/m³.

#smartArt consente di realizzare strutture in calcestruzzo facciavista di qualsiasi colore soddisfacendo in questo modo tutte le esigenze espresse dal progetto architettonico e artistico.

In particolare:

- per strutture facciavista della colorazione grigia tipica del cemento si farà ricorso ai calcestruzzi **artGrey**;
- per strutture facciavista di colorazione avorio si farà ricorso ai calcestruzzi **artIvory** confezionati con cemento bianco;
- per strutture facciavista di colore bianco si farà ricorso ai calcestruzzi **artWhite** confezionati con cemento bianco e aggregati calcarei puri di colore bianco;
- per strutture facciavista colorate si farà ricorso ai calcestruzzi **artColor** confezionati - a seconda del colore desiderato - con cemento bianco o grigio e con pigmenti colorati che possiedono elevata stabilità in ambiente alcalino e particolarmente resistenti all'invecchiamento determinato dai raggi ultravioletti e dagli agenti atmosferici.

COLABETON

DIREZIONE GENERALE
via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
stc@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

ottobre 2016





#smartArt

Calcestruzzi strutturali colorati per superfici facciavista



#smartArt sono disponibili in diverse classi di consistenza in accordo alla UNI EN 206-1 e, pertanto, sono adatti per la realizzazione di elementi strutturali di qualsiasi geometria anche in presenza di sezioni particolarmente congestionate di armatura. Facile da mettere in opera, **#smartArt** può essere pompato. Resta inteso che l'ottenimento di un'eccellente struttura facciavista è strettamente dipendente non solo dalla qualità del calcestruzzo, ma anche dal tipo e dalla pulizia del cassero, dalla natura del disarmante e dalle modalità di applicazione dello stesso sulle casseforme, dalle modalità di getto e di vibrazione del calcestruzzo, dall'assenza di interruzioni durante la posa del conglomerato, oltre che dalle condizioni climatiche esistenti al momento del getto.

Pertanto, quando la qualità estetica del manufatto assume un'importanza rilevante nell'ambito del progetto, è necessario che tutti i soggetti coinvolti (progettista, impresa e direzione lavori) pongano estrema cura nell'esame di questi fattori essenziali per poter conseguire un risultato eccellente. In situazioni particolari, potrà essere necessario, prima di procedere alla realizzazione delle strutture, effettuare dei getti pilota per realizzare dei manufatti campione (mock-up) che consentano di valutare preliminarmente la qualità estetica delle superfici.

#smartArt è durabile in conformità alla UNI EN 206-1 e UNI 11104 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale.

DESTINAZIONI D'USO

a) artGrey

- Strutture in calcestruzzo facciavista di particolare rilevanza dal punto di vista architettonico e artistico di colore grigio

b) artivory

- Strutture in calcestruzzo facciavista di particolare rilevanza dal punto di vista architettonico e artistico di colore avorio
- Strutture civili ed industriali inseriti in contesti paesaggistici

c) artWhite

- Strutture in calcestruzzo facciavista di particolare rilevanza dal punto di vista architettonico e artistico di colore bianco
- Strutture civili ed industriali inseriti in contesti paesaggistici

d) artColor

- Strutture in calcestruzzo facciavista di particolare rilevanza dal punto di vista architettonico e artistico colorate
- Strutture civili ed industriali inseriti in contesti paesaggistici
- Strutture situate in aree pubbliche da differenziare per colore in relazione alla destinazione d'uso (piste ciclabili, camminamenti pedonali, ecc.)

DATI TECNICI

I dati tecnici di riferimento vengono modulati in relazione alle particolari richieste formulate dal progettista/direzione lavori e/o dall'impresa esecutrice.

Intervallo di Resistenza caratteristica a compressione (R_{ck}) (MPa)	Classi di consistenza "S"	Diametro massimo dell'aggregato (mm)
30 + 45	S4 + S5	15 - 25

RI. Normativi:

D.M. 14 Gennaio 2008, Circolare 2 Febbraio 2009 n. 617, UNI EN 206-1, UNI 11104 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale

VANTAGGI

- Qualità e costanza del prodotto garanzia di colorazione omogenea durante la fornitura in cantiere
- Estesa gamma cromatica
- Eccellente resistenza delle superfici colorate all'azione dei raggi ultravioletti e degli agenti atmosferici
- Facilità di posa in opera e pratica assenza di segregazione e bleeding garanzia di assenza di macchie sulle superfici facciavista

VOCE DI CAPITOLATO

Calcestruzzi strutturali colorati per superfici facciavista (tipo famiglia **#smartArt: Colabeton Spa**):

- Tipologia di prodotto ...
- Resistenza caratteristica a compressione cubica R_{ck} pari a ... (MPa)
- Classe di esposizione ambientale ...
- Colorazione ...
- Classe di consistenza S ...
- Classe di contenuto di cloruri ...
- D_{max} aggregato ... (mm)
- Tipologia cemento ...
- Tipologia di aggregato ...
- Conformità alla UNI EN 206, UNI 11104 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale

2



DIREZIONE GENERALE
via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
stc@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

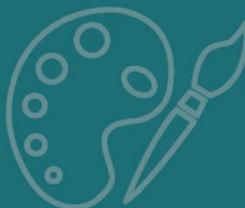
ottobre 2016



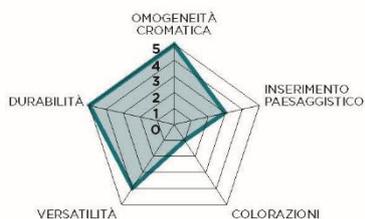


#smartArt

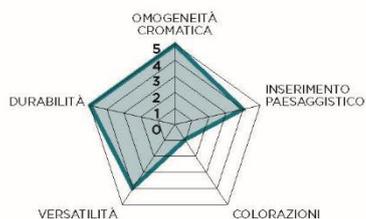
Calcestruzzi strutturali colorati per superfici facciavista



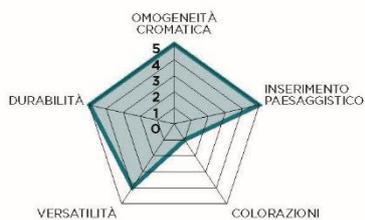
artGrey



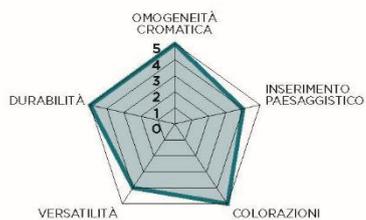
artIvory



artWhite



artColor



Il Servizio Tecnologico Colabeton basa la sua professionalità sulla ricerca e sull'esperienza di cantiere e pone la conoscenza acquisita nel settore a disposizione di progettisti e di imprese per lo studio di particolari max design. Le nostre esperienze sono da ritenersi indicative e dovranno essere verificate da prove pratiche per verificare l'idoneità del prodotto all'impiego previsto.

3

COLABETON

DIREZIONE GENERALE
via della Vittoria, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
sto@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

ottobre 2016



2.4 Calcestruzzo drenante

Per gli esterni, anziché utilizzare semplice asfalto per la viabilità esterna e nelle zone pedonali, si è pensato al calcestruzzo drenante, il quale garantisce la resistenza al passaggio veicolare e, appunto, drena il passaggio dell'acqua al di sotto dello stesso in modo da evitare anche i problemi di acqua stagnante. Inoltre il suo particolare sistema permette di eliminare la presenza di impianto idraulico o di raccolta di acqua piovana, come tubazioni e tombini. Si riporta la scheda tecnica:



DESCRIZIONE E APPLICAZIONI

I calcestruzzi drenanti - denominati commercialmente con il termine **flatDrain** - con superfici neutre (color grigio-cemento) o colorate (**flatDrainC**), sono caratterizzati da una elevata porosità che consente di smaltire le acque piovane in misura pari a circa 350l/(m²/min), particolarmente indicato per la realizzazione di marciapiedi, percorsi pedonali e ciclabili, piazze, parcheggi e aree di movimentazione delle merci. Le eccellenti capacità drenanti di **flatDrain** - ottenute grazie ad una speciale formulazione del calcestruzzo sviluppata presso i laboratori tecnologici della Colabeton - consentono di evitare la formazione di pozze di acqua sulle superfici pedonali e carrabili e di fenomeni di acquaplaning con inevitabili ricadute positive per la sicurezza delle persone, anche in occasione di eccezionali piogge di tipo torrenziali che sempre più caratterizzano il nostro territorio. I calcestruzzi **flatDrain**, inoltre, consentono un'efficace raccolta delle acque piovane - senza dover far ricorso alle tradizionali tubazioni, pozzetti, ecc. - disponendo questi sistemi in canalette e vasche esterne all'area pedonale o carrabile favorendo, in questo modo, processi di riutilizzo delle acque che, ad esempio, possono essere utilizzate per innaffiare aree verdi adiacenti o limitrofe alle superfici realizzate con **flatDrain**. I calcestruzzi **flatDrain** sono disponibili anche nella versione colorata **flatDrainC** e, pertanto, specificatamente indicati per pavimentazioni di piazze, di percorsi pedonali, piste ciclabili o aree carrabili sia nei centri urbani che nei parchi pubblici o in zone verdi, allorché si vuole che l'opera si inserisca nel particolare contesto ambientale, sociale e architettonico.

Le materie prime utilizzate per la produzione dei calcestruzzi **flatDrain** vengono sottoposte ad un rigido procedimento di controllo prima di essere utilizzate al fine di stabilirne la rispondenza alle normative di riferimento.

Per il confezionamento del calcestruzzo in oggetto vengono utilizzati cementi conformi alle normative vigenti UNI EN 197-1 e UNI EN 197-2. In particolare, per le pavimentazioni drenanti colorate, i calcestruzzi **flatDrainC** vengono confezionati in combinazione con ossidi colorati (conformi alla UNI EN 12878) che consentono - oltre alla versione neutra grigio-cemento (**flatDrain**) - di offrire una ampia gamma di soluzioni cromatiche.

Con lo scopo di ottenere eccellenti capacità drenanti (per le pavimentazioni drenanti colorate realizzate con **flatDrainC** anche con eccezionali qualità materiche e tessiture), i calcestruzzi **flatDrain** vengono confezionati utilizzando additivi conformi alla UNI EN 934-2 con azioni principali diverse a seconda delle caratteristiche che si intende conseguire. In particolare, i calcestruzzi **flatDrain** vengono confezionati con additivi riduttori di acqua ad alta efficacia (superfluidificanti) conformi ai prospetti 3.1 e 3.2 (oppure ai prospetti 11.1 e 11.2) della norma UNI EN 934-2, con lo scopo di conseguire le capacità drenanti, le prestazioni meccaniche e di durabilità desiderate che la lavorabilità prefissata. L'impiego di questi additivi si rende necessario nei calcestruzzi **flatDrain** per ridurre il dosaggio dell'acqua di impasto al fine di ottenere una pasta legante di sufficiente viscosità da avvolgere completamente i granuli grossi dell'aggregato lapideo, ottenendo nel contempo un sistema di macropori che esalti le capacità drenanti del materiale. Questo obiettivo si consegue anche grazie al ricorso a sofisticati metodi di mix-design finalizzati a ridurre al minimo il volume di pasta legante per garantire il sistema poroso e, quindi, la capacità drenante prefissata. L'utilizzo di additivi riduttori di acqua, ma anche modificatori della viscosità, inoltre, consente di ridurre al minimo i fenomeni di eccessiva fluidità della pasta legante evitando che la stessa si accumuli sul fondo della pavimentazione limitando le capacità drenanti della pavimentazione. La minimizzazione del volume di pasta legante consente, inoltre, di ridurre drasticamente il ritiro idraulico del calcestruzzo onde prevenire - unitamente ad

un'accurata progettazione e realizzazione dei giunti che, peraltro possono essere ridotti in numero e estensione rispetto alle tradizionali pavimentazioni - la formazione di quadri fessurativi che risulterebbero pregiudizievoli sia per l'estetica che per la funzionalità del pavimento.

Per il confezionamento dei calcestruzzi **flatDrain** vengono utilizzati aggregati provvisti di marcatura CE in conformità alle norme UNI EN 12620 e UNI 8520-2, opportunamente selezionati - in particolare modo dal punto di vista granulometrico - al fine di garantire la capacità drenante e la resistenza meccanica a compressione prefissata in relazione allo specifico progetto. In particolare, i calcestruzzi **flatDrain** vengono confezionati facendo ricorso:

- ai soli aggregati grossi in forma di pietrisco 5/10 o 8/15;
- oppure all'impiego combinato di una sabbia 0/4 e uno degli aggregati grossi di cui al punto precedente.

La scelta di utilizzare un solo aggregato grosso oppure di ricorrere all'utilizzo anche della sabbia e il dosaggio degli stessi viene effettuata in relazione agli obiettivi che si intendono conseguire. In particolare, per le pavimentazioni ove è necessario aumentare le capacità drenanti si fa ricorso ad una combinazione granulometrica che privilegia il volume dell'aggregato grosso a scapito della sabbia. Per contro, ove sono richieste minori capacità drenanti a fronte di una maggiore prestazione meccanica di **flatDrain**, la percentuale in volume dell'aggregato grosso diminuisce a favore delle sabbie.

flatDrain è un calcestruzzo drenante a consistenza S1 - terra umida - con abbassamenti al cono di Abrams, inferiori a 20 mm, specificatamente progettato con una pasta legante di sufficiente viscosità da avvolgere completamente i granuli grossi dell'aggregato lapideo, ottenendo nel contempo un sistema di macropori che esalti le capacità drenanti del materiale.

flatDrain è disponibile in diverse versioni con capacità drenanti crescenti da 100 a circa 350 l/m²/min e con resistenze meccaniche a compressione caratteristiche (R_{ck}) comprese nell'intervallo 15-20 MPa che permettono di soddisfare un ampio spettro di esigenze che si dovessero presentare in relazione allo specifico progetto che si deve realizzare. Le capacità drenanti e di resistenza a compressione sono correlate alla densità del conglomerato in situ che può oscillare tra 1600 kg/m³ e 2000 kg/m³. Risulta chiaro che all'aumentare della densità in situ, si otterrà un incremento delle resistenze a compressione, ma una diminuzione delle caratteristiche drenanti del materiale. Resta inteso che la scelta della classe di resistenza del calcestruzzo e il calcolo dello spessore del pavimento dovrà avvenire in base sia ai requisiti di drenaggio richiesti, ma anche in base ad un calcolo strutturale che, oltre ai carichi in gioco, tenga conto anche delle caratteristiche del sottofondo sul quale **flatDrain** viene applicato. Infine, si segnala che, dipendendo le prestazioni del materiale dalla densità in situ, acquistano rilevanza le procedure di posa e di compattazione di **flatDrain** di cui si dirà nel seguito.

flatDrain, presenta anche un'eccellente resistenza ai cicli di gelo-disgelo. Il veloce deflusso di acqua, infatti, impedisce che si vengano a creare condizioni di saturazione delle macroporosità - tipiche di **flatDrain** - impedendo, di fatto, l'insorgere di stati tensionali pericolosi per la pavimentazione. Resta inteso che l'impiego di **flatDrain** deve essere affiancato da un'accurata progettazione delle pendenze dello strato di sottofondo per beneficiare al massimo delle caratteristiche drenanti di **flatDrain** e per minimizzare i rischi di degrado della pavimentazione.

flatDrain è un calcestruzzo a consistenza di terra umida che può essere messo in opera con grande facilità mediante laser screed, vibrofinitrice stradale oppure manualmente e compattato con l'ausilio di staggie o piastre vibranti.

Resta inteso che la realizzazione di un'efficiente pavimentazione drenante in calcestruzzo priva di difetti in forma di fessurazioni e/o imbarcamenti, durevole nel tempo e che non necessiti di interventi di manutenzione straordinaria non può prescindere da una corretta progettazione dello spessore della piastra effettuata in base ai criteri della scienza delle costruzioni che tengano conto dei carichi in gioco e delle caratteristiche del sottofondo. Inoltre, la prevenzione del rischio fessurativo si ottiene con una corretta progettazione ed esecuzione dei giunti. Si segnala, in particolare, di rispettare le seguenti indicazioni:

- realizzare un sottofondo di sufficiente portanza, in relazione ai carichi in gioco, e di pendenza adeguata allo smaltimento delle acque. A questo scopo si potrà, ad esempio, ricorrere all'utilizzo di **flatMixed** (misto cementato per la realizzazione di sottofondi) che dopo la stesa deve essere opportunamente compattato
- **flatDrain** può essere utilizzato per pavimentazioni di spessore minimo mai inferiore a 7 cm.
- le caratteristiche di portanza e di capacità drenante del pavimento sono strettamente dipendenti sia dal tipo di calcestruzzo **flatDrain** utilizzato, che dalla modalità di posa in opera e di compattazione del conglomerato cementizio. Pertanto, è strettamente necessario che queste operazioni vengano effettuate da personale specializzato nella realizzazione di pavimenti con conglomerati a consistenza di terra umida (o di materiali con caratteristiche reologiche similari quali i conglomerati bituminosi).

I calcestruzzi **flatDrain** forniti da Colabeton vengono testati in relazione alla capacità drenante in accordo alla norma UNI EN 12697/40.

flatDrain è durabile in conformità alla UNI EN 206-1 e UNI 11104 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale.

flatDrain può essere prodotto anche nella corrispondente versione **brightDrain** un conglomerato cementizio DRENANTE FOTOLUMINESCENTE.

La fosforescenza, detta anche fotoluminescenza, è quel fenomeno di emissione di luce che possiedono alcuni materiali quando questi vengono attivati da una radiazione di grande energia (luce solare). L'energia assorbita nelle ore diurne, infatti, viene riemessa nelle ore notturne a lunghezza d'onda maggiore, nella banda dello spettro visibile.

L'emissione di luce avviene lentamente in un lasso di tempo che può raggiungere le 6 ore dopo la fine dell'eccitazione. L'elevata porosità, che consente di smaltire le acque piovane in misura variabile compresa tra 100 e 350 l/(m²·min) e la particolare peculiarità legata alla fotoluminescenza, rende questi calcestruzzi particolarmente indicati per la realizzazione di marciapiedi, sentieri pedonali e ciclabili luminosi, piazze, parcheggi e aree di movimentazione delle merci **anche in zone di scarsa illuminazione**.

Il fenomeno della fotoluminescenza rende **brightDrain** una fonte di energia pulita, rinnovabile ed innocua per gli esseri umani e per l'ambiente circostante ed inoltre rappresenta una soluzione green nella lotta all'inquinamento, al recupero e allo smaltimento delle acque piovane.

La componente luminescente può essere fornita in diverse colorazioni (giallo, blu, rosso, ecc).

DESTINAZIONI D'USO

- Percorsi pedonali e piste ciclabili
- Marciapiedi
- Piazze
- Parcheggi esterni
- Aree soggette a ridotto traffico veicolare
- Superfici di scolo industriali/civili (drenaggi, bordo piscina)
- Aree soggette a ridotto traffico a scarsa illuminazione (*brightDrain*)
- Sentieri "luminosi" (*brightDrain*)

VANTAGGI

- Eccellenti capacità drenanti e di portanza
- Eliminazione dei tradizionali sistemi di raccolta dell'acqua (tombini e tubazioni)
- Ampia gamma di colori e tessiture superficiali
- Opere perfettamente inserite nelle aree verdi
- Lungo mantenimento della lavorabilità iniziale
- Elevata coesione e assenza di fenomeni di sedimentazione della pasta di cemento
- Facilità di stesa (miglioramento delle condizioni di lavoro)
- Controllo del ritiro igrometrico
- Fotoluminescenza (*brightDrain*)

DATI TECNICI

I dati tecnici di riferimento vengono modulati in relazione alle particolari richieste formulate dal progettista/direzione lavori e/o dall'impresa esecutrice.

Tipologia di prodotto	Intervallo di Resistenza caratteristica a compressione (R_{ck}) (MPa)	Intervallo di densità in situ (ρ_{m20}) (kg/m ³)	Intervallo di capacità drenante [secondo UNI-EN 12697/40] (l/m ² /min)	Diametro massimo dell'aggregato (mm)
flatDrain	15 + 20	1600 + 2000	100 + 350	10 + 15

Rif. Normativi:

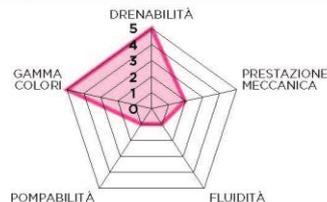
D.M. 14 Gennaio 2008, Circolare 2 Febbraio 2009 n. 617, UNI EN 206-1: 2006, UNI 11104, UNI 11146, UNI EN 12697/40 e Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale

VOCE DI CAPITOLATO

Calcestruzzo drenante a consistenza terra umida (tipo prodotto **flatDrain: Colabeton Spa**):

- Tipologia di prodotto ...
- Colore ...
- Capacità drenante (UNI EN 12697/40 ...)
- Resistenza meccanica R_{ck} pari a ... (MPa)
- Classe di consistenza S1
- D_{max} aggregato ... (mm)
- Fotoluminescenza (*brightDrain*)

flatDrain



Il Servizio Tecnologico Colabeton basa la sua professionalità sulla ricerca e sull'esperienza di cantiere e pone la conoscenza acquisita nel settore a disposizione di progettisti e di imprese per lo studio di particolari mix design. Le nostre esperienze sono da ritenersi indicative e dovranno essere verificate da prove pratiche per verificare l'idoneità del prodotto all'impiego previsto.



DIREZIONE GENERALE
via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401

www.colabeton.it
ste@colabeton.it
commerciale@colabeton.it
Numero Verde: 800 102102

ottobre 2018



2.5 Criteri Minimi Ambientali (CAM)

Inoltre, al fine di poter parlare davvero di strutture sostenibili, ogni soluzione progettuale, è pensata al fine di soddisfare i criteri ambientali “minimi”, i così detti CAM (Criteri Minimi Ambientali). I Criteri Ambientali Minimi per l'edilizia, introdotti con il decreto pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n.16 del 21 gennaio 2016 del Ministero dell'Ambiente e successivamente modificato con Decreto del 11 gennaio 2017, sono stati resi obbligatori dal nuovo Codice dei Contratti Pubblici. Nascono, a seguito di una mancata applicazione dei criteri di sostenibilità ambientale da parte dei pubblici e dei privati, in applicazione del "Piano d'Azione per la sostenibilità dei consumi nel settore della Pubblica Amministrazione (PAN GPP)", adottato dal Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare nel 2008, e hanno lo scopo di rendere "verdi" gli appalti, consentendo di incentivare la costruzione “sostenibile”. I CAM per l'edilizia hanno come oggetto l'opera nel suo complesso e i materiali componenti nelle diverse fasi di progettazione, realizzazione e gestione. Per appalti di nuove costruzioni, ristrutturazioni e manutenzione di edifici e per la gestione dei cantieri i CAM devono essere inseriti nella documentazione di gara e applicati al 100% del valore. Le Pubbliche Amministrazioni stanno procedendo in maniera rapida verso il recepimento dei CAM all'interno dei capitolati d'appalto con un progressivo aumento di richieste di forniture ad essi conformi. Ma questi possono essere utilizzati anche nell'opera privata e per tanto si è deciso di applicarli al caso studio.

I CAM in edilizia si suddividono in:

- Diretti: specifiche tecniche dei componenti edilizi.
- Indiretti: specifiche tecniche del cantiere;
specifiche tecniche per gruppi di edifici;
specifiche tecniche dell'edificio.
- Premiati: distanza di approvvigionamento.

I CAM diretti hanno l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale sulle risorse naturali e aumentare l'uso di materiali riciclati, in modo da orientare l'operatività, dalla filiera del cemento e del calcestruzzo, per rispondere a queste nuove esigenze del mercato. Per quanto concerne le “specifiche tecniche dei componenti edilizi”, tra i criteri comuni richiesti per i materiali da recupero e riciclati: il 50% dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati deve essere sottoponibile a demolizione selettiva e deve essere riciclabile, almeno 15% non strutturale; il 15% riciclato totale sui materiali e prodotti utilizzati, almeno 5% non strutturale. E in particolare, il D.M. afferma che per i calcestruzzi (2.4.2.1 Calcestruzzi

confezionati in cantiere e preconfezionati) usati per il progetto devono essere prodotti con un contenuto di materiale riciclato (sul secco) di almeno il 5% sul peso del prodotto (inteso come somma delle singole componenti). Al fine del calcolo della massa di materiale riciclato va considerata la quantità che rimane effettivamente nel prodotto finale. Mentre è la UNI 11104:2016 che consente l'utilizzo del materiale di riciclo nel calcestruzzo definendone la conformità, le modalità (cementi, aggiunte ed aggregati) ed i limiti d'utilizzo. Si riporta il Prospetto 3 della norma relativo alle *aggiunte* possibili di materiale riciclato.

Aggiunta tipo II		k	Denominazione del tipo di cemento (EN 197-1)	Rapporto in massa aggiunta/ Cemento ^{a)}	Rapporto acqua/ cemento	Requisiti aggiuntivi
Ceneri volanti EN 450-1		0,4	CEM I	≤ 0,33	-	-
			CEM III/A	≤ 0,25		
Fumi di silice EN 13263-1 ^{e)}		Classe 1 ^{c)}	CEM I CEM III/A ^{d)}	≤ 0,11	≤ 0,45	-
					2,0	Tutte le classi di esposizione tranne XC e XF
					1,0	Classi di esposizione XC e XF
Loppa d'altoforno granulata macinata EN 15167-1		0,6	CEM I CEM III/A	≤ 1,0	-	-

a) E' consentito utilizzare un rapporto aggiunta/cemento maggiore, ma in tali casi non si può tener conto del quantitativo di aggiunta eccedente il limite specificato ai fini del calcolo del rapporto massimo acqua/(cemento+k aggiunta) e del contenuto minimo di (cemento + k aggiunta).
b) Il valore riportato deriva da sperimentazioni nazionali su ceneri volanti di categoria A.
c) Il quantitativo di cemento non deve essere ridotto più di 30 kg/m³ al di sotto del contenuto minimo di cemento richiesto per la classe di esposizione pertinente (Prospetto 5).
d) Eccetto cemento Portland composito ai fumi di silice.
e) Per i fumi di silice di classe 2 non sono stabilite dalla presente norma regole per l'uso del concetto del valore k.

Figura 93: UNI 11104 - Prospetto 3-regole d'uso delle aggiunte per l'applicazione del concetto del valore k

Invece gli aggregati si suddividono in *aggregati di recupero*²¹ e *aggregati riciclati*²². L'aggregato di recupero può essere utilizzato come aggregato per il calcestruzzo purché sia utilizzato solo internamente dal produttore o un gruppo di produttori; non deve essere aggiunto in quantità maggiori del 5% in massa dell'aggregato totale se non suddiviso in classi granulometriche; nel caso in cui le quantità degli aggregati frantumati di recupero siano maggiori del 5% in massa dell'aggregato totale, esse devono essere trattate come aggregati riciclati, in particolare la NTC 2008 specifica l'utilizzo per i calcestruzzi strutturali di aggregati riciclati grossi (aggregato grosso: $d \geq 2$ mm; $D \geq 4$ mm). Le raccomandazioni

²¹ Materiale che sarebbe stato altrimenti smaltito come rifiuto o utilizzato per il recupero di energia, ma è stato invece raccolto e recuperato come materiale di alimentazione, al posto di un materiale nuovo, per un processo di riciclaggio o di produzione.

²² Materiale che è stato rilavorato da materiale recuperato mediante processo di lavorazione e trasformato in un prodotto finale o in un componente da incorporare in un prodotto.

per l'utilizzo degli aggregati riciclati grossi sono indicate nell'appendice E; devono essere conformi alla UNI EN 12620. Le massime percentuali in massa di sostituzione dell'aggregato grosso con aggregato grosso riciclato in relazione alla sua tipologia, alla classe di esposizione e alla classe di resistenza nel calcestruzzo a prestazione garantita sono definiti nel Prospetto 4 della UNI 11104 (Figura X). È possibile osservare che la norma permette di sostituire il 100% degli aggregati grossi per calcestruzzo non strutturale; fino a 30-60% per calcestruzzo strutturale e fino al 5-15% per calcestruzzo prefabbricato, ma il D.M. si ferma al solo 5% come criterio minimo richiesto per i CAM.

Tipologie di aggregato		Classe di resistenza	% massima di sostituzione													
			Classe di esposizione													
			X0	XC1 XC3	XC2	XC4	XS1	XS2 XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2 XF4	XF3	XA1	XA2
Tipo A :	RC90,RCU95, Rb10-,Ra1- FL2-, Rg1-	≥C12/15 ≤C20/25	60%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		≤ C30/37	30%	30%	-	-	-	20%	-	-	-	20%	20%	-	-	-
		≤ C45/55	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Tipologie di aggregato		Classe di resistenza	% massima di sostituzione													
			Classe di esposizione non applicabile													
Tipo A :	RC90,RCU95, Rb10-,Ra1- FL2-, Rg1-	C8/10	≤ 100%													
Tipo B :	RC50,RCU70, Rb30-,Ra5- FL2-,XRg2-															

Figura 94: UNI 11104 - Prospetto 4 – massima percentuale di sostituzione dell'aggregato grosso con aggregato grosso riciclato in funzione della tipologia di aggregato, classe di resistenza e classe di esposizione

Per rispettare tale criteri, si è pensato di utilizzare nel mix-design del calcestruzzo, anziché di un cemento CEM II A/L 42.5R bensì un **CEM IV A/V 42.5R**, ottenuto con le così dette polveri “sostenibili”, quali ceneri volanti e fumi di silice (si veda la “Parte Prima-cementi sostenibili”), e il contenuto del 5% e 30% in peso di **aggregato riciclato**, proveniente proprio dal calcestruzzo stoccato dalla demolizione del fabbricato esistente sul lotto di intervento. Si osserva, che la norma UNI 11104:2016 considera i fumi di silice e le ceneri volanti presenti nel CEM IV A/V 42.5R, grazie alla loro natura, essendo questi residui industriali, tra i materiali riciclati e per tanto sarebbero sufficienti per il raggiungimento della percentuale minima del 5% richiesta per i CAM. Ma per dimostrare che è possibile aumentare la percentuale di materiale riciclato e rendere il calcestruzzo più “sostenibile” si è scelto di inglobare negli aggregati della matrice cementizia, appunto, aggregati riciclati in percentuali

pari al 5% (percentuale minima per calcestruzzo prefabbricato) e pari al 30% (percentuale minima per calcestruzzo strutturale).

Altri criteri, quali i CAM indiretti, hanno un impatto, appunto, indiretto in quanto sono finalizzati ad indirizzare le scelte del progettista verso materiali più sostenibili. Per le “specifiche tecniche per gruppi di edifici” importante è requisito di *drenabilità* delle superfici che il progettista deve garantire per almeno il 60% della superficie totale; criterio raggiunto con l'utilizzo del **calcestruzzo drenante** nell'area esterna del caso studio (come già sopra descritto). Egli, inoltre, deve anche ridurre l'impatto sul microclima e dell'inquinamento atmosferico: per le superfici impermeabili è richiesto l'uso di elementi ad *alto indice di riflessione solare (SRI)*, ovvero per le superfici di copertura con pendenza minore o uguale al 15% almeno 76 e per le superfici non di copertura almeno 29. Per quanto concerne invece le “specifiche tecniche dell'edificio” la capacità termica areica interna periodica, che definisce la prestazione energetica, riferita ad ogni singola struttura opaca dell'involucro esterno, deve avere un valore di almeno 40 $\text{kJ/m}^2\text{k}$. Infine per le “specifiche tecniche di cantiere”, nel caso di scavi e rinterri, i riempimenti con miscela di materiale betonabile deve essere utilizzato almeno il 50% di materiale riciclato.

Un altro criterio di interesse, che potrebbe indirizzare la scelta del progettista verso il calcestruzzo in quanto *materiale di provenienza locale*, ovvero i CAM premiati, è quello relativo della distanza massima di approvvigionamento che nella nuova stesura passa da 350 a 150km. Viene cioè attribuito un punteggio premiante per l'utilizzo di prodotti costituiti per almeno il 25% in peso da materiali estratti, raccolti o recuperati, nonché lavorati (processo di fabbricazione) ad una distanza di 150km dal cantiere di utilizzo (sommatoria di tutte le fasi di trasporto incluse nella filiera produttiva). Criterio rispettato, in quanto i materiali utilizzati provengono dal sito d'intervento (per quanto concerne i materiali riciclati) e da **cementerie locali** (sia per lo smaltimento che per il approvvigionamento del nuovo materiale).

Oltre ai criteri da rispettare, il Ministero ha individuato anche le modalità di controllo del possesso dei requisiti richiesti. Nel caso delle miscele betonabili per i riempimenti è sufficiente che il legale rappresentante dell'impresa esecutrice dichiari che i requisiti saranno rispettati e documentati nel corso dell'attività di cantiere. Pertanto al produttore di calcestruzzo è richiesto solo di fornire all'impresa eventuale documentazione tecnica circa il materiale utilizzato. Nel caso di calcestruzzi, il produttore di calcestruzzo, al fine di garantire il rispetto del criterio dovrà accompagnare la fornitura con una dichiarazione ambientale di

tipo III (ad es. EPD) oppure una asserzione ambientale conforme alla ISO 14021, verificata da un organismo di valutazione della conformità.

Si riporta il Fac-simile dell'asserzione ambientale:

Carta intestata dell'azienda

ASSERZIONE AMBIENTALE AUTODICHIARATA (UNI EN ISO 14021:2016)

FABBRICANTE
manufacturer

XXXXXXXXXX
(Sede legale) Indirizzo – CAP – Comune (Provincia)

IMPIANTO
Facility

Indirizzo – CAP – Comune (Provincia)

CONTENUTO MINIMO DI MATERIALE RICICLATO, RECUPERATO, SOTTOPRODOTTO							
<i>Minimum content of recycled, recovered, by-product materials</i>							
TIPOLOGIA DI PRODOTTO <i>Product type</i>	NOME PRODOTTO <i>Product name</i>		Materiale riciclato <i>Recycled material</i>			Materiale recuperato <i>Recovered material</i>	Sottoprodotto <i>By-product material</i>
			Totale <i>Total</i>	Pre- consumer	Post- consumer		
Tipo A	Prodotto A (Cod. XXXX)	≥	X %	Y %	W %	K %	A %
Tipo B	Prodotto B (Cod. XXXX)	≥	Z %	X %	C %	V %	B%
	Prodotto C (Cod. XXXX)	≥	Q %	E %	R %	T %	G %

Luogo e data

XXXXXXXXXX

Il rappresentante legale
Nome cognome

Timbro e firma

3 Confronto tra calcestruzzo “tradizionale” ed “innovativo”

Per poter dimostrare gli effettivi vantaggi derivanti dall'utilizzo del calcestruzzo “innovativo” al posto di quello “tradizionale”, al fine di arrivare a quello che è l'obiettivo di questa tesi, si sono confrontate le due diverse tipologie di calcestruzzo sul rapporto qualità/prezzo, quindi sia dal punto di vista economico che di prestazioni meccaniche delle stesse.

3.1 Confronto dell'analisi del costo di costruzione

Una delle cause principali del mancato utilizzo delle nuove soluzioni tecnologiche sta nel costo maggiorato del calcestruzzo “innovativo” rispetto a quello tradizionale”. Il motivo di questo sta nei componenti presenti nel mix design, che a seconda del calcestruzzo (ad esempio autocompattante o leggero strutturale) risultano differenziarsi sia nel tipo di materiale sia nelle quantità (si potrà osservare queste differenze nel paragrafo successivo di “Confronto delle prestazioni”). Per tanto, si vuole ora dimostrare che, se non ci si ferma al costo del singolo materiale ma si osserva tutta l'analisi costi-benefici dell'opera da realizzare, l'impiego di tali materiali permette in realtà di ridurre i costi di costruzione e quindi di avere vantaggi di tipo economici.

Tale dimostrazione prevede il confronto economico tra il calcestruzzo “tradizionale” ed “innovativo” sul caso studio; in particolare è stato effettuato sulla struttura A prevista nel progetto, in quanto le altre strutture non si differenziano dalla stessa e quindi è possibile comparare i risultati. Dapprima si sono analizzati tutti gli elementi strutturali e non in calcestruzzo previsti in fase progettuale, in modo da definire il *totale in m² e i m³ di materiale da costruire*. Nelle tabelle riportate negli allegati è possibile osservare che i calcoli sono stati svolti per ogni partizione prevista nelle soluzioni progettuali, quali fondazioni, partizioni orizzontali e partizioni verticali di facciavista. Si riportano ad esempio i risultati inerenti alle quantità di calcestruzzo previste per la realizzazione delle fondazioni:

Fondazioni						
	n°	base (cm)	altezza (cm)	lunghezza (cm)	Area totale (cm ²)	Volume totale (cm ³)
Muro Contenimento	2	20	300	2780	111200	33360000
	2	20	300	1320	52800	15840000
Travi esterne	2	50	50	2780	278000	13900000
	2	50	50	1320	132000	6600000
Travi interne	6	70	50	360	151200	7560000
	6	70	50	470	197400	9870000
	3	70	50	460	96600	4830000
	6	70	50	450	189000	9450000

	6	70	50	420	176400	8820000
Totale calcestruzzo						110230000

Tabella 16: calcolo del totale di calcestruzzo necessario per la realizzazione delle fondazioni

Successivamente, sono state sviluppate altre tabelle di calcolo, le cui voci comprendono i costi unitari dei materiali, delle attrezzature (m² e/o a m³) e della manodopera (costo medio giornaliero), attraverso i quali si sono calcolati i prezzi effettivi per la realizzazione delle singole partizioni moltiplicando gli stessi con le quantità effettive da realizzare precedentemente calcolate e delle giornate di lavoro che il cronoprogramma prevede per ciascuna costruzione nel caso reale.

Per i costi medi giornalieri della manodopera sono stati utilizzati quelli forniti dal sito web dell'ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili) relativi all'area metropolitana della provincia di Bari, città prevista nel progetto del caso studio. Si riporta il quadro illustrativo dei costi suddivisi in base al livello di specializzazione dell'operaio edile (comune, qualificato, specializzato):

ANCE BARI E BARLETTA-ANDRIA-TRANI

COSTI MANODOPERA EDILE (Aziende da 16 a 50 dipendenti)

1° LUGLIO 2015 (TAB. 3/2015)

Costi orari della mano d'opera edile in vigore nell'Area Metropolitana di Bari e nei Comuni di Andria, Barletta, Bisceglie, Canosa, Minervino, Spinazzola, Trani della Provincia di BAT

	Operaio 1° liv. comune	Operaio 2° liv. qualificato	Operaio 3° liv. specializzato	Operaio 4° liv. 4° livello
A - Elementi della retribuzione				
01) Minimo Paga Base	4,86	5,68	6,31	6,80
02) Indennità di contingenza	2,96	2,99	3,00	3,01
03) EDR ex prpt. 31-7-92	0,06	0,06	0,06	0,06
04) Elemento Variabile della Retribuzione	0,00	0,00	0,00	0,00
05) Indennità Territoriale Settore e Elemento Economico Territoriale	1,08	1,25	1,38	1,50
TOTALE A	8,96	9,98	10,75	11,37
B - Oneri aggiuntivi				
06) Retribuzione 12 festività	0,56	0,62	0,67	0,71
07) Retribuzione 4 Novembre	0,05	0,05	0,06	0,06
08) Riposi annui (4,95%)	0,47	0,52	0,57	0,60
09) Acc. Cassa Edile per Gratifica Natalizia e Ferie (18,50%)	1,76	1,96	2,11	2,23
10) Indennità di trasporto	0,10	0,10	0,10	0,10
11) Retribuzione assemblee, diritto allo studio e formazione	0,27	0,30	0,32	0,34
12) Acc. Cassa Edile per malattia e infortunio e riposi annui	0,21	0,23	0,25	0,26
TOTALE B	3,42	3,78	4,08	4,30
C - Oneri previdenziali e assistenziali				
13) Inps (35,58%)	4,40	4,90	5,28	5,58
14) Inail (13,00%)	1,61	1,79	1,93	2,04
15) Contributi Cassa Edile (6,37%)	0,61	0,68	0,73	0,77
16) Maggiorazione contributiva Inps/inail su contributi Cassa Edile	0,04	0,05	0,05	0,06
TOTALE C	6,66	7,42	7,99	8,45
17) Indennità sostitutiva di mensa	0,37	0,37	0,37	0,37
18) T.F.R.	0,92	1,02	1,10	1,16
19) Rivalutazione TFR	0,03	0,03	0,03	0,03
20) Oneri vari: trasferte, Prev. Complem., indennità di disagio 50%	3,19	3,55	3,82	4,04
TOTALE D	4,51	4,97	5,32	5,60
21) IRAP	0,00	0,00	0,00	0,00
COSTO MEDIO ORARIO	23,55	26,15	28,14	29,72

N.B. Le tabelle ai fini di cui all'art. 3 bis del Decreto Legislativo 163/2006 vengono elaborate dal Ministero del Lavoro

LA PRESENTE TABELLA SOSTITUISCE LA PRECEDENTE N. 2/2015 CON PARI DECORRENZA

Mentre, per i prezzi unitari dei materiali sono stati utilizzati quelli presenti nel listino prezzi della regione Puglia – “Dipartimento mobilità, qualità urbana, opere pubbliche, ecologia e

paesaggio – Sezione Lavori Pubblici”, i quali sono stati anche confrontati con i prezzi forniti dalla Troilo srl, azienda produttrice di calcestruzzo e recupero inerti sita a Putignano, in Provincia di Bari (dalla quale sono stati acquisiti gli inerti necessari per le prove effettuate nei laboratori della Tecnoprove e di cui si parlerà nel prossimo paragrafo), verificando l’effettiva coerenza. Infatti il prezziario regionale si adegua ai valori di mercato correnti e tengono conto delle varie incidenze di trasporto in cantiere, di marchiature e attestati di conformità in accordo alla legislazione tecnica vigente in materia di sicurezza. Ad esempio, nel caso dei calcestruzzi, nei prezzi sono compensati tutti gli oneri di provvista dei materiali e di manodopera, di confezione e di lavorazione, mentre nei prezzi dei solai in genere è compreso l’onere per lo spianamento della caldana, nonché ogni opera e materiale occorrente per dare il solaio completamente finito, come prescritto nelle norme sui materiali e sui modi di esecuzione. All’interno del listino, i prezzi sono suddivisi in base all’opera da realizzare o da recupero; naturalmente sono stati considerati quelli inerenti alle opere di edilizia da realizzare. In particolare per i *calcestruzzi* si riportano i relativi prezzi:

- Calcestruzzo strutturale preconfezionato, conforme alla UNI EN 206-1, alleggerito con argilla espansa, in classe di consistenza S4 = 236,68 €/m³;
- Calcestruzzo a prestazione garantita, per strutture di fondazione e muri interrati a contatto con terreni non aggressivi, in accordo alla UNI EN 206-1, classe di esposizione ambientale XC1 e XC2, classe di consistenza S4 e classe di resistenza a compressione minima C25/30 = 134,40 €/m³;
- Calcestruzzo speciale autocompattante (SCC) a prestazione garantita, per strutture di fondazione e muri interrati a contatto con terreni non aggressivi, in accordo alla UNI EN 206-1, classe di esposizione ambientale XC1 e XC2 e classe di resistenza a compressione minima C25/30 = 161,89 €/m³;
- Calcestruzzo speciale per elementi strutturali a facciavista per ambienti esterni direttamente esposti all’azione fisica e chimica dell’acqua e dell’aria, a prestazione garantita, conforme EN 206-1, classe di esposizione ambientale XC1 e XC2 e classe di resistenza a compressione minima C25/30 = 180,00 €/m³;
- Sovrapprezzo per esecuzione di vibratura, compreso noleggio vibratore e consumo energia elettrica o combustibile = 5,58 €/m³;
- Sovrapprezzo alle cassetture per opere a facciavista, con l’impiego di cassetture in legname piallato a spigoli vivi, compreso l’onere della formazione di smussi, cavità in posizione obbligatoria, gocciolatoi, modanature = 14,18 €/m².

Per i *solai* invece:

- Solaio a struttura mista in calcestruzzo di cemento armato e laterizio, eseguito con travetti in calcestruzzo armato precompresso preconfezionati con impiego di laterizio, comprese casseforme ed armature provvisorie di sostegno di qualunque tipo, natura, forma e specie, fino a 4 m dal piano di appoggio, compreso altresì il ferro di ripartizione e la soletta superiore in calcestruzzo non inferiore a 4 cm = 79,30 €/m² per luci da 4 a 6 m e per sovraccarico di 400 kg/m²;
- solaio composto da lastre prefabbricate tipo Predalles H cm 4 + 28,5 a nervature parallele, in calcestruzzo vibrato dello spessore di 5 cm, armate con rete e tralicci elettrosaldati, ed alleggerito con argilla espansa, armata con rete elettrosaldata ø6 maglia 20x20 cm = 73,80 €/m² per luci da 4,5 a 6 m, altezza totale di 25 cm e per sovraccarico di 400 kg/m².

Per gli *isolanti termico e acustico* considerati nel pacchetto architettonico del solaio:

- Pannelli di polistirolo espanso densità minima 20 Kg/mc, classe 1 di reazione al fuoco, per formazione di strati isolanti di solai, di pareti, terrazze, forniti e posti in opera su predisposto piano di posa con superficie ben livellata e priva di grumi ed asperità, previa spalmatura di idoneo collante speciale = 7,95 €/m² spessore di 4cm;
- Isolamento acustico di solai intermedi ottenuto con feltri di materiale isolante (fibra di roccia o di vetro) dello spessore mm 4/6, legati mediante collanti, con una faccia rivestita da un film di polietilene microforato, in opera su superficie ben livellata e priva di grumi e di asperità, compreso ogni onere e magistero = 5,40 €/m²;

Per le *opere di rifinitura* comprendenti attrezzature per la messa in opera, per lavorazioni fino a 4 m dal piano di appoggio:

- Massetto di allettamento e pavimentazione in grés porcellanato di dimensioni di cm 20x30 o 30x30 e filatura lucida = 55,50 €/m²;
- Intonaco e stucco per esterni con trattamento per umidità di risalita capillare eseguito con ciclo deumidificante dato in più fasi, con rinzafo antisale, per uno spessore massimo di cm 2 inclusa la finitura di mm 2 = 48,80 €/m²;
- Intonaco per integrazione di lacune o la realizzazione di rapprezzi di intonaco originale esistente (da considerare nei costi di manutenzione), spessore di cm 2 = 46,70 €/m².

I calcoli sono stati sviluppati, come già detto, per ogni elemento strutturale e architettonico da realizzare per il caso reale del caso studio e si sono, poi, ripetuti per il caso di progetto

che prevede la sostituzione del calcestruzzo “tradizionale” con quelli “innovativi”, ovvero l’SCC autocompattante, leggero strutturale con argilla espansa e lo speciale per il facciavista, di cui si sono riportati sopra i relativi prezzi unitari. Nel caso di progetto, per considerare l’effettivo costo di costruzione di ciascun elemento esaminato, al costo totale è stato detratto il costo della differenza delle giornate di lavoro impiegate per la realizzazione degli stessi rispetto al caso reale, in modo da dimostrare l’effettiva riduzione dei tempi di messa in opera e i relativi costi e quindi ottimizzare i costi del materiale e dimostrare la giusta convenienza data dall’impiego dei calcestruzzi “innovativi”. Il prezzo considerato per la differenza delle giornate lavorative rispetto a quelle previste dal cronoprogramma del caso reale è stato calcolato rapportando il costo di costruzione alla singola giornata lavorativa e quindi dividendo il totale del costo di costruzione dell’intera opera rispetto le 180 giornate di lavoro previste sempre dal cronoprogramma. Tutti i calcoli svolti sono stati riportati negli allegati, mentre qui si riportano le *tabelle conclusive* in modo da effettuare gli opportuni confronti e arrivare alle opportune conclusioni:

Fondazioni-Caso reale					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-CLS	m ³	3	110,23	134,4	14814,912
Vibratura	m ³	3	3	5,58	1845,2502
Operaio- Specializzato	h	3	12	28,14	337,68
Operaio-Qualificato	h	3	12	26,15	313,8
Operaio-Comune	h	3	12	23,55	282,6
Totale €	g	3	3	/	17594,2422

Fondazioni-Caso progetto					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-SCC	m ³	2	110,23	161,89	17845,1347
Schiuma poliuretanicata casseri	l	1	30	10,8	324
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Qualificato	h	2	8	26,15	209,2
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Totale €	g	2	2	/	18791,8547
Differenza giornate	g	1	1	496,34	496,34
Totale effettivo €					18295,5147

Per le **Fondazioni** si può notare che, a parità di quantità di materiale, il costo dello stesso è maggiore per l’SCC ma poiché tale calcestruzzo non necessita di vibrazione in modo da ridurre i tempi di messa in opera del materiale, a questo sono stati detratti i costi relativi di questa riduzione.

Partizioni orizzontali-Caso reale					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Solaio	m ²	6	246,432	79,3	19542,0576

Massetto-CLS	m ³	4	12,3216	134,4	1656,02304
Vibratura	m ³	4	4	5,58	275,018112
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Qualificato	h	10	40	26,15	1046
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Isolante termico	m ²	2	246,432	7,95	1959,1344
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Isolante termico	m ²	2	246,432	5,4	1330,7328
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Opere rifinitura	m ²	10	246,432	55,5	13676,976
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Totale €	g	24	24	/	46024,02195

Partizioni orizzontali-Caso progetto					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Solaio (Alleggerito)	m ²	6	246,432	73,8	18186,6816
Massetto-Alleggerito (S4)	m ³	4	12,3216	236,68	2916,276288
Vibratura	m ³	4	4	5,58	275,018112
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Qualificato	h	10	40	26,15	1046
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Isolante termico	m ²	0	0	7,95	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Isolante termico	m ²	0	0	5,4	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Opere rifinitura	m ²	10	246,432	55,5	13676,976
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Totale €	g	20	20	/	41361,752
Differenza giornate	g	4	4	496,34	1985,36
Totale effettivo €					39376,392

Per le **Partizioni orizzontali** del 1° e del 2° Impalcato previsti nel caso studio, si può notare anche in questo caso che, a parità di quantità di materiale, il costo dello stesso è maggiore per il calcestruzzo leggero strutturale, ma poiché tale calcestruzzo ha già le proprietà di isolamento termico e acustico grazie alla presenza di argilla espansa al suo interno, questo

permette di eliminare i costi relativi all'isolamento necessari invece nel caso reale, in modo da ridurre anche i tempi e i costi di messa in opera del materiale.

Facciata-Caso reale					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-CLS	m ³	2	18,88	134,4	2537,472
Vibratura	m ³	2	2	5,58	210,7008
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Qualificato	h	2	8	26,15	209,2
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Opere rifinitura	m ²	11	94,4	48,8	4606,72
Operaio- Specializzato	h	11	44	28,14	1238,16
Operaio-Qualificato	h	11	44	26,15	1150,6
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Totale €	g	13	13	/	10366,3728

Facciata-Caso progetto					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-Facciavista	m ³	1,5	18,88	180	3398,4
Vibratura	m ³	0	0	5,58	0
Operaio- Specializzato	h	1,5	6	28,14	168,84
Operaio-Qualificato	h	1,5	6	26,15	156,9
Operaio-Comune	h	1,5	6	23,55	141,3
Opere rifinitura	m ²	0	0	48,8	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Qualificato	h	0	0	26,15	0
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Casseformi per facciavista	m ³	1,5	94,4	14,18	1338,592
Totale €	g	1,5	1,5	/	5204,032
Differenza giornate	g	11,5	11,5	496,34	5707,91
Totale effettivo €					-503,878

Infine, per il **Facciavista** si può notare che, a parità di quantità di materiale, il costo dello stesso è maggiore per il caso di progetto in cui si considera, come già detto, un calcestruzzo autopulente e resistente alle azioni dell'acqua piovana e dell'aria, considerando anche che esso necessita di casseformi speciali per facciavista. Il prezzo complessivo, però, risulta molto più piccolo di quello del caso reale in quanto, poiché tale calcestruzzo non prevede opere di rifinitura, sono state eliminati costi relativi dei materiali, della manodopera e dei tempi di posa in opera.

Si conclude confrontando i costi complessivi per le 3 realizzazioni per il caso reale e quelli per il caso di progetto, osservando una notevole riduzione del costo di costruzione nel caso di utilizzo dei calcestruzzi "innovativi" pari a **16.816, 61 €**.

	Totale costo di costruzione Caso reale	Totale costo di costruzione Caso progetto
€	73984,63695	57168,0287
Differenza €	16816,60825	

3.2 Confronto delle prestazioni a seguito di prove in laboratorio

Ora si passa al confronto delle prestazioni meccaniche tra un calcestruzzo “tradizionale” e uno “innovativo” con l’obiettivo di dimostrare l’effettiva maggiore durabilità di quest’ultimo, ampiamente descritta a livello teorico nella “Parte Prima” di questa tesi. Ricordiamo che la durabilità del materiale è funzione della capacità di quest’ultimo a durare nel tempo resistendo alle azioni aggressive dell’ambiente in cui si trova. Dimostrare, quindi, la durabilità del calcestruzzo è un compito abbastanza complesso perché non esiste una singola prova, in quanto tale caratteristica dipende da diversi fattori, molti appunto funzione del tipo di ambiente (si rimanda al paragrafo relativo del capitolo “Il calcestruzzo come materiale da tradizione”), ma ne esistono numerose illustrate nella NTC 2018 e nelle “Linee Guida sui Calcestruzzi” da effettuare in sito e in laboratorio sia per il calcestruzzo allo stato fluido che allo stato indurito. Svolgere tutte queste prove, però, per ciascuna tipologia di calcestruzzo prevista nelle soluzioni progettuali del caso studio, sarebbe solo questo argomento di tesi, in quanto lungo e dispendioso e per tanto si è ritenuto opportuno focalizzarsi su alcuni aspetti importanti.

Si sappia infatti che la durabilità del calcestruzzo è strettamente legata alla *permeabilità*; un calcestruzzo con un’elevata permeabilità è sinonimo di una scarsa durabilità, poiché con l’acqua penetrano potenziali agenti aggressivi, come solfati, cloruri, alcali, ecc. (si rimanda alla “Parte Prima-II degrado del calcestruzzo”). Una tipologia di calcestruzzo che riduce di molto la permeabilità è l’SCC (*Self- Compacting-Concrete*), in quanto grazie alle sue proprietà reologiche riempie completamente i casseri eliminando i macrovuoti e l’aria in eccesso all’interno della matrice cementizia. Questo evita l’insorgere dei macrodifetti del calcestruzzo che sono la causa dell’abbattimento delle sue proprietà meccaniche e del suo grado di durabilità (“Parte Prima-Calcestruzzo autocompattante”). Proprio per queste caratteristiche, tale calcestruzzo è stato scelto come alternativa al calcestruzzo “tradizionale” per le opere di fondazione, in quanto queste a diretto contatto con il terreno e quindi con la permeabilità dello stesso. Per incrementare la resistenza alla permeabilità ed all’attacco chimico del calcestruzzo, è necessario ridurre la *porosità capillare* della matrice cementizia, mediante: l’utilizzo di un **basso rapporto a/c**, stagionare il calcestruzzo in ambiente umido, ed irrigidire la matrice cementizia con l’utilizzo di **cementi o filler ad attività pozzolanica (cementi sostenibili)**.

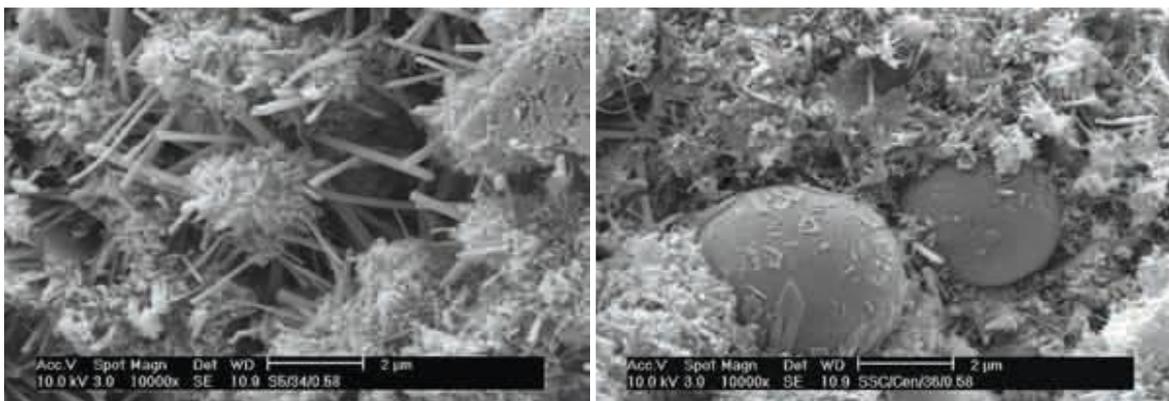


Figura 95: differenza della microscopia elettronica della pasta di cemento di un SCC con cenere volante(destra) e quella di un ordinario(sinistra) a 28 giorni; SCC presenta una porosità maggiore rispetto a quella di un ordinario a parità di rapporto a/c (Mapei)

I materiali a comportamento pozzolanico o ad attività pozzolanica sono sostanze naturali o sottoprodotti industriali, come *pozzolana industriali*, *ceneri volanti*, *fumi di silice*, che hanno una struttura amorfa o parzialmente cristallina e sono costituiti da silice, da silico-alluminati o da una combinazione di questi che reagiscono con l'ossido di calcio CH presente nella miscela, per ottenere un composto più fibroso e meccanicamente più resistente. Infatti il comportamento pozzolanico migliora con la purezza e la finezza della silice in essa contenuta (100 volte inferiore a quella del cemento) in modo da, come già detto, ridurre la porosità della matrice cementizia e aumentare la durabilità del materiale. Inoltre, proprio grazie alla naturalità di questi materiali è possibile ottenere un calcestruzzo, oltre che maggiormente resistente e quindi durevole, anche “sostenibile” per l'ambiente. Quindi ottenendo anche una struttura più resistente, durevole e sostenibile. Per tanto al calcestruzzo “tradizionale” con CEM II A/L 42.5R previsto nel caso reale del caso studio si sostituisce nel caso di progetto un calcestruzzo “innovativo”, in particolare un SCC per le strutture di fondazione, con CEM IV A/V 42.5R, come si può leggere dalle soluzioni tecnologiche progettuali proposte in tale applicazione. Nello stesso paragrafo, nelle “specifiche per i componenti edilizi”, si afferma che l'utilizzo di questo cemento è uno dei criteri, ovvero quello del contenuto del 5% di materiale riciclato per il confezionamento del calcestruzzo, necessario al raggiungimento dei CAM e che si è pensato di aumentare tale percentuale inserendo nello stesso mix anche aggregati riciclati (5% e 30%) provenienti dalla demolizione dell'edificio esistente nel caso reale, riducendo quindi quella degli aggregati naturali, in modo da dimostrare che è possibile ottenere una buona resistenza e quindi durabilità del calcestruzzo rendendolo maggiormente “sostenibile” per l'ambiente.

Per tale dimostrazione, si è ritenuto opportuno confrontare con prove in laboratorio calcestruzzi avente lo stesso tipo di cemento, ovvero il CEM IV A/V 42.5R, ma diversa consistenza (NCC e SCC) e diversa percentuale di aggregato riciclato. Invece, risultava non comparabile e banale il confronto con il calcestruzzo costituito da CEM II A/L 42.5R e aggregati naturali previsto dal caso reale.

Mix design

Grazie alla disponibilità dell'Ingegnere Molentino del laboratorio tecnologico Tecnoprove di Ostuni (BR) e ad ai suoi gentilissimi collaboratori (in particolare il Geometra Maurizio Pecere), è stato possibile creare 4 differenti mix-design direttamente in laboratorio, partendo dalle stesse "specifiche" del calcestruzzo considerato nel caso reale: classe di esposizione XC1-XC2 (bagnato, raramente asciutto), quindi con minima classe di resistenza C25/30; $a/c_{\max} = 0,60$; dosaggio minimo di cemento (kg/m^3) = 300 (280) e $D_{\max} = 26$ mm. Inoltre, per avere un confronto in termini di reologia e di resistenza meccanica fra i mix design, si sono adottati gli stessi parametri di rapporto a/c di partenza = 0,5, valutato come il rapporto a/c medio fra il massimo (0,6) e il minimo (0,45) previsto nelle classi di esposizione ambientale della UNI EN 206-1 (si comprendono XC1-XC2-XC3-XC4 "corrosione indotta da carbonatazione" e persino XS1 "corrosione indotta da cloruri-acqua di mare") in modo da tenere basso questo valore ai fini della permeabilità (come richiesto); stessa tipologia di inerte, ad eccezione della variazione in % e della sostituzione in parte con aggregati riciclati e per gli SCC stessa quantità di acqua di partenza.

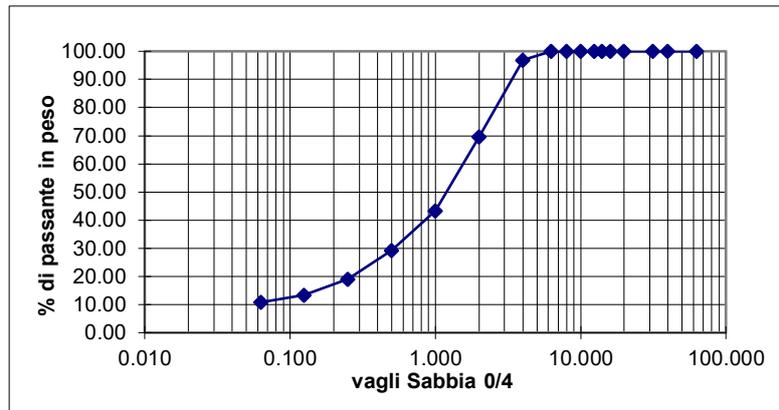
I 4 mix design analizzati sono:

1. Calcestruzzo "ordinario" con CEM IV A/V 42.5 R e aggregati naturali;
2. Calcestruzzo "innovativo" SCC con CEM IV A/V 42.5 R e aggregati naturali;
3. Calcestruzzo "innovativo" SCC con CEM IV A/V 42.5 R, aggregati naturali e con il 5% di aggregati riciclati;
4. Calcestruzzo "innovativo" SCC con CEM IV A/V 42.5 R, aggregati naturali e con il 30% di aggregati riciclati.

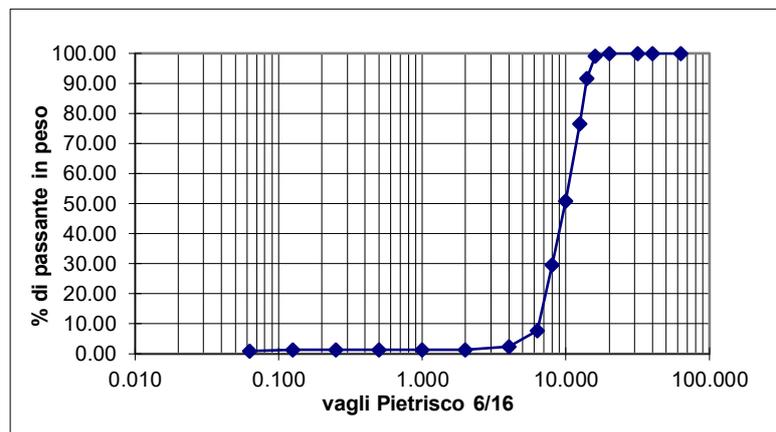
Materie Prime

È noto ormai che il calcestruzzo è costituito da inerti, cemento, additivo e eventuali aggiunte. Tali materie prime sono state personalmente reperite, quindi hanno provenienza locale e tutte provviste di marcatura CE. Si riportano le caratteristiche e la provenienza:

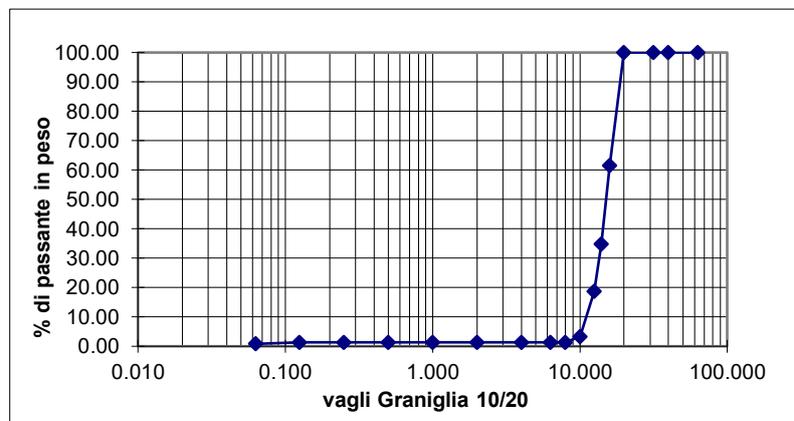
- **Sabbia 0/4** di natura calcare, $M_{\text{finezza}} = 3,29$; $M_{\text{Volume}} = 2352$ (g); cava “Troilo S.r.l.” di Putignano (BA);



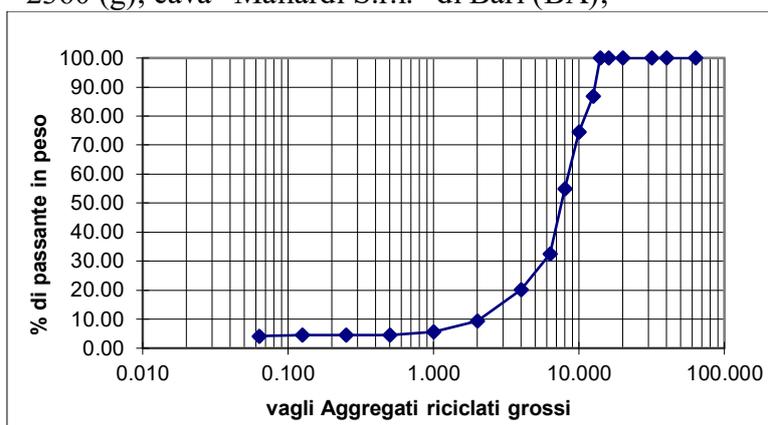
- **Pietrisco 6/16** di natura calcare, $M_{\text{finezza}} = 6,62$; $M_{\text{Volume}} = 2310$ (g); cava “Troilo S.r.l.” di Putignano (BA);



- **Graniglia 10/20** di natura calcare, $M_{\text{finezza}} = 7,30$; $M_{\text{Volume}} = 2394$ (g); cava “Troilo S.r.l.” di Putignano (BA);



- **Aggregati riciclati grossi** da calcestruzzo post-consumer e materiale inerte natura, $M_{\text{finezza}} = 5,09$; $M_{\text{Volume}} = 2360$ (g); cava “Mallardi S.r.l.” di Bari (BA);



- **Cemento CEM IV A/V 42.5R**; prodotto dalla Cementeria “Colacem S.p.A.” di Galatina (LE);
- **Additivo Superfluidificante 120**; utilizzato in % diversa a seconda della consistenza finale (1% per gli SCC).

Composizione del mix design

La composizione della miscela è scelta in modo da soddisfare tutti i criteri prestazionali per il calcestruzzo sia allo stato fresco che per quello indurito, e sia per il calcestruzzo ordinario che per quello autocompattante. In particolare, per quest’ultimo le indicazioni riportate nel paragrafo 2.9, definite dalla UNI 11040 “Calcestruzzo Autocompattante, specifiche, caratteristiche e controlli” mettono in luce i punti essenziali per la formulazione di un calcestruzzo autocompattante e in parte riportate nel Paragrafo relativo della “Parte Prima”. Le proporzioni fornite dalla norma non sono assolutamente restrittive per cui in molte miscele di SCC uno o più di questi componenti potranno essere presenti in proporzioni al di fuori dei limiti indicati. Non esiste un metodo standard per il progetto delle miscele riguardante il calcestruzzo autocompattante e molte istituzioni accademiche, società che operano nei settori degli additivi, del calcestruzzo confezionato, della prefabbricazione e imprese di costruzioni, hanno sviluppato loro stessi i metodi di proporzionamento delle miscele. I metodi di mix design, spesso, usano il volume come parametro-chiave, in virtù dell’importanza della necessità di riempire i vuoti tra le particelle degli aggregati. Alcuni metodi cercano di adattare i componenti disponibili per ottimizzare la curva granulometrica. Un altro metodo consiste nella valutazione e nell’ottimizzazione della scorrevolezza e della stabilità della pasta prima e della malta poi, prima dell’aggiunta dell’aggregato grosso e prima della prova della miscela finale degli SCC.

Per ottimizzare la miscela del calcestruzzo autocompattante oggetto della sperimentazione, è stato creato un foglio elettronico in excel, dove facendo variare le % dei costituenti principali (cemento, acqua, finissimi ecc) si soddisfa l'andamento della **curva granulometrica di Bolomey**.

Test effettuati sulle diverse tipologie di mix e confezionamento dei cubetti

A seguito della composizione teorica dei 4 mix design, si è passati ai diversi impasti i quali hanno permesso di definire quali erano effettivamente le composizioni e quindi le giuste quantità di materiali e di acqua. Successivamente, ad impasto pronto è stato possibile effettuare i test allo stato fresco (già ampiamente descritti nella “Parte Prima”) per ciascuna tipologia di calcestruzzo al fine di verificare il raggiungimento della giusta consistenza e quindi lavorabilità a seconda del tipo di calcestruzzo (NCC o SCC):

Test	N° Prove	Norma UNI
Slump test	1	12350/2
Slump flow	1	12350/8
J Ring	1	12350/12
Massa Volumica	1	12350-6

È seguito, sempre per ogni mix, il confezionamento di 5 provini da 150x150x150 mm e di 4 provini da 100x100x100 mm che hanno permesso, dopo averli fatti stagionare in ambiente umido come richiesto dalla norma (immersi in vasca contenente acqua a temperatura $\pm 20^\circ$ e U.R. 100%), di effettuare i test allo stato indurito.



Figura 96: provini scasserati, opportunamente siglati e fatti stagionare

In particolare, al fine di confrontare la durabilità dei diversi mix di calcestruzzo sono state eseguite per ciascuno di essi: la prova di resistenza a compressione, per determinare la resistenza caratteristica del materiale; la prova di determinazione della penetrazione dell'acqua sotto pressione che, per le motivazioni prima spiegate, consente di determinare la resistenza alla permeabilità del calcestruzzo ed infine la prova di determinazione della resistenza alla carbonatazione (per la classe di esposizione considerata) che, come più volte ripetuto, è una delle cause di degrado del calcestruzzo e quindi dell'intera struttura.

Test	N° Prove	Tip.Test	Tipo cubetto	Norma UNI
Compressione	3	Distruttiva	15X15x15	12390/1-2-3-4-7
Profondità di penetrazione all'acqua sotto pressione	3	Distruttiva	15X15x15	12390-8
Resistenza alla carbonatazione	3	Semi-Distruttiva	15X15x15	13295

Il **test a compressione** è utilizzato per determinare la capacità del calcestruzzo di assorbire gli sforzi di compressione a cui esso è sottoposto nel tempo. Per effettuare la prova si sono eseguite le operazioni stabilite dalla norma, ovvero per ogni cubetto si misura il volume in litri effettivi mediante il calibro di precisione; la massa volumetrica allo stato indurito, che si ottiene dividendo il peso per i litri effettivi del cubetto; posizionamento del cubetto sotto la pressa, in modo che il carico sia applicato perpendicolarmente alla direzione del getto, la velocità di carico a compressione impostata alla macchina è di $0,5 \text{ N/mm}^2 \text{ sec}$; infine azionata la pressa, la macchina ci fornirà sul display il valore del carico di rottura e la resistenza a compressione.



Figura 97: strumentazione utilizzata per la prova di resistenza a compressione

Nella prova per la determinazione di **penetrazione dell'acqua** sotto pressione il provino di calcestruzzo è posto sull'apparecchiatura, su di un lato, viene applicata (evitando il lato di getto) l'acqua a pressione di 500 kPa = 5 bar per 72 h. Dopo che la pressione è stata applicata per il tempo specificato, si rimuove il provino dall'apparecchiatura, si asciuga la faccia sulla quale è stata applicata l'acqua in pressione, al fine di rimuovere l'eccesso di acqua, e si spacca il provino in due. Non appena la faccia spezzata si è asciugata al punto tale che il fronte di penetrazione dell'acqua può essere chiaramente individuato, si registra il valore con precisione prossimo al millimetro.



Figura 98: strumentazione per la prova di penetrazione dell'acqua (sinistra) e pressa per taglio (destra)

Infine la prova di **resistenza alla carbonatazione** ha lo scopo di misurare la profondità di carbonatazione dello strato superficiale del calcestruzzo. Si svolge dapprima tenendo i provini (nel caso studio si sono utilizzati provini 100x100x100, uno per ogni mix) in ambiente saturo di anidride carbonica al 1% per 56 giorni e successivamente si immergono i campioni in una soluzione di *fenolftaleina*²³ che provoca una colorazione viola nella zona non intaccata dalla carbonatazione, invece il tratto incolore indica la profondità di carbonatazione. Nel caso studio, a causa di tempi ristretti e quindi per ridurre i tempi di attesa, si sono tenuti i provini in ambiente saturo di anidride carbonica al 10% e per 14 giorni. Si evidenzia, inoltre, che tale prova viene effettuata per calcestruzzo in opera, in cui il prelievo

²³ È un comune indicatore di PH usato nelle titolazioni acido-base, generalmente usata in forma di soluzione in etanolo allo 0,1%. A PH inferiori a 8,2 è incolore, mentre a PH superiori a 9,8 gli ossidrilici perdono i loro idrogeni e la molecola impartisce un intenso colore porpora alla soluzione. È noto che il calcestruzzo armato ha un PH pari a 11, quindi tale soluzione è utilizzata al fine di verificare tale valore con si abbassi nel tempo.

di provini avviene con carotaggio e ha lo scopo di verificare che se l'armatura permane in un ambiente protetto.



Figura 99: strumentazione per la prova di resistenza alla carbonatazione

A conclusione della sperimentazione si è stipolato il **rapporto di prova**, procedura eseguita dalla stessa Tecnoprove, nel quale, a seguito dell'intestazione in cui è riportato:

- Codice della prova;
- Committente;
- Oggetto dei lavori;
- Norme di riferimento;
- Classe di resistenza;
- Classe di consistenza;
- Classe di esposizione;
- Diametro max dell'inerte;

sono raccolte tutte le informazioni sopra descritte e quindi si elencano i materiali utilizzati, con le relative % ottenute con la curva granulometrica; la composizione della miscela del conglomerato cementizio per 1 m³ di calcestruzzo e con aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) ed infine le prove effettuate per la qualifica della miscela e quindi quelle allo stato fresco e quelle su calcestruzzo indurito.

Si riportano tali rapporti di prova negli allegati, mentre ora si illustra per ciascuno dei 4 mix design tutta la procedura sopra descritta.

1. Calcestruzzo Ordinario con CEM IV A/V 42.5R e aggregati naturali

Definita la classe di resistenza = C25/30 e C30/37; la classe di consistenza = S4; la classe di esposizione = XC1-XC2-XC3-XC4; diametro massimo dell'inerte = 26 mm; rapporto a/c = 0,486 e dosaggio additivo superfluidificante rispetto alla massa di cemento = 0,8%, si è definita:

- **Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità**

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	55%
Pietrisco calcareo 6-16	20%
Graniglia calcarea 10-20	25%
Aggregati riciclati	0%

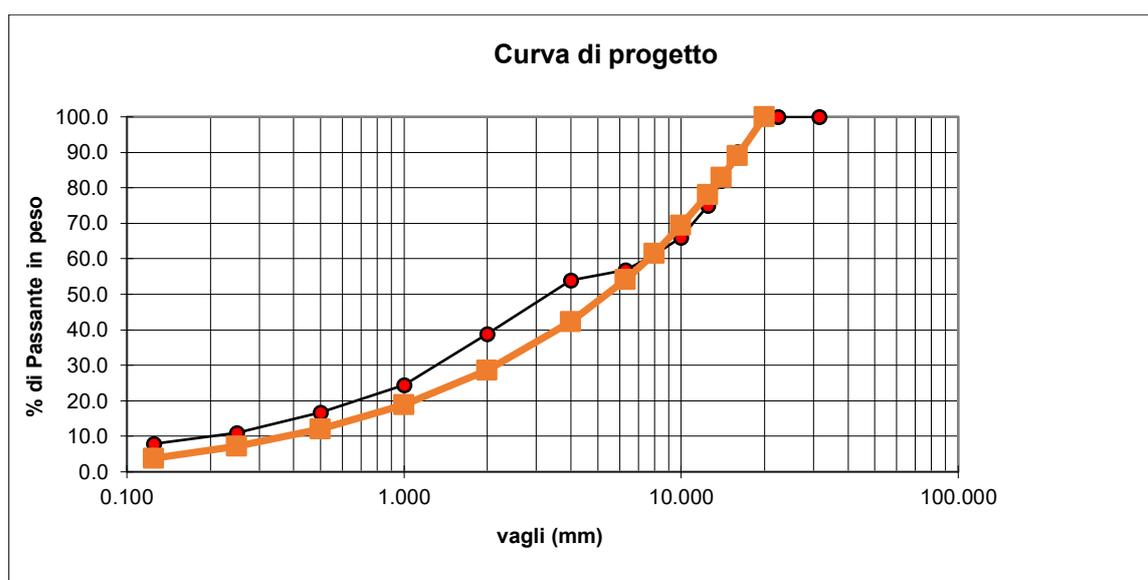


Figura 100: curva granulometrica di Bolomey NCC

- **Composizione della miscela del conglomerato cementizio**

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) – Miscela teorica	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) – Miscela corretta
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	350	350
Additivo Superfluidificante: 120	2,97	2,97

Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	984	984
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	360	360
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	450	450
Aggregato 4: Aggregato riciclato	0	0
Acqua:	170	170
Totale calcestruzzo	2318	2318

Si osserva che la miscela teorica e quella corretta coincidono, in quanto non è stato necessario effettuare alcune aggiunte.



Figura 101: differenza impasto cementizio senza additivo (sinistra) e con additivo (destra) superfluidificante

- **Prove su calcestruzzo fresco**

Prova di abbassamento al cono “slump test”:		S4
Consistenza	mm	200



Figura 102: costipamento del calcestruzzo e “slump test”

Prova di spandimento “slump flow”:		S4
Consistenza	mm	280-280



Figura 103: “slump flow”

Determinazione della massa volumica (provino non vibrato):	kg/m ³	2294
Determinazione della massa volumica (provino vibrato):	kg/m ³	2305



Figura 104: differenza visiva tra provino vibrato (sinistra) e provino non vibrato (destra)

- **Prove su calcestruzzo indurito**

La prova di *Resistenza a compressione*, per mancanza di tempo, è stata effettuata solo fino a 14 giorni e non a 28 giorni, ma questo non ha compromesso la sua determinazione:

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	3 giorni	151	150	150	7.798	2.295	625,82	27,6
21.03.2019	14 giorni (non vibrato)	153	150	150	7.813	2.269	848,59	37,0
21.03.2019	14 giorni (vibrato)	150	150	150	7.751	2.297	945,10	42,0

La prova di determinazione della *Profondità di penetrazione dell'acqua* sotto pressione:

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019 (non vibrato)	150	150	150	500	72	21,86
21.03.2019 (vibrato)	150	150	150	500	72	13,93

La prova di determinazione della *Resistenza alla carbonatazione*:

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019 (non vibrato)	100	100	100	10	14	8,8
21.03.2019 (vibrato)	100	100	100	10	14	1,4

2. Calcestruzzo SCC con CEM IV A/V 42.5R e aggregati naturali

Definita la classe di resistenza = C25/30 e C30/37; la classe di consistenza = SCC; la classe di esposizione = XC1-XC2-XC3-XC4; diametro massimo dell'inerte = 26 mm; rapporto a/c = 0,482 e dosaggio additivo superfluidificante rispetto alla massa di cemento = 1,25%, si è definita:

- **Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità**

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	70%
Pietrisco calcareo 6-16	30%
Graniglia calcarea 10-20	0%
Aggregati riciclati	0%

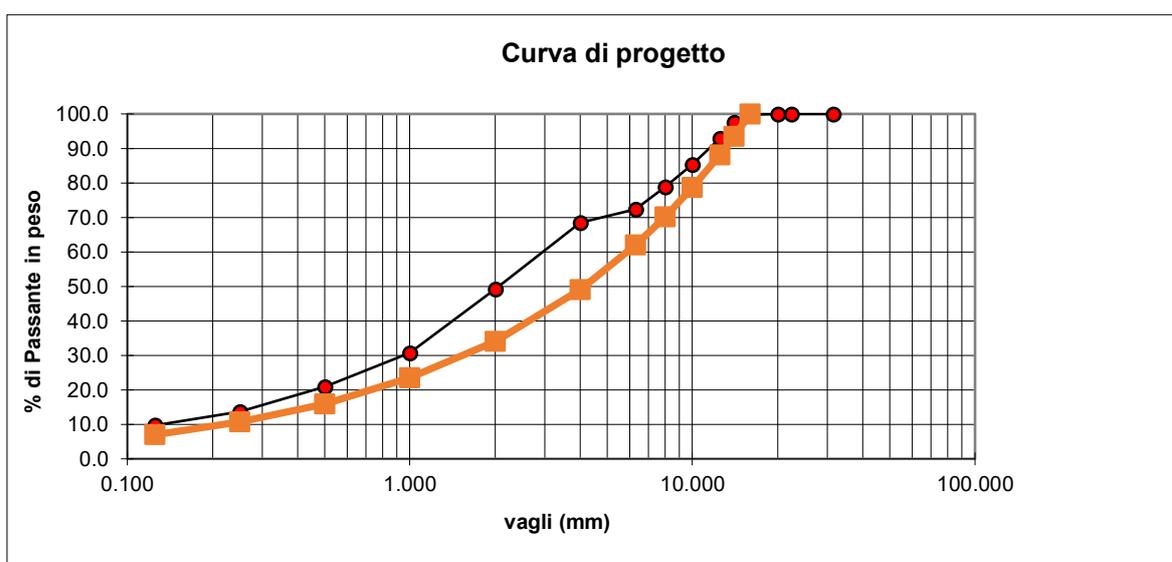


Figura 105: curva granulometrica di Bolomey SCC

- **Composizione della miscela del conglomerato cementizio**

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione saturata a superficie asciutta (kg) – Miscela teorica	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione saturata a superficie asciutta (kg) – Miscela corretta
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	400	407
Additivo Superfluidificante: 120	5,30	5,39
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	1146	1166
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	495	503
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	0	0
Aggregato 4: Aggregato riciclato	0	0
Acqua:	210	196
Totale calcestruzzo	2256	2278

Si osserva che la miscela teorica e quella corretta hanno diversi valori, in quanto inizialmente si era ipotizzato un quantitativo di acqua superiore a quella effettivamente richiesta dall'impasto. Così varia anche il rapporto a/c che inizialmente era = 0,525 e dopo la correzione = 0,482, valore che coincide con quello del calcestruzzo ordinario.



Figura 106: differenza impasto cementizio senza additivo (sinistra) e con additivo (destra) superfluidificante

- Prove su calcestruzzo fresco

Prova di spandimento “slump flow”:		SCC
Consistenza	mm	670-670



Figura 107: “slump flow”

Prova di passing ability “J Ring”:		SCC
Consistenza	mm	680-640



Figura 108: “J Ring”

La differenza tra la misura di spandimento con e senza J-Ring deve essere inferiore a $\Delta\phi \leq 50\text{mm}$, quindi risulta verificata.

Determinazione della massa volumica:	kg/m³	2260
--------------------------------------	-------------------------	-------------

- **Prove su calcestruzzo indurito**

La prova di *Resistenza a compressione*, per mancanza di tempo, è stata effettuata solo fino a 14 giorni, ma questo non ha compromesso la sua determinazione:

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	3 giorni	150	150	150	7.551	2.237	722,14	32,1
21.03.2019	14 giorni	150	150	150	7.692	2.287	968,53	43,2

La prova di determinazione della *Profondità di penetrazione dell'acqua* sotto pressione:

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	16,69

La prova di determinazione della *Resistenza alla carbonatazione*:

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	0

3. Calcestruzzo SCC con CEM IV A/V 42.5R, aggregati naturali e 5% aggregati riciclati

Definita la classe di resistenza = C25/30 e C30/37; la classe di consistenza = SCC; la classe di esposizione = XC1-XC2-XC3-XC4; diametro massimo dell'inerte = 26 mm; rapporto a/c = 0,482 e dosaggio additivo superfluidificante rispetto alla massa di cemento = 1,25%, si è definita:

- **Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità**

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	65,5%
Pietrisco calcareo 6-16	28,5%
Graniglia calcarea 10-20	0%
Aggregati riciclati	5%

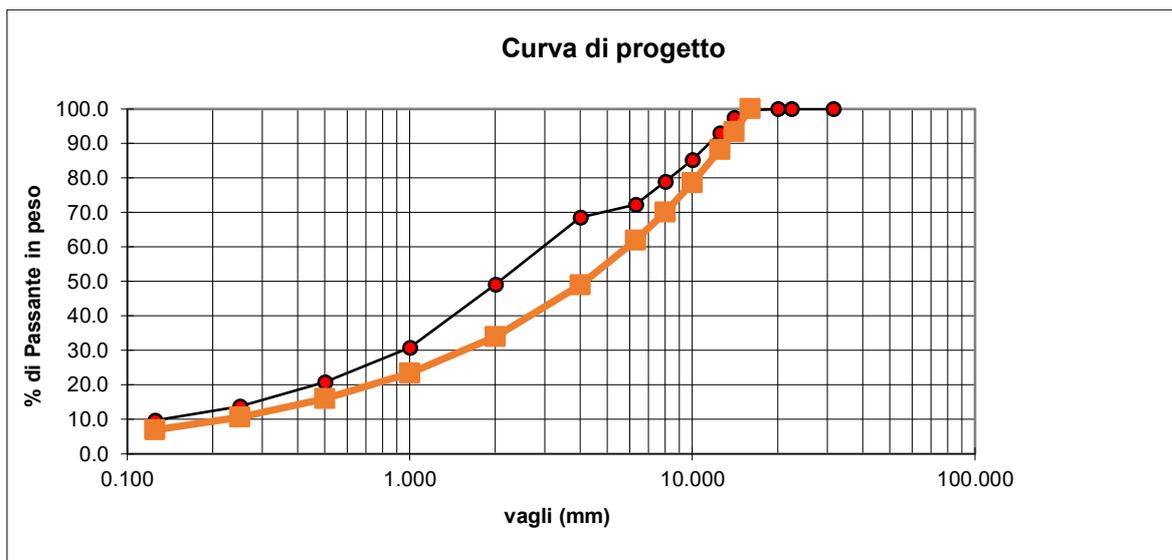


Figura 109: curva granulometrica di Bolomey SCC

- Composizione della miscela del conglomerato cementizio**

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) – Miscela teorica	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) – Miscela corretta
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	407	407
Additivo Superfluidificante: 120	5,39	5,39
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	1109	1109
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	478	478
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	0	0
Aggregato 4: Aggregato riciclato	82	82
Acqua:	196	196
Totale calcestruzzo	2278	2278

Si osserva che nelle due miscele i valori coincidono in quanto non sono state necessarie eventuali aggiunte.



Figura 110: differenza impasto cementizio senza additivo (sinistra) e con additivo (destra) superfluidificante

- Prove su calcestruzzo fresco

Prova di spandimento “slump flow”:		SCC
Consistenza	mm	600-650



Figura 111: “slump flow”

Determinazione della massa volumica:	kg/m ³	2254
--------------------------------------	-------------------	------

- **Prove su calcestruzzo indurito**

La prova di *Resistenza a compressione*, per mancanza di tempo, è stata effettuata solo fino a 14 giorni, ma questo non ha compromesso la sua determinazione:

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	3 giorni	150	150	150	7.579	2.246	716,45	31,8
21.03.2019	14 giorni	151	150	150	7.612	2.248	963,35	42,7

La prova di determinazione della *Profondità di penetrazione dell'acqua* sotto pressione:

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	16,04

La prova di determinazione della *Resistenza alla carbonatazione*:

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	0

4. Calcestruzzo SCC con CEM IV A/V 42.5R, aggregati naturali e 30% aggregati riciclati

Definita la classe di resistenza = C25/30 e C30/37; la classe di consistenza = SCC; la classe di esposizione = XC1-XC2-XC3-XC4; diametro massimo dell'inerte = 26 mm; rapporto a/c = 0,506 e dosaggio additivo superfluidificante rispetto alla massa di cemento = 1,25%, si è definita:

- **Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità**

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	49%
Pietrisco calcareo 6-16	21%

Graniglia calcarea 10-20	0%
Aggregati riciclati	30%

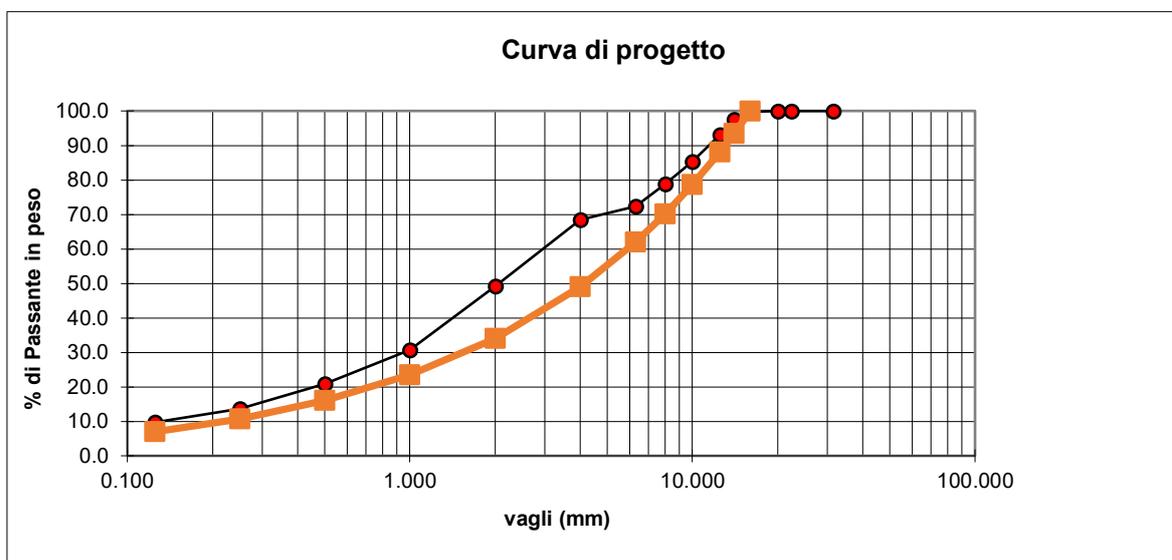


Figura 112: curva granulometrica di Bolomey SCC

- Composizione della miscela del conglomerato cementizio**

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) – Miscela teorica	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg) – Miscela corretta
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	407	403
Additivo Superfluidificante: 120	5,39	5,34
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	817	809
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	353	349
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	0	0
Aggregato 4: Aggregato riciclato	492	487
Acqua:	196	204
Totale calcestruzzo	2270	2257

Si osserva che nelle due miscele i valori non coincidono, in quanto inizialmente si sono rispettate le quantità reali utilizzate per gli altri 2 mix di SCC, ma durante l'impasto la matrice cementizia, che non presentava la consistenza attesa di questo tipo di calcestruzzi

quindi fluida, ha richiesto un quantitativo maggiore di acqua (+0,25 kg). Si è ottenuto così, come si vedrà nella prova dello “slump flow” la giusta consistenza di un SCC, ma con diverso rapporto a/c rispetto ai mix precedenti. Inoltre, si è notata anche una maggiore segregazione sul fondo durante il riempimento dei provini. Motivo di ciò, può essere la diversa granulometria e natura degli aggregati riciclati.



Figura 113: differenza impasto cementizio senza additivo (sinistra) e con additivo superfluidificante (centro) e con aggiunta finale di acqua (destra)

- Prove su calcestruzzo fresco

Prova di spandimento “slump flow”:		SCC
Consistenza	mm	680-670



Figura 114: “slump flow”

Determinazione della massa volumica:	kg/m³	2196
--------------------------------------	-------------------------	-------------

- **Prove su calcestruzzo indurito**

La prova di *Resistenza a compressione*, per mancanza di tempo, è stata effettuata solo fino a 14 giorni, ma questo non ha compromesso la sua determinazione:

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	3 giorni	151	150	150	7.432	2.187	649,75	28,7
21.03.2019	14 giorni	151	150	150	7.469	2.206	888,34	39,4

La prova di determinazione della *Profondità di penetrazione dell'acqua* sotto pressione:

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	24,77

La prova di determinazione della *Resistenza alla carbonatazione*:

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	1.6

Confronto dei risultati delle prove

- **Prove su calcestruzzo fresco**

Prova di abbassamento al cono "slump test":		S4
Consistenza	mm	200
Prova di spandimento "slump flow":		SCC
Consistenza	mm	600-680

Le prove allo stato fresco effettuate sulle diverse tipologie di calcestruzzo hanno verificato il raggiungimento della giusta consistenza e quindi della lavorabilità del materiale definita in partenza per ogni mix design, in base al tipo di struttura da realizzare, come definito dalle norme UNI EN 206 e UNI 11104. Si riportano quelle d'interesse al caso studio:

Tipo Calcestruzzo	Classe di consistenza	Slump (mm)	Tipologia di struttura
Ordinario	S4 (fluida)	160 – 200	Strutture mediamente armate
Autocompattante (SCC)	SF2	≥ 600	Strutture mediamente armate; Platee di fondazione; Pali di ponte

Nel caso degli SCC è stata fatta la media dei valori dei 3 mix design (senza e con aggregati riciclati), ricordando che per il 4° mix, ovvero SCC con il 30% di aggregati riciclati, il valore ottimale di consistenza è stato ottenuto aggiungendo 0,25 kg/m³ di acqua rispetto agli altri mix, facendo variare anche il rapporto a/c (da 0,482 a 0,506). Inoltre, sempre per questo, si è osservata una maggiore segregazione sul fondo del materiale rispetto agli altri calcestruzzi. Come già detto, il motivo di ciò può ritrovarsi nella diversa natura dell'aggregato riciclato, ovvero calcestruzzo demolito con ridotta vita nominale e materiale inerte vario come l'asfalto, e dalla difficoltà selettiva del materiale riscontrata in fase di demolizione.

- **Prove su calcestruzzo indurito**

Per la prova di *Resistenza a compressione* si confrontano i risultati a 14 giorni:

Tipologia Calcestruzzo	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
Ordinario (non vibrato)	153	150	150	7.813	2.269	848,59	37,0
Ordinario (vibrato)	150	150	150	7.751	2.297	945,10	42,0
SCC 0% aggregati riciclati	150	150	150	7.692	2.287	968,53	43,2
SCC 5% aggregati riciclati	151	150	150	7.612	2.248	963,35	42,7
SCC 30% aggregati riciclati	151	150	150	7.469	2.206	888,34	39,4

Tabella 17: tabella di confronto – prova resistenza a compressione

Si osserva, che dai risultati è stato dimostrato che effettivamente il calcestruzzo autocompattante (SCC) ha una resistenza alla compressione maggiore rispetto all'ordinario, sia nel caso in cui non si inseriscono inerti riciclati sia con il 5% di aggregati riciclati. Mentre il valore si riduce del 6% per SCC con il 30% di aggregati riciclati rispetto a quello relativo al calcestruzzo ordinario vibrato.

Si confrontano i risultati della prova di determinazione della *Profondità di penetrazione dell'acqua* sotto pressione:

Tipo Calcestruzzo	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
Ordinario (non vibrato)	150	150	150	500	72	21,86
Ordinario (vibrato)	150	150	150	500	72	13,93
SCC 0% aggregati riciclati	150	150	150	500	72	16,69
SCC 5% aggregati riciclati	150	150	150	500	72	16,04
SCC 30% aggregati riciclati	150	150	150	500	72	24,77

Tabella 18: tabella di confronto – prova di determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua

Si osserva che l'SCC con il 30% di aggregati riciclati supera il valore ottimale imposto dalla norma pari a 20 per calcestruzzi impermeabili e/o immersi in acqua.



Figura 115: prova di penetrazione all'acqua – provino calcestruzzo ordinario



Figura 116: prova di penetrazione all'acqua – provino SCC 0% aggregati riciclati



Figura 117: prova di penetrazione all'acqua – provino SCC 5% aggregati riciclati



Figura 118: prova di penetrazione all'acqua – provino SCC 30% aggregati riciclati

Infine, si confrontano i risultati della prova di determinazione della *Resistenza alla carbonatazione*:

Tipo Calcestruzzo	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
Ordinario (non vibrato)	100	100	100	10	14	8,8
Ordinario (vibrato)	100	100	100	10	14	1,4
SCC 0% aggregati riciclati	100	100	100	10	14	0
SCC 5% aggregati riciclati	100	100	100	10	14	0
SCC 30% aggregati riciclati	100	100	100	10	14	1,6

Tabella 19: tabella di confronto – prova di determinazione della resistenza alla carbonatazione

Si osserva che per gli SCC con 0% e 5% di aggregati riciclati non avviene la carbonatazione, e che quindi si dimostra l'effettivo miglioramento di risposta del materiale, mentre con il

30% di materiale riciclato il valore di profondità è simile al valore raggiunto nel caso del calcestruzzo ordinario vibrato.

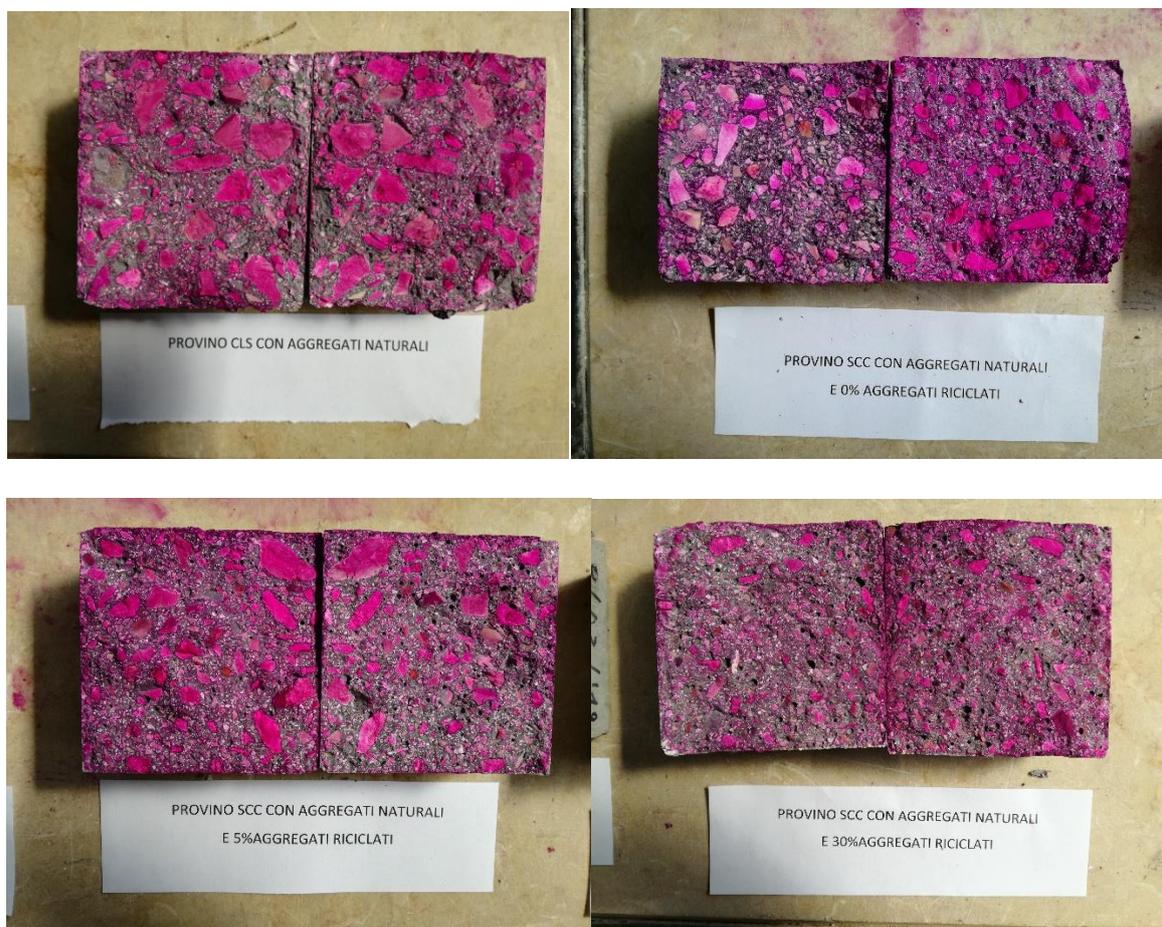


Figura 119: prova di carbonatazione – confronto tra i 4 mix design

In conclusione, si può affermare che i calcestruzzi autocompattanti (SCC) permettono effettivamente di migliorare le prestazioni in termini di durabilità del materiale rispetto al calcestruzzo ordinario. L'SCC con soli aggregati naturali e quello il 5% di aggregati naturali hanno risultati simili per ogni prova svolta, questo perché tale percentuale espressa in quantità effettiva di materiale risulta davvero piccola. Lo stesso non si può dire se si aumenta la percentuale di aggregato riciclato all'interno del mix al 30% a causa della elevata porosità e della bassa resistenza dell'aggregato. Si può però notare che comunque le prestazioni di quest'ultimo si avvicinano notevolmente a quelle del calcestruzzo ordinario; per tanto non si esclude il suo utilizzo in sostituzione dello stesso. Inoltre un mix con una percentuale maggiore di materiale riciclato ha diversi vantaggi di "sostenibilità ambientale". Infatti, se si confrontano gli impatti ambientali associati al ciclo di vita produttivo degli inerti naturali

e riciclati, si ottengono sensibili riduzioni nelle emissioni dovute alle lavorazioni di questi ultimi. Inoltre, si risolvono anche i problemi relativi agli spazi per la dismissione dei rifiuti. Oltretutto, qualora si valutino le emissioni dovute alla produzione di inerti provenienti da impianti integrati, dove cava e impianto di riciclo di rifiuti da costruzione e demolizione co-esistono, esse sono comunque inferiori a quelle di un impianto di sola estrazione. Tale riduzione può essere compensata tramite un incremento nella capacità di delivery degli inerti nel mercato, ed è significativa anche per quanto riguarda il consumo di suolo per cui le numerose norme con i loro valori sempre più restrittivi comporterà tra breve tempo di non poter più estrarre altro materiale inerte dalle cave, di cui soprattutto la Puglia ha fatto sempre tesoro.

3.3 Confronto dei vantaggi e svantaggi

Al fine di concludere il lavoro di tesi si sono riassunti in questo paragrafo tutti i vantaggi e gli svantaggi derivanti dall'applicazione delle soluzioni progettuali pensate per il caso studio che prevedono l'utilizzo di diverse tipologie di calcestruzzo "innovativo", come ampiamente descritto. Inoltre, per un'accurata analisi si sono suddivisi i vantaggi e gli svantaggi individuati per la fase di costruzione dell'opera progettata e quelli per la fase di manutenzione e/o gestione dello stesso fino alla fine della sua vita nominale (precedentemente definita ≥ 50 anni).

Fase di costruzione

Vantaggi:

1. L'attenzione alla scelta dei vari componenti che costituiscono il calcestruzzo, ovvero CEM IV A/V 42.5R e gli aggregati riciclati provenienti dalla demolizione dell'edificio esistente sul lotto di progetto, lo rendono un calcestruzzo sostenibile; unito alla soluzione tecnologica del calcestruzzo drenante per la viabilità esterna in sostituzione dell'asfalto tradizionale e alla provenienza locale del materiale permettono il **raggiungimento dei criteri minimi ambientali** (si fa riferimento al paragrafo relativo ai "CAM" delle "Soluzioni progettuali").
2. Sempre l'utilizzo di filler calcarei e pozzolana a base di cenere volanti all'interno del mix-design del calcestruzzo permette, oltre a ottenere un calcestruzzo sostenibile al livello ambientale, di ridurre la percentuale di acqua nell'impasto con lo scopo di ridurre il

fenomeno del ritiro idraulico, modo da evitare fenomeni fessurativi, ma permette anche di **ridurre i fenomeni di segregazione e di essudazione di acqua da bleeding**. Tutto questo avviene anche grazie all'utilizzo di additivi superfluidificanti presenti nel mix-design del calcestruzzo prescelto.

3. L'utilizzo dei calcestruzzi fluidi, in particolare degli SCC, grazie alla sua consistenza (fluida) permette al materiale di avvolgere meglio i ferri di armatura, facilitando la messa in opera dello stesso, eliminando i tempi necessaria alla vibrazione (costipamento) del calcestruzzo durante la messa in opera e quindi **ridurre i tempi di messa in opera del materiale (e relativi costi), di attrezzatura da cantiere e anche i costi della manodopera**.
4. In particolare, il calcestruzzo per facciavista permette di **eliminare i materiali da rifinitura e quindi ridurre i costi di materiale e manodopera**.
5. Sempre l'utilizzo dei calcestruzzi fluidi, proprio per la mancata necessità di vibrazione del materiale, consente di **ridurre i rumori correlati e quindi gli impatti acustici**, che sono causa di malattie post-lavorative. Infatti la vibrazione rappresenta uno degli aspetti meno gratificanti per la fatica dell'operazione e per alcune tipiche malattie che ne derivano, come la sordità e le cosiddette "dita bianche" per chi ha difetti di circolazione del sangue.
6. L'utilizzo del calcestruzzo leggero strutturale, in quanto con isolamento termico e acustico, permette di ridurre i materiali utilizzati a tal fine e di **ridurre i relativi costi ma anche i costi di posa in opera degli stessi**.
7. L'utilizzo di calcestruzzo leggero strutturale, in quanto leggero perché con minore peso specifico, consente di ridurre il peso proprio e quindi **ridurre i carichi che agiscono sulla struttura portante**. In alcuni casi questo comporta una riduzione dimensionale degli elementi strutturali e/o eliminazioni di alcuni di essi in modo da ottimizzare anche la struttura stessa, ad esempio permettendo di avere luci più ampie.
8. L'utilizzo del calcestruzzo drenante con la sua elevata porosità, permette di smaltire l'acqua piovana senza dover prevedere e installare un impianto di raccolta e smaltimento della stessa (tubazioni e tombini) e quindi di **eliminare i costi** ad esso relativi, in quanto

è previsto un sistema di canalette e vasche esterne di raccolta d'acqua (si rimanda alla relativa scheda tecnica presente nel paragrafo delle “Soluzioni progettuali”).

Svantaggi:

1. A parità di costi di trasporto del materiale, in quanto proviene dallo stesso impianto di produzione del calcestruzzo, a causa del diverso mix design (per ogni soluzione progettuale) ha un **costo maggiore** al m³. Tali prezzi sono confrontabili nel paragrafo relativo all'analisi dei costi. Nello stesso paragrafo si può osservare che, anche se il costo in sé del calcestruzzo “innovativo” è maggiorato rispetto a quello “tradizionale”, analizzando anche i tempi di messa in opera e i relativi costi, in realtà si ha una riduzione del costo complessivo di costruzione del fabbricato.
2. L'utilizzo del calcestruzzo fluido, in particolare gli SCC, prevedono l'utilizzo di una particolare casseforme (al posto delle classiche con tavole di legno) per evitare la fuoriuscita del calcestruzzo stesso proprio perché molto fluido. Tale casseforme è costituita da elementi in acciaio e la loro fabbricazione è riservata a poche aziende (vedere “Parte Prima” il paragrafo relativo al “Calcestruzzo autocompattante”), questo determina un **costo maggiorato rispetto ai casseri utilizzati usualmente in cantiere**. Tale problema però, in base alle informazioni requisite dalla scheda tecnica del materiale, è risolvibile per platee di fondazione di al massimo 50 cm di altezza, come nel caso studio, utilizzando all'interno dei classici casseri in legno una schiuma poliuretanica che garantisce la non fuoriuscita di materiale (vedere Smart-SCC60 nel paragrafo relativo alle “Soluzioni progettuali”). Tali variazioni di posa in opera sono state considerate sempre nell'analisi dei costi.

Fase di manutenzione

Vantaggi:

1. Migliorando la composizione del mix-design con particolare attenzione al rapporto a/c, agli aggregati e agli additivi utilizzati, e quindi migliorando la segregazione del materiale (si rimanda al paragrafo relativo al “Calcestruzzo autocompattante” presente nella “Parte Prima”), si ottiene anche un **miglioramento della durabilità del materiale** stesso.

2. L'utilizzo degli SCC consente di ottenere una **maggiore durabilità delle strutture**, in quanto la sua fluidità permette di coprire l'intera armatura riducendo i vuoti interstiziali, quindi maggiore compattezza, cause di degrado e attacco degli agenti atmosferici. Questo può essere dimostrato in parte con le prove effettuate in laboratorio (vedere paragrafo relativo alle prove effettuate nei laboratori della Tecnoprove) di resistenza alla carbonatazione e di permeabilità all'acqua.
3. Migliorando la durabilità sia del materiale che delle strutture si **riducono i costi di manutenzione** ad essi relativi. La norma UNI 11257:2007 "Manutenzione dei patrimoni immobiliari – Criteri per la stesura del piano e del programma di manutenzione dei beni edilizi – Linee guida" fornisce i criteri in base ai quali elaborare i piani e i programmi per lo svolgimento delle attività manutentive sia sugli edilizi esistenti che in quelli in costruzione, indipendentemente dalla destinazione d'uso.
4. In particolare nel calcestruzzo facciavista, il mix-design con processo di fotocatalisi consente di eliminare la resistenza alla luce, l'attacco degli agenti atmosferici, riducendo il degrado fisico e chimico, come ad esempio rigonfiamenti e gli effetti fessurativi dovuti all'umidità, con vantaggi anche sull'autopulizia dello stesso, in modo da **ridurre i costi relativi alla manutenzione**, i quali corrispondono ai costi di rifinitura presenti nell'analisi costi.
5. L'utilizzo del calcestruzzo drenante, prevedendo anche sistemi in canalette e vasche esterne all'area utilizzata, consente di raccogliere l'acqua piovana in eccesso e utilizzarla per irrigazione delle aree verdi e/o per l'impianto di scarico e/o altri usi, in modo da **ridurre i consumi di acqua potabile**.
6. Inoltre, il calcestruzzo drenante è anche fotoluminescente, il quale permette di assorbire energia solare nelle ore diurne e rimettere tale energia nella notte (lentamente per 6 ore), in modo da poter **ridurre anche le spese relative all'impianto di illuminazione**.

Svantaggi:

Non sono stati individuati svantaggi che riguardano la fase di manutenzione, anzi si è dimostrato che effettivamente i calcestruzzi "innovativi", sono tali in quanto le diverse soluzioni tecnologiche permettono di risolvere quei problemi riscontrati con il calcestruzzo "tradizionale" e i relativi costi per la risoluzione degli stessi, anche in termini di durabilità.

Si può solo osservare che, essendo materiali appunto “innovativi”, non esistono esempi costruttivi realmente realizzati da tempo (≥ 50 anni) che dimostrano l’effettiva maggiore durabilità del materiale in sé e quindi anche di tutta la struttura e quindi anche di resistenza, come la resistenza alle azioni sismiche. Ci si può basare, però per ora, sulle innumerevoli prove e controlli che ogni giorno i ricercatori collocati in tutta Italia (alcuni esempi sono i laboratori di Italcementi; dei Politecnici come Torino, Milano e Bari; della Enco srl...) effettuano sulle diverse tipologie tecnologiche ad oggi individuate e anche per tutte quelle che sono in fase di sperimentazione; prove che permettono di capire e conoscere il materiale nella sua totalità.

Conclusioni



In questo paragrafo conclusivo si vuole sottolineare l'entusiasmo per i risultati raggiunti nel lavoro di tesi, i quali coincidono con gli obiettivi prefissati inizialmente. Grazie all'evoluzione tecnologica che ha visto come protagonista il calcestruzzo, e che continua tutt'oggi a farlo, è possibile ridare fiducia ad un materiale che è stato importante nella storia delle costruzioni civili, che ha permesso a molte persone di lavorare e che la crisi economica degli ultimi anni non deve fermare. Infatti è stato più volte scritto che se da un lato la ricerca tecnologica è in continua crescita, d'altra parte è quasi nulla la richiesta e quindi la produzione di questi "nuovi" prodotti (sia "innovativi" che "sostenibili"). Questo è dovuto ai pregiudizi culturalmente ingiustificati, i quali danno più importanza al dover risparmiare sul materiale rispetto alla qualità dello stesso, che mira a garantire una maggiore durabilità delle costruzioni proprio per prevenire tanti crolli e quindi perdite delle vite umane, senza sapere però che è possibile avere entrambe le cose, ovvero un buon rapporto qualità/prezzo; e alla latitanza di indirizzi politici responsabili che non incentivano l'utilizzo di questi stessi materiali.

Invece, risultati migliorativi in termini di prestazioni erano attesi nei confronti dei calcestruzzi con aggregati di cui il 30% di materiale riciclato; ma come si è potuto verificare toccando con mano l'aggregato riciclato, questo anche se proveniente da solo calcestruzzo post-consumer, presenta al suo interno residui di altri materiali da costruzione (mattoni forati, isolante ecc.) e terreno i quali riducono la resistenza dell'inerte e quindi del calcestruzzo; motivo confermato dai tecnologi che lavorano nella cementeria dalla quale è stato reperito il materiale riciclato.

In realtà studi di questo tipo sono già stati ampiamente svolti, sia sulla maggiore durabilità dei calcestruzzi "innovativi" che sul margine massimo pari proprio al 30% di materiale riciclato da utilizzare nel confezionamento di calcestruzzi strutturali, ma il lungo e difficile lavoro di ricerca e reperimento dei dati necessari a tale studio (il quale è durato più del tempo impiegato per la parte sperimentale), è stato il motivo di tale sperimentazione. Infatti, a seguito del percorso di tirocinio formativo in cui è stato seguito il cantiere per la realizzazione delle ville residenziali soggette del caso studio, che si è sviluppata la passione per l'ingegneria applicata alle strutture portanti ed in particolare al calcestruzzo e alla sua continua evoluzione, tanto da farne l'argomento di tesi; ma le grandi aziende produttrici di calcestruzzo non sempre si sono rese disponibili al reperimento dei dati richiesti per tale studio, costringendo la sottoscritta a prendere strade alternative. Inoltre, il lavoro di tesi è stato svolto a Bari, sede del caso applicativo, e le cementerie locali non producono questi tipi di calcestruzzo. Gli stessi produttori motivano che le cause sono da ritrovare nella

mancanza di incentivi statali nella produzione e utilizzo degli stessi; il basso utilizzo dapprima nei lavori pubblici e privati anche a causa del costo del materiale; la mancata esigenza al cambiamento e al miglioramento soprattutto da parte dei progettisti che tendono sempre a utilizzare materiali tradizionali. A seguito di questo si è pensato di dimostrare che tutto ciò è solo frutto di pregiudizi, come prima detto, e che questi possono essere superabili e che è possibile rendere le strutture più durevoli, resistenti e anche sostenibile.

Infine, istruttivo è stato anche il periodo di reperimento del materiale necessario per la composizione dei diversi mix design del caso studio, in cui si è potuto seguire la fase di produzione del calcestruzzo, dal reperimento degli inerti dalle cave, alla macinazione, alle modalità di miscela, alla composizione dei diversi mix-design e alle prove svolte in laboratorio, a cui la sottoscritta ha personalmente partecipato. A tal proposito si ringraziano la “Troilo S.r.l.” di Putignano (BA) e il laboratorio “Tecnoprove” di Ostuni (BR), i quali erano entusiasti di aiutarmi in questo lavoro di tesi, in quanto anch’essi hanno creduto alla validità delle mie ipotesi successivamente dimostrate.

Speranze future sono quelle di poter progettare e realizzare davvero strutture di questo tipo.

Bibliografia

- Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17.01.2018;
- M.Collepari; “Il nuovo Calcestruzzo”;
- M.Collepari, S. Collepari, R. Troli; “Mix Design del Calcestruzzo”;
- Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici- Servizio Tecnico Centrale “Linee guida sul Calcestruzzo”;
- Circolare del 02/02/2009 n°617. Istruzione per l’applicazione delle nuove norme tecniche delle Costruzioni del 14/01/2008;
- Linee guida per la prescrizione delle opere in cemento armato “PROGETTO CONCRETE”;
- UNI-EN 206-1 Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
- UNI 11040 Calcestruzzo autocompattante - Specifiche, caratteristiche e controlli;
- UNI-EN 11104 Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Istruzioni complementari per l’applicazione della EN 206;
- UNI-EN 197-1 Cemento. Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni;
- UNI-EN 12620 Aggregati per calcestruzzo;
- UNI-EN 934-2 Additivi per calcestruzzo;
- UNI-EN 1008 Acqua di impasto;
- UNI-EN 12350-2 Prova di Abbassamento al cono di Abrams - Slump test;
- UNI-EN 12350-6 Massa Volumica del calcestruzzo fresco;
- UNI-EN 12350-7 Determinazione del contenuto di aria nell’impasto;
- UNI-EN 12350-8 Calcestruzzo autocompattante - Prova di spandimento e del tempo di spandimento;
- UNI-EN 12350-12 Calcestruzzo autocompattante - Prova di scorrimento confinato mediante anello a J;
- UNI-EN 12390-1 Prove su calcestruzzo indurito. Forma, dimensioni e dagli requisiti per provini e per casseforme;
- UNI-EN 12390-2 Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza;
- UNI-EN 12390-3 Prova su calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione dei provini;

- UNI-EN 12390-4 Prova su calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione. Specifiche per macchina di prova;
- UNI-EN 12390-8 Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione;
- UNI-EN 13295- Prova di resistenza alla carbonatazione.

Sitografia

- www.ingenio.it
- www.wikipedia.org
- www.biblus.acca.it
- www.rinnovabili.it
- www.infobuild.it
- www.casaclima.com
- www.lavoripubblici.it/news
- www.progedi90.it
- www.architetto.info
- www.italcementi.it
- www.encosrl.it
- www.colabeton.it

Allegato “tabelle di calcolo”



1. Calcolo Area e Volume di Calcestruzzo previsto dal caso studio

Fondazioni						
	n°	base (cm)	altezza (cm)	lunghezza (cm)	Area totale (cm ²)	Volume totale (cm ³)
Muro Contenimento	2	20	300	2780	111200	33360000
	2	20	300	1320	52800	15840000
Travi esterne	2	50	50	2780	278000	13900000
	2	50	50	1320	132000	6600000
Travi interne	6	70	50	360	151200	7560000
	6	70	50	470	197400	9870000
	3	70	50	460	96600	4830000
	6	70	50	450	189000	9450000
	6	70	50	420	176400	8820000
Totale calcestruzzo						110230000

1°Impalcato						
	n°	base (cm)	altezza (cm)	lunghezza (cm)	Area totale (cm ²)	Volume totale (cm ³)
Cordolo	2	20	25	2780	111200	2780000
	2	20	25	1320	52800	1320000
	2	20	25	400	16000	400000
Travi	6	40	25	440	105600	2640000
	6	40	25	465	111600	2790000
	1	40	25	470	18800	470000
	2	60	25	470	56400	1410000
	12	60	25	640	460800	11520000
Pilastrini	12	30	300	40	14400	4320000
	4	30	300	50	6000	1800000
	2	30	300	30	1800	540000
Piastra	1	450	25	470	211500	5287500
Solaio (massetto)	1	2670	5	1280	1367040	6835200
Totale calcestruzzo						42112700

2°Impalcato						
	n°	base (cm)	altezza (cm)	lunghezza (cm)	Area totale (cm ²)	Volume totale (cm ³)
Rompitratta	4	30	25	960	115200	2880000
Travi	2	60	30	855	102600	3078000
	3	60	30	470	84600	2538000
	2	60	30	854	102480	3074400
	4	60	30	1080	259200	7776000
Pilastrini	16	30	300	40	19200	5760000
Solaio (massetto)	1	2540	5	1080	1097280	5486400
Totale calcestruzzo						30592800

Facciata						
	n°	base (cm)	altezza (cm)	lunghezza (cm)	Area totale (cm²)	Volume totale (cm³)
	2		20		310000	12400000
	2		20		162000	6480000
Totale calcestruzzo					944000	18880000

2. Costo di costruzione previsto per il caso studio

PROSPETTO DI CALCOLO COSTI DI COSTRUZIONE		
A) URBANIZZAZIONE PRIMARIA		
100% SUPERFICIE UTILE		€ 21.642,93
50% SUPERFICIE NON RESIDENZIALE		€ 18.363,78
TOTALE		€ 40.006,72
B) URBANIZZAZIONE SECONDARIA		
100% SUPERFICIE UTILE		€ 12.836,62
50% SUPERFICIE NON RESIDENZIALE		€ 10.891,73
TOTALE		€ 23.728,35
C) CONTRIBUTO SUL COSTO DI COSTRUZIONE 5%		
100% SUPERFICIE UTILE		€ 12.687,85
60% SUPERFICIE NON RESIDENZIALE		€ 12.918,60
TOTALE		€ 25.606,45
TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE (A+B+C)		
		€ 89.341,52
COSTO DI COSTRUZIONE (180 Giorni)		
		€ 496,34

3. Confronto costo di costruzione per partizione architettonica

Fondazioni-Caso reale					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-CLS	m³	3	110,23	134,4	14814,912
Vibratura	m³	3	3	5,58	1845,2502
Operaio- Specializzato	h	3	12	28,14	337,68
Operaio-Qualificato	h	3	12	26,15	313,8
Operaio-Comune	h	3	12	23,55	282,6
Totale €	g	3	3	/	17594,2422

Fondazioni-Caso progetto					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-SCC	m³	2	110,23	161,89	17845,1347
Schiuma poliuretanic casseri	l	1	30	10,8	324
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Qualificato	h	2	8	26,15	209,2

Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Totale €	g	2	2	/	18791,8547
Differenza giornate	g	1	1	496,34	496,34
Totale effettivo €					18295,5147

Facciata-Caso reale					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-CLS	m ³	2	18,88	134,4	2537,472
Vibratura	m ³	2	2	5,58	210,7008
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Qualificato	h	2	8	26,15	209,2
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Opere rifinitura	m ²	11	94,4	48,8	4606,72
Operaio- Specializzato	h	11	44	28,14	1238,16
Operaio-Qualificato	h	11	44	26,15	1150,6
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Totale €	g	13	13	/	10366,3728

Facciata-Caso progetto					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Calcestruzzo-Facciavista	m ³	1,5	18,88	180	3398,4
Vibratura	m ³	0	0	5,58	0
Operaio- Specializzato	h	1,5	6	28,14	168,84
Operaio-Qualificato	h	1,5	6	26,15	156,9
Operaio-Comune	h	1,5	6	23,55	141,3
Opere rifinitura	m ²	0	0	48,8	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Qualificato	h	0	0	26,15	0
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Casseformi per facciavista	m ³	1,5	94,4	14,18	1338,592
Totale €	g	1,5	1,5	/	5204,032
Differenza giornate	g	11,5	11,5	496,34	5707,91
Totale effettivo €					-503,878

Partizioni orizzontali-Caso reale					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Solaio	m ²	6	246,432	79,3	19542,0576
Massetto-CLS	m ³	4	12,3216	134,4	1656,02304
Vibratura	m ³	4	4	5,58	275,018112
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Qualificato	h	10	40	26,15	1046
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Isolante termico	m ²	2	246,432	7,95	1959,1344

Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Isolante termico	m ²	2	246,432	5,4	1330,7328
Operaio- Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Specializzato	h	2	8	28,14	225,12
Operaio-Comune	h	2	8	23,55	188,4
Opere rifinitura	m ²	10	246,432	55,5	13676,976
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Totale €	g	24	24	/	46024,02195

Partizioni orizzontali-Caso progetto					
	Unità	Giornata-lavoro	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo complessivo
Solaio (Alleggerito)	m ²	6	246,432	73,8	18186,6816
Massetto-Alleggerito (S3)	m ³	4	12,3216	236,68	2916,276288
Vibratura	m ³	4	4	5,58	275,018112
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Qualificato	h	10	40	26,15	1046
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Isolante termico	m ²	0	0	7,95	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Isolante termico	m ²	0	0	5,4	0
Operaio- Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Specializzato	h	0	0	28,14	0
Operaio-Comune	h	0	0	23,55	0
Opere rifinitura	m ²	10	246,432	55,5	13676,976
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio- Specializzato	h	10	40	28,14	1125,6
Operaio-Comune	h	10	40	23,55	942
Totale €	g	20	20	/	41361,752
Differenza giornate	g	4	4	496,34	1985,36
Totale effettivo €					39376,392

	Totale costo di costruzione Caso reale	Totale costo di costruzione Caso progetto
€	73984,63695	57168,0287
Differenza €	16816,60825	

Allegato “rapporto di prova”



Calcestruzzo ordinario	Provino non vibrato
Committente:	Vinci Alessandra
Oggetto dei Lavori:	Tesi Magistrale in Ingegneria Edile
Oggetto delle Prove:	Prequalifica miscele di conglomerato cementizio
Normative di riferimento:	UNI EN 206, UNI EN 11104 e CSA ANAS
Classe di resistenza:	Rck 30-37 N/mm ²
Classe di consistenza:	S4
Classe di esposizione:	XC1-XC2-XC3-XC4
Diametro max inerte:	26 mm

PREMESSA

In data 08.03.2019, sono pervenuti presso questo laboratorio i seguenti campioni, da utilizzare nella pre-qualifica di miscele di conglomerato cementizio:

- **Aggregati provenienti dalla cava “Troilo S.r.l. – S.com. Corcione, 41 – 70017 Putignano (BA)” così dichiarati:**
SABBIA CALCAREA ASCIUTTA 0-4
PIETRISCO CALCAREO 6-16
GRANIGLIA CALCAREA 10-20
- **Aggregati provenienti dalla cava “Mallardi S.r.l. – Strada Tresca, 86 – 70121 Bari (BA)” così dichiarati:**
AGGREGATO GROSSO PROVENIENTE DA RICICLO DI CALCESTRUZZI POST-CONSUMER E MATERIALI INERTI
- **Cemento della Cementeria COLACEM S.p.A. – del tipo:**
CEM IV/A-V 42,5R

- **Additivo Superfluidificante del tipo:**

120

Di seguito si riportano i risultati delle prove eseguite, relative alla qualificazione del conglomerato cementizio confezionato:

MISCELA DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO

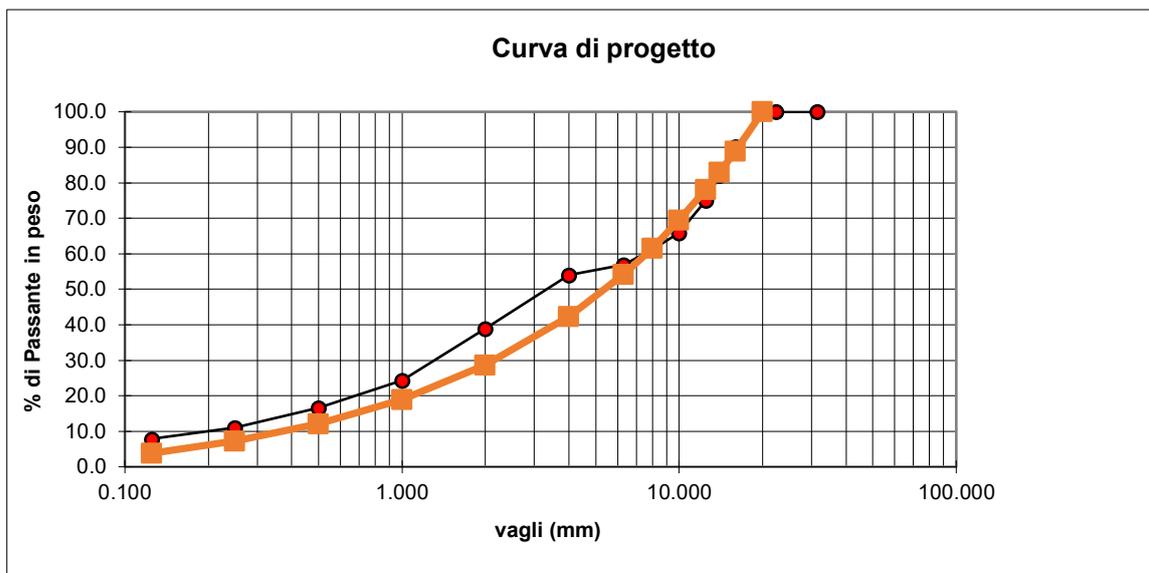
Utilizzando i materiali consegnati al laboratorio, dalle caratteristiche riportate nelle pagine precedenti, è stata qualificata la miscela di calcestruzzo dalle seguenti caratteristiche:

Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	55%
Pietrisco calcareo 6-16	20%
Graniglia calcarea 10-20	25%
Aggregati riciclati	0%

Distribuzione granulometrica della miscela di aggregati dosati nelle percentuali sopra indicate

Apertura stacci (mm)	% di passante
	Curva di progetto
31,500	100,00
22,400	100,00
20,000	100,00
16,000	90,20
14,000	82,06
12,500	75,01
10,000	65,97
8,000	61,23
6,300	56,85
4,000	54,06
2,000	38,90
1,000	24,42
0,500	16,66
0,250	11,02
0,125	7,89
0,063	6,33



Miscela del conglomerato cementizio

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg)
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	350
Additivo Superfluidificante: 120	2,97
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	984
Aggregato 2: Pietrisco calcarea 6-16	360
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	450
Aggregato 4: Aggregato riciclato	0
Acqua:	170
Totale calcestruzzo	2318

Rapporto A/C	0,486
Dosaggio additivo Superfluidificante rispetto alla massa del cemento	0,8 %
Classe di esposizione secondo UNI EN 206 e UNI EN 11104	XC1 - XC2 - XC3 - XC4
Diametro massimo Aggregato	26 mm

PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO

1. Determinazione dell'abbassamento al cono "Slump test" UNI EN 12350-2

Prova di abbassamento al cono "slump test":		S4
Consistenza	mm	200

2. Determinazione della capacità di scorrimento "Slump flow" UNI EN 12350-8

Prova di spandimento "slump flow":		S4
Consistenza	mm	280-280

3. Determinazione della massa volumica – provino non vibrato (UNI EN 12350-6)

Determinazione della massa volumica:	kg/m³	2294
--------------------------------------	-------------------------	-------------

PROVE SU CALCESTRUZZO INDURITO

1. Resistenza a compressione (UNI EN 12390-3)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Prova a compressione a 3 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	1	151	150	150	7.798	2.295	625,82	27,6

Prova a compressione a 14 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
21.03.2019	1	153	150	150	7.813	2.269	848,59	37,0

2. Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (UNI EN 12390-8:2002)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Data inizio prova: 21.03.2019

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	21,86

La determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione è stata eseguita in accordo con la norma "UNI EN 12390-8 giugno 2002", non ci sono stati trafiletti di acqua nei 2 provini.

3. Determinazione della resistenza alla carbonatazione (UNI EN 13295)

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	8,8

Calcestruzzo ordinario	Provino vibrato
Committente:	Vinci Alessandra
Oggetto dei Lavori:	Tesi Magistrale in Ingegneria Edile
Oggetto delle Prove:	Prequalifica miscele di conglomerato cementizio
Normative di riferimento:	UNI EN 206, UNI EN 11104 e CSA ANAS
Classe di resistenza:	Rck 30-37 N/mm ²
Classe di consistenza:	S4
Classe di esposizione:	XC1-XC2-XC3-XC4
Diametro max inerte:	26 mm

PREMESSA

In data 08.03.2019, sono pervenuti presso questo laboratorio i seguenti campioni, da utilizzare nella pre-qualifica di miscele di conglomerato cementizio:

- **Aggregati provenienti dalla cava “Troilo S.r.l. – S.com. Corcione, 41 – 70017 Putignano (BA)” così dichiarati:**
SABBIA CALCAREA ASCIUTTA 0-4
PIETRISCO CALCAREO 6-16
GRANIGLIA CALCAREA 10-20
- **Aggregati provenienti dalla cava “Mallardi S.r.l. – Strada Tresca, 86 – 70121 Bari (BA)” così dichiarati:**
AGGREGATO GROSSO PROVENIENTE DA RICICLO DI CALCESTRUZZI POST-CONSUMER E MATERIALI INERTI
- **Cemento della Cementeria COLACEM S.p.A. – del tipo:**
CEM IV/A-V 42,5R

- **Additivo Superfluidificante del tipo:**

120

Di seguito si riportano i risultati delle prove eseguite, relative alla qualificazione del conglomerato cementizio confezionato:

MISCELA DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO

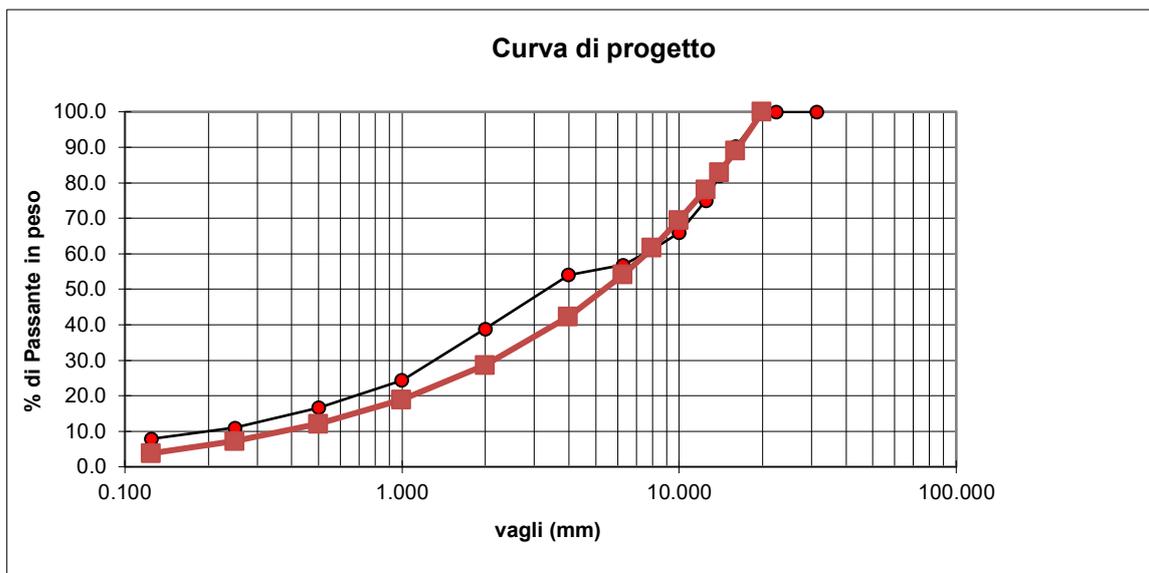
Utilizzando i materiali consegnati al laboratorio, dalle caratteristiche riportate nelle pagine precedenti, è stata qualificata la miscela di calcestruzzo dalle seguenti caratteristiche:

Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	55%
Pietrisco calcareo 6-16	20%
Graniglia calcarea 10-20	25%
Aggregati riciclati	0%

Distribuzione granulometrica della miscela di aggregati dosati nelle percentuali sopra indicate

Apertura stacci (mm)	% di passante
	Curva di progetto
31,500	100,00
22,400	100,00
20,000	100,00
16,000	90,20
14,000	82,06
12,500	75,01
10,000	65,97
8,000	61,23
6,300	56,85
4,000	54,06
2,000	38,90
1,000	24,42
0,500	16,66
0,250	11,02
0,125	7,89
0,063	6,33



Miscela del conglomerato cementizio

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg)
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	350
Additivo Superfluidificante: 120	2,97
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	984
Aggregato 2: Pietrisco calcarea 6-16	360
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	450
Aggregato 4: Aggregato riciclato	0
Acqua:	170
Totale calcestruzzo	2318

Rapporto A/C	0,486
Dosaggio additivo Superfluidificante rispetto alla massa del cemento	0,8 %
Classe di esposizione secondo UNI EN 206 e UNI EN 11104	XC1 – XC2-XC3-XC4
Diametro massimo Aggregato	26 mm

PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO

1. Determinazione dell'abbassamento al cono "Slump test" UNI EN 12350-2

Prova di abbassamento al cono "slump test":		S4
Consistenza	mm	200

2. Determinazione della capacità di scorrimento "Slump flow" UNI EN 12350-8

Prova di spandimento "slump flow":		S4
Consistenza	mm	280-280

3. Determinazione della massa volumica – provino vibrato (UNI EN 12350-6)

Determinazione della massa volumica:	kg/m³	2305
--------------------------------------	-------------------------	-------------

PROVE SU CALCESTRUZZO INDURITO

1. Resistenza a compressione (UNI EN 12390-3)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Prova a compressione a 3 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	1	151	150	150	0	0	0	0

Prova a compressione a 14 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
21.03.2019	1	150	150	150	7.751	2.297	945,10	42,0

2. Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (UNI EN 12390-8:2002)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Data inizio prova: 21.03.2019

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	13,93

La determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione è stata eseguita in accordo con la norma "UNI EN 12390-8 giugno 2002", non ci sono stati trafiletti di acqua nei 2 provini.

3. Determinazione della resistenza alla carbonatazione (UNI EN 13295)

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	1,4

Calcestruzzo autocompattante	0% aggregati riciclati
Committente:	Vinci Alessandra
Oggetto dei Lavori:	Tesi Magistrale in Ingegneria Edile
Oggetto delle Prove:	Prequalifica miscele di conglomerato cementizio
Normative di riferimento:	UNI EN 206, UNI EN 11104 e CSA ANAS
Classe di resistenza:	Rck 30-37 N/mm ²
Classe di consistenza:	SCC
Classe di esposizione:	XC1-XC2-XC3-XC4
Diametro max inerte:	26 mm

PREMESSA

In data 08.03.2019, sono pervenuti presso questo laboratorio i seguenti campioni, da utilizzare nella pre-qualifica di miscele di conglomerato cementizio:

- **Aggregati provenienti dalla cava “Troilo S.r.l. – S.com. Corcione, 41 – 70017 Putignano (BA)” così dichiarati:**
SABBIA CALCAREA ASCIUTTA 0-4
PIETRISCO CALCAREO 6-16
GRANIGLIA CALCAREA 10-20
- **Aggregati provenienti dalla cava “Mallardi S.r.l. – Strada Tresca, 86 – 70121 Bari (BA)” così dichiarati:**
AGGREGATO GROSSO 0-6 PROVENIENTE DA RICICLO DI CALCESTRUZZI POST-CONSUMER E MATERIALI INERTI
- **Cemento della Cementeria COLACEM S.p.A. – del tipo:**
CEM IV/A-V 42,5R

- **Additivo Superfluidificante della Ditta Sika del tipo:**

120

Di seguito si riportano i risultati delle prove eseguite, relative alla qualificazione del conglomerato cementizio confezionato:

MISCELA DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO

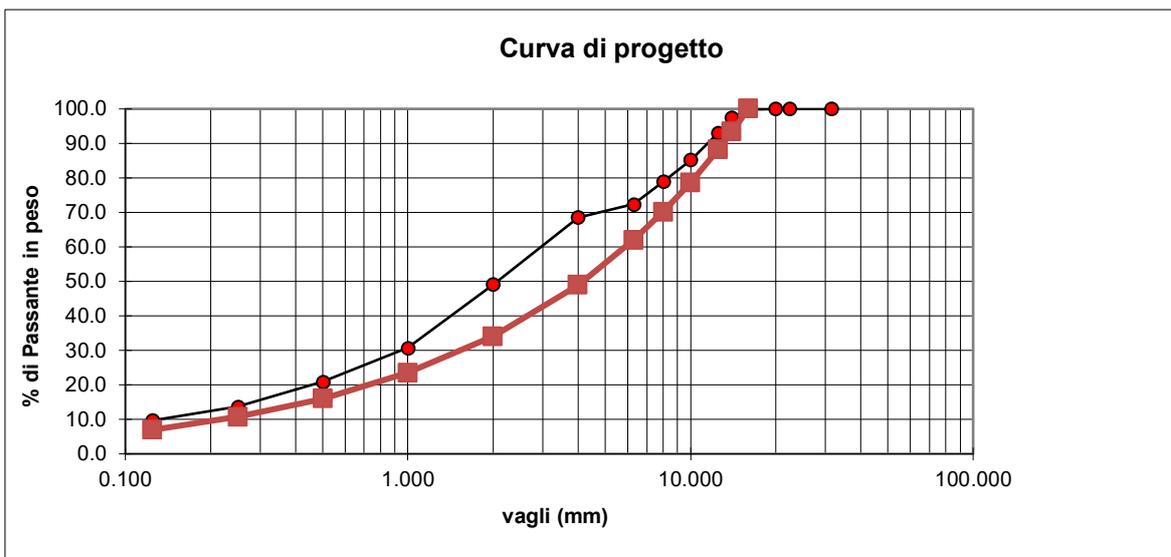
Utilizzando i materiali consegnati al laboratorio, dalle caratteristiche riportate nelle pagine precedenti, è stata qualificata la miscela di calcestruzzo dalle seguenti caratteristiche:

Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	70%
Pietrisco calcareo 6-16	30%
Graniglia calcarea 10-20	0%
Aggregati riciclati	0%

Distribuzione granulometrica della miscela di aggregati dosati nelle percentuali sopra indicate

Apertura stacci (mm)	% di passante Curva di progetto
31,500	100,00
22,400	100,00
20,000	100,00
16,000	99,71
14,000	97,53
12,500	92,99
10,000	85,25
8,000	78,88
6,300	72,31
4,000	68,52
2,000	49,17
1,000	30,75
0,500	20,87
0,250	13,69
0,125	9,71
0,063	7,85



Miscela del conglomerato cementizio

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg)
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	407
Additivo Superfluidificante: 120	5,39
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	1166
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	503
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	0
Aggregato 4: Aggregato riciclato	0
Acqua:	196
Totale calcestruzzo	2278

Rapporto A/C	0,482
Dosaggio additivo Superfluidificante rispetto alla massa del cemento	1,25 %
Classe di esposizione secondo UNI EN 206 e UNI EN 11104	XC1 – XC2-XC3-XC4
Diametro massimo Aggregato	26 mm

PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO

1. Determinazione della capacità di scorrimento “Slump flow” UNI EN 12350-8

Prova di spandimento “slump flow”:		SCC
Consistenza	mm	670-670

2. Determinazione del passing ability con “J Ring” UNI EN 12350-12

Prova di passing ability “J Ring”:		SCC
Consistenza	mm	680-640

3. Determinazione della massa volumica – provino vibrato (UNI EN 12350-6)

Determinazione della massa volumica:	kg/m ³	2260
--------------------------------------	-------------------	------

PROVE SU CALCESTRUZZO INDURITO

1. Resistenza a compressione (UNI EN 12390-3)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Prova a compressione a 3 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	1	150	150	150	7.551	2.237	722,14	32,1

Prova a compressione a 14 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
21.03.2019	1	150	150	150	7.692	2.287	968,53	43,2

2. Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (UNI EN 12390-8:2002)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Data inizio prova: 21.03.2019

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	16,69

La determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione è stata eseguita in accordo con la norma "UNI EN 12390-8 giugno 2002", non ci sono stati trafiletti di acqua nei 2 provini.

3. Determinazione della resistenza alla carbonatazione (UNI EN 13295)

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	0

Calcestruzzo autocompattante	5% aggregati riciclati
Committente:	Vinci Alessandra
Oggetto dei Lavori:	Tesi Magistrale in Ingegneria Edile
Oggetto delle Prove:	Prequalifica miscele di conglomerato cementizio
Normative di riferimento:	UNI EN 206, UNI EN 11104 e CSA ANAS
Classe di resistenza:	Rck 30-37 N/mm ²
Classe di consistenza:	SCC
Classe di esposizione:	XC1-XC2-XC3-XC4
Diametro max inerte:	26 mm

PREMESSA

In data 08.03.2019, sono pervenuti presso questo laboratorio i seguenti campioni, da utilizzare nella pre-qualifica di miscele di conglomerato cementizio:

- **Aggregati provenienti dalla cava “Troilo S.r.l. – S.com. Corcione, 41 – 70017 Putignano (BA)” così dichiarati:**
SABBIA CALCAREA ASCIUTTA 0-4
PIETRISCO CALCAREO 6-16
GRANIGLIA CALCAREA 10-20
- **Aggregati provenienti dalla cava “Mallardi S.r.l. – Strada Tresca, 86 – 70121 Bari (BA)” così dichiarati:**
AGGREGATO GROSSO 0-6 PROVENIENTE DA RICICLO DI CALCESTRUZZI POST-CONSUMER E MATERIALI INERTI
- **Cemento della Cementeria COLACEM S.p.A. – del tipo:**
CEM IV/A-V 42,5R

- **Additivo Superfluidificante del tipo:**

120

Di seguito si riportano i risultati delle prove eseguite, relative alla qualificazione del conglomerato cementizio confezionato:

MISCELA DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO

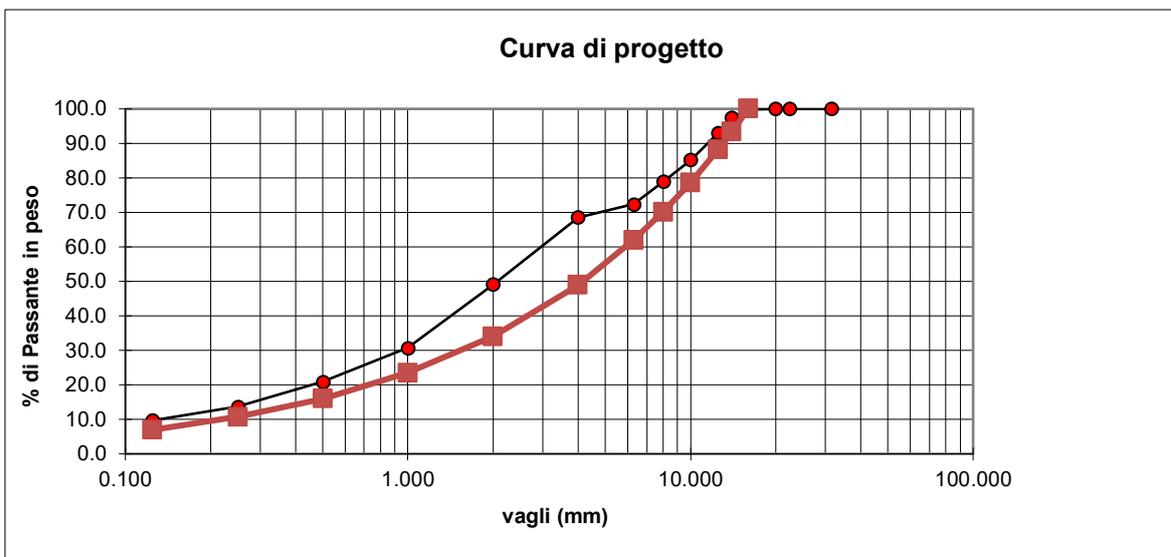
Utilizzando i materiali consegnati al laboratorio, dalle caratteristiche riportate nelle pagine precedenti, è stata qualificata la miscela di calcestruzzo dalle seguenti caratteristiche:

Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	66,5%
Pietrisco calcareo 6-16	28,5%
Graniglia calcarea 10-20	0%
Aggregati riciclati	5%

Distribuzione granulometrica della miscela di aggregati dosati nelle percentuali sopra indicate

Apertura stacci (mm)	% di passante
	Curva di progetto
31,500	100,00
22,400	100,00
20,000	100,00
16,000	99,71
14,000	97,53
12,500	92,99
10,000	85,25
8,000	78,88
6,300	72,31
4,000	68,52
2,000	49,17
1,000	30,75
0,500	20,87
0,250	13,69
0,125	9,71
0,063	7,85



Miscela del conglomerato cementizio

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione satura a superficie asciutta (kg)
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	407
Additivo Superfluidificante: 120	5,39
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	1109
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	478
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	0
Aggregato 4: Aggregato riciclato	82
Acqua:	196
Totale calcestruzzo	2278

Rapporto A/C	0,482
Dosaggio additivo Superfluidificante rispetto alla massa del cemento	1,25 %
Classe di esposizione secondo UNI EN 206 e UNI EN 11104	XC1 – XC2-XC3-XC4
Diametro massimo Aggregato	26 mm

PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO

1. Determinazione della capacità di scorrimento “Slump flow” UNI EN 12350-8

Prova di spandimento “slump flow”:		SCC
Consistenza	mm	600-650

2. Determinazione del passing ability “J Ring” UNI EN 12350-12

Prova di passing ability “J Ring”:		SCC
Consistenza	mm	0

3. Determinazione della massa volumica – provino vibrato (UNI EN 12350-6)

Determinazione della massa volumica:	kg/m ³	2254
--------------------------------------	-------------------	------

PROVE SU CALCESTRUZZO INDURITO

1. Resistenza a compressione (UNI EN 12390-3)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Prova a compressione a 3 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	1	150	150	150	7.579	2.246	716,45	31,8

Prova a compressione a 14 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
21.03.2019	1	151	150	150	7.612	2.248	963,35	42,7

2. Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (UNI EN 12390-8:2002)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Data inizio prova: 21.03.2019

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	16,04

La determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione è stata eseguita in accordo con la norma "UNI EN 12390-8 giugno 2002", non ci sono stati trafiletti di acqua nei 2 provini.

3. Determinazione della resistenza a carbonatazione (UNI EN 13295)

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	0

Calcestruzzo autocompattante	30% aggregati riciclati
Committente:	Vinci Alessandra
Oggetto dei Lavori:	Tesi Magistrale in Ingegneria Edile
Oggetto delle Prove:	Prequalifica miscele di conglomerato cementizio
Normative di riferimento:	UNI EN 206, UNI EN 11104 e CSA ANAS
Classe di resistenza:	Rck 30-37 N/mm ²
Classe di consistenza:	SCC
Classe di esposizione:	XC1-XC2-XC3-XC4
Diametro max inerte:	26 mm

PREMESSA

In data 08.03.2019, sono pervenuti presso questo laboratorio i seguenti campioni, da utilizzare nella pre-qualifica di miscele di conglomerato cementizio:

- **Aggregati provenienti dalla cava “Troilo S.r.l. – S.com. Corcione, 41 – 70017 Putignano (BA)” così dichiarati:**
SABBIA CALCAREA ASCIUTTA 0-4
PIETRISCO CALCAREO 6-16
GRANIGLIA CALCAREA 10-20
- **Aggregati provenienti dalla cava “Mallardi S.r.l. – Strada Tresca, 86 – 70121 Bari (BA)” così dichiarati:**
AGGREGATO GROSSO 0-6 PROVENIENTE DA RICICLO DI CALCESTRUZZI POST-CONSUMER E MATERIALI INERTI
- **Cemento della Cementeria COLACEM S.p.A. – del tipo:**
CEM IV/A-V 42,5R

- **Additivo Superfluidificante del tipo:**

120

Di seguito si riportano i risultati delle prove eseguite, relative alla qualificazione del conglomerato cementizio confezionato:

MISCELA DI CONGLOMERATO CEMENTIZIO

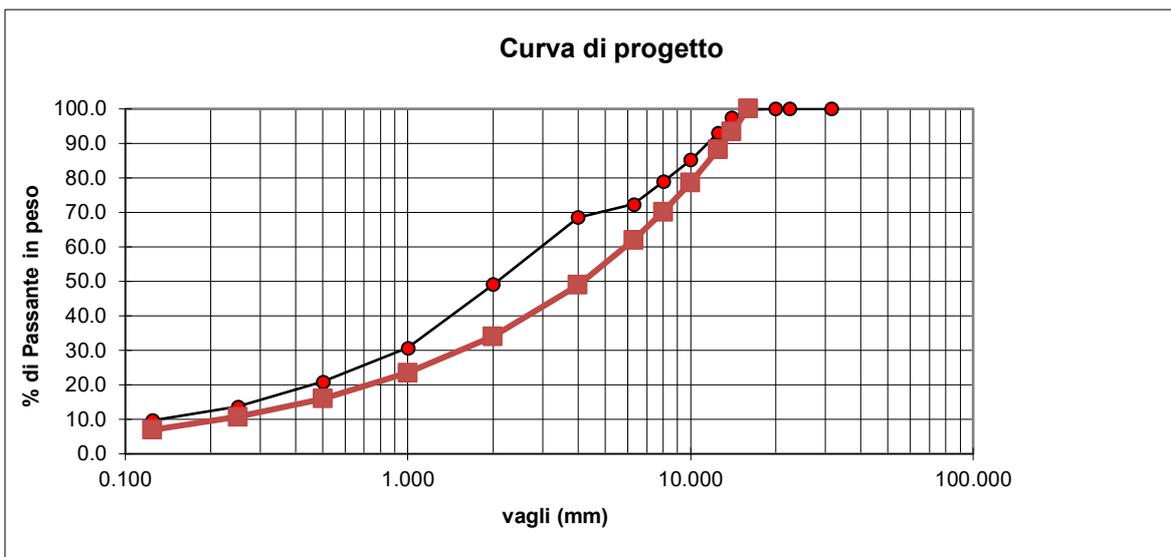
Utilizzando i materiali consegnati al laboratorio, dalle caratteristiche riportate nelle pagine precedenti, è stata qualificata la miscela di calcestruzzo dalle seguenti caratteristiche:

Distribuzione granulometrica degli aggregati secondo la curva di massima proporzionalità

Aggregato	% di aggregato utilizzato nella miscela di calcestruzzo
Sabbia calcarea asciutta 0-4	49%
Pietrisco calcareo 6-16	21%
Graniglia calcarea 10-20	0%
Aggregati riciclati	30%

Distribuzione granulometrica della miscela di aggregati dosati nelle percentuali sopra indicate

Apertura stacci (mm)	% di passante
	Curva di progetto
31,500	100,00
22,400	100,00
20,000	100,00
16,000	99,71
14,000	97,53
12,500	92,99
10,000	85,25
8,000	78,88
6,300	72,31
4,000	68,52
2,000	49,17
1,000	30,75
0,500	20,87
0,250	13,69
0,125	9,71
0,063	7,85



Miscela del conglomerato cementizio

Componente della miscela di calcestruzzo	Dosaggio dei componenti per 1 mc di calcestruzzo con Aggregati nella condizione saturata a superficie asciutta (kg)
Cemento: CEM IV A/V 42,5 R Colacem S.p.A.	403
Additivo Superfluidificante: 120	5,34
Aggregato 1: Sabbia calcarea asciutta 0-4	809
Aggregato 2: Pietrisco calcareo 6-16	349
Aggregato 3: Graniglia calcarea 10-20	0
Aggregato 4: Aggregato riciclato	487
Acqua:	204
Totale calcestruzzo	2257

Rapporto A/C	0,506
Dosaggio additivo Superfluidificante rispetto alla massa del cemento	1,25 %
Classe di esposizione secondo UNI EN 206 e UNI EN 11104	XC1 – XC2-XC3-XC4
Diametro massimo Aggregato	26 mm

PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO

1. Determinazione della capacità di scorrimento “Slump flow” UNI EN 12350-8

Prova di spandimento “slump flow”:		SCC
Consistenza	mm	680-670

2. Determinazione del passing ability “J Ring” UNI EN 12350-12

Prova di passing ability “J Ring”:		SCC
Consistenza	mm	0

3. Determinazione della massa volumica – provino vibrato (UNI EN 12350-6)

Determinazione della massa volumica:	kg/m ³	2196
--------------------------------------	-------------------	------

PROVE SU CALCESTRUZZO INDURITO

1. Resistenza a compressione (UNI EN 12390-3)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Prova a compressione a 3 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
11.03.2019	1	151	150	150	7.432	2.187	649,75	28,7

Prova a compressione a 14 giorni

Data prova	Sigla	Dimensioni (mm)			Massa (g)	Massa Volumica kg/m ³	Carico di rottura (kN)	Resistenza alla compressione (N/mm ²)
21.03.2019	1	151	150	150	7.469	2.206	888,34	39,4

2. Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione (UNI EN 12390-8:2002)

Data confezionamento provini in cls: 08.03.2019

Data inizio prova: 21.03.2019

Sigla	Dimensioni (mm)			Pressione dell'acqua applicata (kPa)	Durata della prova (ore)	Profondità massima di penetrazione dell'acqua (mm)
21.03.2019	150	150	150	500	72	24,77

La determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione è stata eseguita in accordo con la norma "UNI EN 12390-8 giugno 2002", non ci sono stati trafiletti di acqua nei 2 provini.

3. Determinazione della resistenza a carbonatazione (UNI EN 13295)

Sigla	Dimensioni (mm)			Anidride carbonica (%)	Durata della prova (giorni)	Profondità massima di carbonatazione (mm)
21.03.2019	100	100	100	10	14	1.6