

***BBC***

***BETONROSSI BASIC CONCRETE***

***Prescrivere, confezionare  
e mettere in opera calcestruzzi durevoli***

***A cura di Luigi Coppola  
e del Servizio Tecnologico Betonrossi***

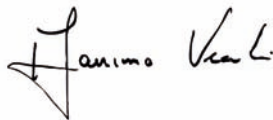


Gruppo Cementirosi S.p.A.





*“L’approccio industriale con il quale affrontiamo  
la produzione del calcestruzzo preconfezionato, ha permesso al nostro gruppo  
di porsi in breve tempo ai vertici del mercato nazionale.  
Un traguardo raggiunto grazie ad un programma di importanti investimenti  
fatti per realizzare impianti moderni e tecnologicamente avanzati,  
che soddisfano le esigenze tecniche, economiche e logistiche del mercato,  
nel più rigoroso rispetto dell’ecologia,  
dell’impatto ambientale e della sicurezza delle persone.  
La continua ricerca e innovazione tecnica dei prodotti, unita all’attenzione  
verso i nostri clienti, fanno di Betonrossi un punto di riferimento del settore.”*

A handwritten signature in black ink, reading "Massimo Vecchi". The signature is written in a cursive style with a large initial 'M'.

Massimo Vecchi  
Amministratore Delegato Betonrossi

## INTRODUZIONE

**I**l presente documento, redatto dal Professor Luigi Coppola della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bergamo con il supporto del Servizio Tecnologico della Betonrossi Spa, sviluppa le principali tematiche relative alla tecnologia del cemento e del calcestruzzo. Il documento, in particolare, affronta i temi della durabilità, della corretta posa in opera del conglomerato cementizio, della maturazione dei getti finalizzati a definire, da parte del progettista e della direzione lavori, le prescrizioni di capitolato per diverse tipologie di elementi e di opere in calcestruzzo armato e precompresso.

Le tematiche proposte, inoltre, sono quelle sviluppate in occasione del ciclo di convegni organizzati da Betonrossi Spa e dedicate prevalentemente ai progettisti, alle committenze pubbliche e private e alle imprese di costruzione per aiutarli nella comprensione e nell'utilizzo del nuovo strumento normativo – le Norme Tecniche per le Costruzioni D.M.14.01.2008 – apparse sul supplemento ordinario della Gazzetta Ufficiale del 5 Febbraio 2008.

I temi contenuti nel presente documento sono sviluppati nei seguenti testi:

- L. Coppola "Concretum", pp.700, Ed. McGraw-Hill, Milano (2007);
- L. Coppola "Il manuale del calcestruzzo di qualità", pp.350, Ed. Il Sole 24 Ore, Milano (Aprile 2008);
- L. Coppola "Concrete Tender", pp.364, Ed. Studium Bergomense, Bergamo (Ottobre 2008).

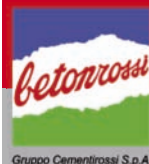
La riproduzione anche parziale di questo documento se non autorizzata per iscritto è perseguibile secondo i termini di legge



## INDICE

<b>1</b>	I LEGANTI IDRAULICI NELL'EDILIZIA MODERNA	pag 5
<b>2</b>	LEGANTI AEREI E IDRAULICI	pag 6
<b>3</b>	LE CALCI IDRAULICHE	pag 7
<b>4</b>	DALLE CALCI IDRAULICHE AL CEMENTO (UN PO' DI STORIA)	pag 10
<b>5</b>	IL CEMENTO PORTLAND	pag 12
<b>6</b>	I COSTITUENTI DEL CEMENTO PORTLAND	pag 13
<b>7</b>	I CEMENTI COMUNI E LE AGGIUNTE MINERALI	pag 14
<b>8</b>	I CEMENTI COMUNI E LA NORMA UNI-EN 197-1	pag 17
<b>9</b>	CEMENTI DISPONIBILI SUL TERRITORIO NAZIONALE E DESTINAZIONI	pag 22
<b>10</b>	L'ACQUA DI IMPASTO	pag 23
<b>11</b>	GLI AGGREGATI	pag 25
<b>12</b>	AGGREGATI DI RICICLO	pag 37
<b>13</b>	GLI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO	pag 39
<b>14</b>	LE AGGIUNTE POZZOLANICHE IN CENTRALE DI BETONAGGIO	pag 46
<b>15</b>	LA PRESA E L'INDURIMENTO DEL CALCESTRUZZO	pag 50
<b>16</b>	LA MICROSTRUTTURA DELLA MATRICE CEMENTIZIA	pag 52
<b>17</b>	RESISTENZA MECCANICA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO	pag 53
<b>18</b>	RESISTENZA A COMPRESSIONE E PARAMETRI COMPOSIZIONALI	pag 54
<b>19</b>	LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO: PROVINI CUBICI E CILINDRICI	pag 56
<b>20</b>	LA RESISTENZA CARATTERISTICA A COMPRESSIONE	pag 57

<b>21</b>	IL CONTROLLO DI ACCETTAZIONE E LA SCELTA DEL PRODUTTORE DEL CALCESTRUZZO	_____ pag 59
<b>22</b>	IL CONTROLLO DI ACCETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO ALLA CONSEGNA IN CANTIERE	_____ pag 61
<b>23</b>	IL CONTROLLO DELLA QUALITÀ DEL CALCESTRUZZO IN OPERA	_____ pag 64
<b>24</b>	PRESCRIZIONE PER IL VALORE DELLA RESISTENZA A COMPRESIONE IN OPERA	_____ pag 71
<b>25</b>	DURABILITÀ DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO E STATI LIMITE	_____ pag 73
<b>26</b>	CAUSE DI DEGRADO DEL CALCESTRUZZO E DELLE ARMATURE	_____ pag 75
<b>27</b>	IL CALCESTRUZZO IMPERMEABILE PER LE STRUTTURE A TENUTA IDRAULICA	_____ pag 77
<b>28</b>	LE STRUTTURE AEREE (FUORI TERRA) IN CLIMA TEMPERATO: CORROSIONE DEI FERRI INDOTTA DALL'ANIDRIDE CARBONICA	_____ pag 78
<b>29</b>	LE STRUTTURE AEREE FUORI TERRA IN CLIMI FREDDI: DEGRADO PROMOSSO DAI CICLI DI GELO-DISGELO	_____ pag 81
<b>30</b>	LE STRUTTURE SOTTOPOSTE A TRATTAMENTI CON SALI DISGELANTI	_____ pag 85
<b>31</b>	CORROSIONE DELLE ARMATURE NELLE STRUTTURE ESPOSTE ALL'AZIONE DEI CLORURI	_____ pag 87
<b>32</b>	LE STRUTTURE MARINE	_____ pag 91
<b>33</b>	IL DEGRADO DI TIPO CHIMICO	_____ pag 92
<b>34</b>	LA POSA IN OPERA, LA COMPATTAZIONE E LA MATURAZIONE DEI GETTI	_____ pag 95
<b>35</b>	COME PREVENIRE LA COMPARSA DEI DIFETTI DI COSTRUZIONE	_____ pag 96
<b>36</b>	PREPARAZIONE DEI CASSERI	_____ pag 97
<b>37</b>	RIPRESE DI GETTO	_____ pag 98
<b>38</b>	POSIZIONAMENTO DELLE ARMATURE	_____ pag 100
<b>39</b>	LA POSA IN OPERA	_____ pag 101
<b>40</b>	LAVORABILITÀ DEL CALCESTRUZZO AL MOMENTO DEL GETTO	_____ pag 102



<b>41</b>	COMPATTAZIONE DEI GETTI	_____ pag 106
<b>42</b>	LA PROTEZIONE DELLE STRUTTURE NELLE PRIME ORE SUCCESSIVE AL GETTO	_____ pag 108
<b>43</b>	LA MATURAZIONE DEI GETTI	_____ pag 110
<b>44</b>	IL GETTO DEL CALCESTRUZZO IN CLIMA CALDO O FREDDO	_____ pag 115
<b>45</b>	ESEMPI DI PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO	_____ pag 120
<b>46</b>	IL MIX-DESIGN DEL CALCESTRUZZO	_____ pag 121
<b>47</b>	I CALCESTRUZZI LEGGERI	_____ pag 124
<b>48</b>	I CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI	_____ pag 130
<b>49</b>	I CALCESTRUZZI ESPANSIVI A RITIRO COMPENSATO	_____ pag 135
<b>50</b>	LE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO	_____ pag 138
<b>51</b>	I CALCESTRUZZI PER STRUTTURE FACCIAVISTA	_____ pag 144
<b>52</b>	I CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI ( <i>Self-Compacting Concrete</i> )	_____ pag 147
<b>53</b>	I CALCESTRUZZI AD ALTA ED ALTISSIMA RESISTENZA MECCANICA	_____ pag 155
<b>54</b>	I CALCESTRUZZI PER STRUTTURE MASSIVE	_____ pag 157

1

## I LEGANTI IDRAULICI NELL'EDILIZIA MODERNA

**I** leganti impiegati nel settore delle costruzioni (gesso, calce aerea, calci idrauliche, cemento Portland) sono costituiti da polveri finissime ottenute da processi di cottura e macinazione di rocce e terre naturali, oppure da miscele di queste polveri con materiali disponibili in natura sottoposti a processi di sola macinazione (come, ad esempio, le pozzolane naturali o il calcare) e con sottoprodotti derivanti da processi industriali che non hanno bisogno di alcuna lavorazione (come le ceneri volanti dalle centrali di produzione dell'energia elettrica o le microsilici dalle industrie che producono componenti per l'elettronica) o che debbono essere sottoposti ad una semplice macinazione (è il caso delle loppe d'altoforno granulate provenienti dagli stabilimenti siderurgici).

A seconda del loro impiego, i leganti, mescolati con acqua (paste o boiacche) e con aggregati di pezzature variabili da pochi mm (malte) a qualche cm (betoncini o calcestruzzi) sono in grado di produrre impasti di consistenza variabile da quella di una terra umida a quella di un fluido colabile, rendendo possibile il loro utilizzo per tutte le svariate applicazioni previste dall'industria delle costruzioni. Ad esempio, per la realizzazione di massetti, caldane, calcestruzzi per dighe e per pavimentazioni a casseri scorrevoli (consistenza di *terra umida*), per confezionare malte di allettamento per murature in blocchi, malte per intonaci e rasature, calcestruzzi per strutture a casseri rampanti (consistenza *plastica*), malte e betoncini per l'inghisaggio di fondazioni di macchine, calcestruzzi per pilastri e muri di sostegno (consistenza *fluida*), massetti e lisciature autolivellanti e calcestruzzi per pavimentazioni e solette (consistenza *superfluida*), e *calcestruzzi autocompattanti* la cui consistenza è assimilabile a quella di un fluido capace di riempire completamente un casero senza necessitare di alcuna forma di compattazione o di vibrazione.

L'impasto, successivamente, ed indipendentemente dalla sua consistenza iniziale, è in grado di indurire senza alcuna apprezzabile diminuzione delle sue dimensioni originarie permettendo così di ottenere strutture portanti (travi, pilastri, muri di sostegno, etc.) ed elementi accessori (massetti, intonaci, etc.).



Cemento nell'Arte - Perfezione di una sfera - Autore: Luciano Ceschia

## 2

## LEGANTI AEREI E IDRAULICI

La più importante distinzione dei leganti disponibili in commercio è basata sulle condizioni in cui è possibile che essi induriscano, cioè possano trasformarsi da una massa a consistenza plastico-fluida in quella di una pietra. Si definiscono “**aerei**” quei leganti il cui indurimento può avvenire solo se l’impasto è a contatto con l’aria; mentre, vengono definiti “**idraulici**” quelli che possono indurire sia a contatto con l’aria che sott’acqua.

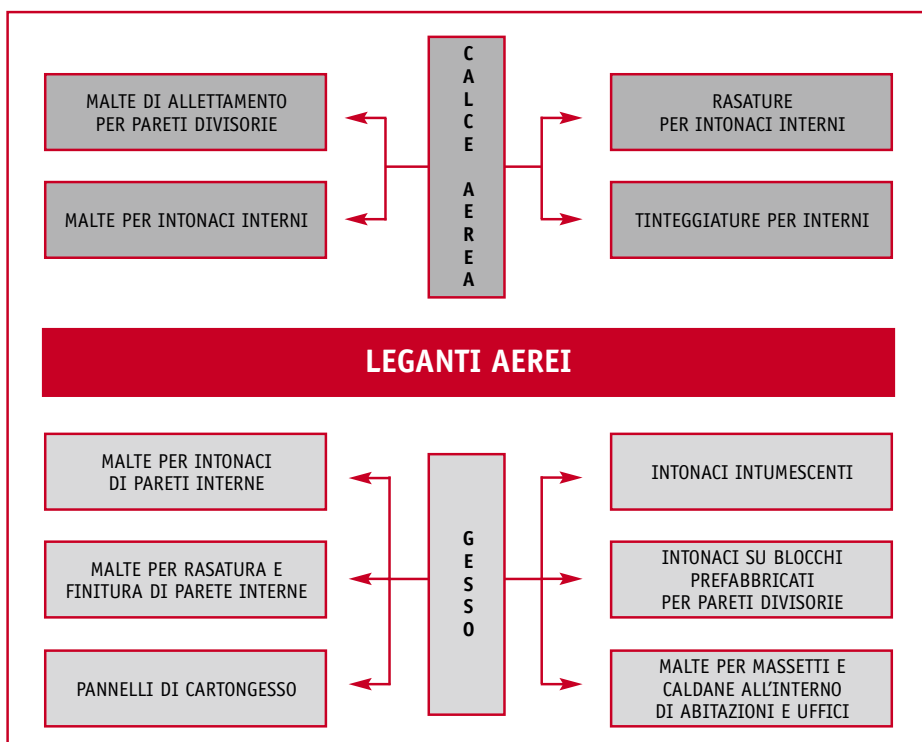
Un’altra importante e fondamentale distinzione tra leganti aerei e idraulici consiste nella scarsa resistenza al dilavamento, cioè al contatto con l’acqua, offerta dai primi. Per contro, invece, i prodotti derivanti dall’indurimento dei leganti idraulici posseggono un’eccellente resistenza all’azione dell’acqua eventualmente a contatto con i manufatti realizzati con questa tipologia di leganti. Si intuisce, quindi, come la discriminante, relativamente agli impieghi dei leganti aerei ed idraulici in edilizia, risieda non tanto nelle proprietà fisiche o meccaniche degli impasti, quanto nella loro capacità di indurire (o meno) in presenza di acqua e di poter resistere (o meno) al dilavamento per effetto dei fenomeni atmosferici (pioggia e neve) o determinato dal contatto con l’acqua nelle strutture idrauliche (canali, vasche, piscine, etc.) e marine (banchine, moli, etc.).



Diga di Ravedis (PN)

In base alle considerazioni sopra esposte, appare chiaro il motivo che spinge ad utilizzare gli impasti confezionati con i leganti aerei (**calce aerea e gesso**) esclusivamente per la realizzazione di elementi accessori in ambienti interni laddove, cioè, per la mancanza di acqua è possibile un corretto indurimento ed è garantita un’eccellente durabilità nel tempo grazie all’assenza dell’effetto dilavante.

Impieghi prevalenti dei leganti aerei nel settore delle costruzioni.



## 3 LE CALCI IDRAULICHE

Le calce idrauliche, al contrario di quelle aeree o idrate, possono indurire anche in presenza di acqua e, pertanto, possono essere considerate come le antesignane dei moderni cementi.

La calce idraulica è ottenuta per cottura di calcari argillosi che danno luogo ad un prodotto in zolle costituito da ossido di calcio, da silicato bicalcico ( $2CaO \cdot SiO_2$ )<sup>1</sup> e alluminato monocalcico ( $CaO \cdot Al_2O_3$ ). Questi ultimi costituenti sono entrambi capaci, se mescolati con acqua, di dar luogo ad impasti capaci di indurire sott'acqua originando dei composti, simili a quelli prodotti dall'idratazione del cemento Portland, dotati di eccellente resistenza al dilavamento.

Nelle Tabelle che seguono vengono riportate le classificazioni della calce idraulica in accordo con la legge n. 595 del 26 maggio 1965 e con la normativa EN 459-1 unitamente ai requisiti minimi di natura chimico-fisica imposti dalla recente norma europea che hanno come obiettivo quello di ridurre sia la percentuale di materiale grossolano, che quelle sostanze che a seguito del contatto con l'acqua possono provocare indesiderati fenomeni espansivi dell'impasto.

Classificazione delle calce idrauliche in accordo alla legge n. 595 del 26 maggio 1965 e alla normativa EN 459-1 del 2002.

CLASSIFICAZIONE IN ACCORDO ALLA EN 459-1	CLASSIFICAZIONE IN ACCORDO ALLA LEGGE 595 del 26.5.1965
<p><b>Calce idrauliche naturali (NHL)</b> Prodotti della cottura di calcari argillosi o silicei con successiva riduzione in polvere mediante spegnimento con o senza macinazione</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Calce idrauliche in zolle</b> Prodotto ottenuto per cottura e successivo spegnimento dei calcari argillosi</li> <li>- <b>Calce idrauliche naturali e calce eminentemente idrauliche naturali in polvere</b> Prodotto ottenuto per cottura di marne naturali con successivo spegnimento e macinazione</li> <li>- <b>Calce idrauliche artificiali e calce eminentemente idrauliche artificiali in polvere</b> Prodotto ottenuto per cottura di miscele di calcari e materiali argillosi con successivo spegnimento e macinazione</li> </ul>
<p><b>Calce idrauliche naturali con materiali aggiunti (NHL-Z)</b> Prodotti della cottura di calcari argillosi o silicei con successiva riduzione in polvere mediante spegnimento e macinazione che contengono materiali pozzolanici o idraulici fino al 20% in massa</p>	
<p><b>Calce idrauliche</b> Calce costituite da idrossido di calcio (calce aerea), silicati e alluminati prodotte mediante miscelazione di materiali appropriati</p>	<p><b>Calce idrauliche artificiali pozzolaniche o siderurgiche in polvere</b> Prodotti ottenuti per macinazione rispettivamente di pozzolana o loppa d'altoforno con calce aerea</p>

Requisiti per le calce idrauliche (Norma EN 459-1).

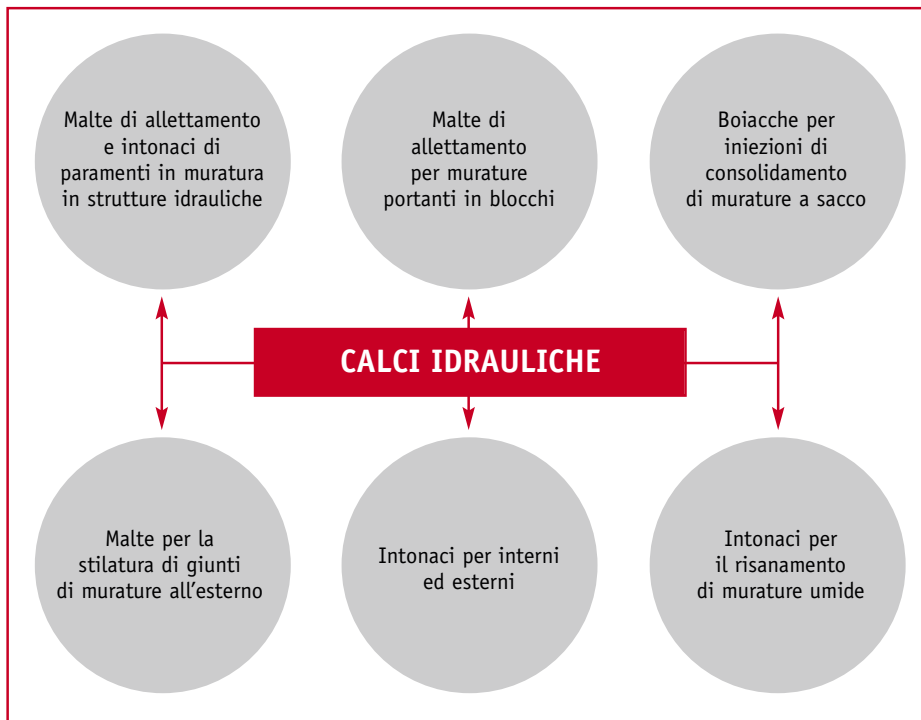
TIPO DI CALCE	Calce idraulica 2	Calce idraulica 3.5	Calce idraulica 5	Calce idraulica naturale 2	Calce idraulica naturale 3.5	Calce idraulica naturale 5
<b>SIGLA</b>	HL 2	HL 3.5	HL 5	NHL 2	NHL 3.5	NHL 5
<b>SO<sub>3</sub> (%)</b>	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3
<b>CALCE LIBERA</b>	≥ 8	≥ 6	≥ 3	≥ 15	≥ 9	≥ 3
<b>R<sub>cm28</sub> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	≥ 2 e ≤ 7	≥ 3.5 e ≤ 10	≥ 5 e ≤ 15	≥ 2 e ≤ 7	≥ 3.5 e ≤ 10	≥ 5 e ≤ 15
<b>RESIDUO (%) a 0.09mm</b>	≤ 15	≤ 15	≤ 15	≤ 15	≤ 15	≤ 15
<b>RESIDUO (%) a 0.20mm</b>	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
<b>H<sub>2</sub>O libera</b>	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
<b>STABILITA' 5.3.2.1</b>	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
<b>STABILITA' 5.3.2.2</b>	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20
<b>PRESA</b>	> 1h < 15h	> 1h < 15h	> 1h < 15h	> 1h < 15h	> 1h < 15h	> 1h < 15h
<b>ARIA (%)</b>	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20

Le prestazioni meccaniche delle malte confezionate con le calce idrauliche disponibili sul mercato, grazie anche alla possibilità di formulare questi leganti con additivi riduttori di acqua senza penalizzare la consistenza della malta allo stato fresco, possono attingere anche valori prossimi a 10- 15 N/mm<sup>2</sup>. Si intuisce, tuttavia, che le calce idrauliche, ancorché capaci di produrre impasti di prestazioni meccaniche superiori a quelle di una calce aerea, non possono assolvere compiti strutturali primari. La differenza rispetto alle calce aerea consiste nel fatto che la calce idraulica, avendo una buona resistenza all'acqua viene impiegata per realizzare intonaci macroporosi per il risanamento delle murature in pietra e mattoni interessati da risalita capillare. Nei risanamenti di paramenti in muratura portante, le malte di calce idraulica vengono utilizzate per il rifacimento degli strati più esterni dei giunti di allettamento ammalorati. La buona idraulicità di questi leganti, inoltre, consente di impiegarli anche nel confezionamento di boiacche da iniezione<sup>2</sup> per il consolidamento delle murature a sacco.



Gruppo Cementirossi S.p.A.

Impieghi prevalenti delle calce idrauliche in edilizia.



Si ringrazia la Fornaci Laterizi Danesi S.p.A. per la pubblicazione di questa immagine

<sup>1)</sup> Il silicato bicalcico è uno dei costituenti del clinker di cemento Portland.

<sup>2)</sup> La boiaccia è ottenuta per miscelazione di un legante con sola acqua in assenza, quindi, di aggregati.

4

## DALLE CALCI IDRAULICHE AL CEMENTO (UN PO' DI STORIA)

La calce idraulica ha rappresentato il legante di transizione tra il periodo empirico che coincide, almeno in Italia, con l'impiego delle prime malte idrauliche ad opera del Palladio e la fase più propriamente scientifica identificabile con gli studi condotti per la messa a punto dei leganti idraulici che spianarono la strada per la produzione del cemento Portland su brevetto di Joseph Aspdin. Questo percorso evolutivo fonda le sue radici già nella metà del 16° secolo quando il Palladio riferisce di una calce con caratteristiche idrauliche (la calce "nigra") ottenuta per cottura di pietre calcaree contenenti impurezze argillose. Occorrerà, però, attendere la metà del 18° secolo e le prime ricerche condotte da Joseph Black sulle modificazioni del prodotto di cottura dei calcari in funzione della massima temperatura raggiunta nel forno perché si avviasse una produzione razionale dei moderni leganti. E' a John Smeaton, tuttavia, che va riconosciuto il merito di aver contribuito con le sue ricerche al più importante avanzamento nella conoscenza dei leganti idraulici.



Cementeria di Piacenza - 1930

Nel 1756 egli conduce una serie di studi per individuare quale materiale legante possedesse le migliori prestazioni per poter resistere all'ambiente marino fortemente aggressivo valutando gli effetti derivanti dall'utilizzo di calce ottenute per cottura di calcari di diversa provenienza immergendo dei provini sferici di malta in acqua fredda subito dopo la presa. Egli trovò, procedendo ad un'analisi chimica dei calcari utilizzati, che i leganti migliori erano quelli ottenuti da pietre calcaree contenenti rilevanti quantitativi di materiale argilloso. Fu questa la prima volta che le proprietà di una calce idraulica venivano messe in relazione con la natura della materia prima impiegata per la sua produzione.

Nel 1818 L.J.Vicat inizia la sperimentazione sulle calce potenzialmente idrauliche. A Vicat spetta l'onore di aver aperto la conoscenza scientifica su quei fattori governano l'idraulicità delle calce. Le sue ricerche mettono in luce che non esiste calce idraulica senza silice ed allumina e che per poter essere denominata idraulica, la calce deve contenere discrete quantità di materiali argillosi. Gli studi condotti da Vicat gli consentirono di preparare una calce idraulica artificiale mediante calcinazione di una miscela di calcari e argille macinate in un mulino a umido. Questo processo consentirà qualche anno dopo la produzione del cemento Portland.

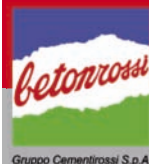
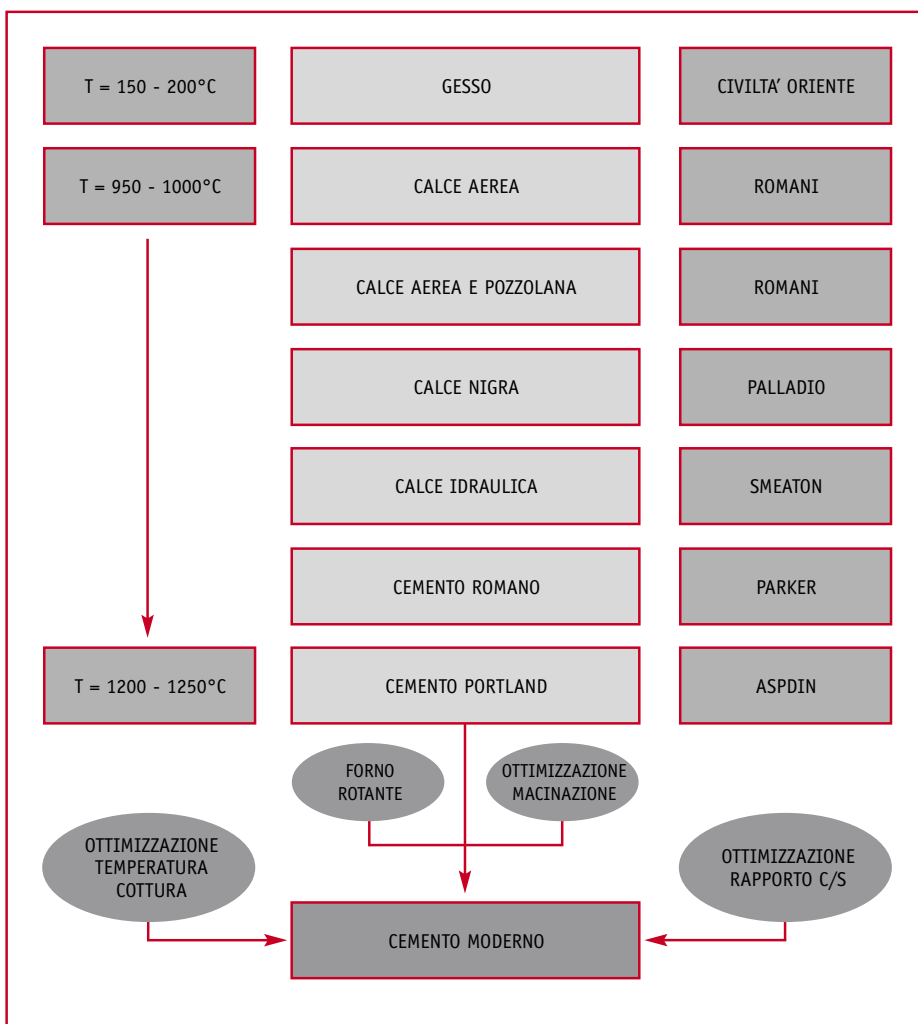
Tra i vari brevetti che apparvero in questo periodo quello N° 5022 del 21 ottobre 1824 di John Aspdin è sicuramente dal punto di vista storico il più importante. Aspdin brevettò un legante che viene chiamato cemento Portland in quanto, una volta indurito, assume l'aspetto lapideo ed un colore analogo a quello di una pietra da costruzione estratta nella zona di Portland, allora molto utilizzata in Inghilterra, con una reputazione di materiale

resistente meccanicamente e di eccellente durabilità.

Più tardi, per opera di I. C. Johnson, si puntualizzerà il ruolo decisivo della temperatura di cottura. Johnson si accorge, infatti, che i provini confezionati per macinazione di prodotti vetrificati raggiungono resistenze meccaniche più elevate rispetto a quelli realizzati con i prodotti di cottura usuali non contenenti la frazione scorificata.

A partire dalla seconda metà del 1800 la storia del cemento Portland è costellata da una serie di importanti miglioramenti che attengono al controllo delle materie prime, alla tecnica di produzione (in particolare, l'introduzione dei forni rotanti che ha permesso di trasformare la produzione del cemento in un processo a ciclo continuo), al controllo di qualità del prodotto finito che fanno del cemento Portland un legante idraulico completamente diverso da quello prodotto sia da Aspdin che da Johnson le cui proprietà sono apprezzate a tal punto da rendere questo materiale il prodotto più consumato al mondo - ad eccezione dell'acqua - dall'uomo.

La storia dei leganti da costruzione.



# 5

## IL CEMENTO PORTLAND

**I**l cemento è il legante idraulico più diffuso al mondo la cui produzione ha sfiorato nel 2015 i 4.3 miliardi di tonnellate. Il **cemento Portland**, il più importante dei leganti idraulici, si ottiene per macinazione, in presenza di una o più forme di solfato di calcio, del *clinker* ottenuto per cottura in forni rotanti, alla temperatura di 1300–1450°C, di una miscela di materie prime costituite principalmente da calcari, argille, sabbie e ceneri di pirite.

La produzione del clinker di cemento Portland consiste nella macinazione delle materie prime opportunamente dosate e miscelate. La polvere così ottenuta, denominata “farina”, viene introdotta nella estremità superiore di un forno rotante, costituito da cilindro leggermente inclinato sull’orizzontale internamente rivestito con un materiale refrattario, e avanza in controcorrente rispetto al flusso di calore prodotto per combustione<sup>3</sup> all’estremità inferiore del cilindro stesso.

Durante l’avanzamento nel forno la farina subisce una serie di trasformazioni chimiche che consistono sostanzialmente nell’espulsione dell’acqua libera (che avviene a 100°C), seguita dalla perdita dell’acqua legata (nella zona di preriscaldamento del forno nell’intervallo di temperatura compreso tra 100 e 750°C circa) contenuta nei materiali argillosi. Alla temperatura di 750 – 1000°C circa si ha la decarbonatazione del calcare ed, infine, nella zona della cottura vera e propria, dove la temperatura del forno raggiunge i 1450°C, si manifesta una parziale fusione (*clinkerizzazione*) della miscela che conduce alla formazione del clinker costituito da silicati di calcio. Nella fase finale del processo, quando la miscela inizia a raffreddarsi alla temperatura di circa 1350°C, si ha una parziale cristallizzazione della massa fusa con la formazione di alluminati di calcio. Il clinker risultante dal processo di cottura, raffreddato da una corrente d’aria fredda, si presenta in forma di particelle sferiche di diametro variabile da circa 3 a 25 mm che vengono macinate, unitamente a qualche percento di solfati e di additivi coadiuvanti di macinazione, in appositi mulini a sfera fino ad ottenere una polvere (**il cemento Portland**) costituita da particelle di dimensioni inferiori a 100 micrometri<sup>4</sup>.



Linea Ferroviaria TAV - Viadotto Piacenza

<sup>3)</sup> La fonte di energia termica per la produzione del cemento è rappresentata per circa l’85% dal carbone, per il 5% da oli combustibili, per il 5.5% da combustibili non convenzionali (farine animali e materiali provenienti dallo smaltimento dei rifiuti, quali carta legno, grassi animali e vegetali) e dal metano per il 2.5% circa.

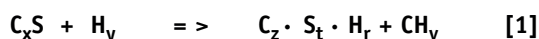
<sup>4)</sup> Reiterando opportunamente il processo di macinazione si possono produrre cementi a finezza molto spinta caratterizzati da una dimensione media delle particelle di circa 5 micrometri, contro i 40 micrometri tipici dei cementi tradizionali, denominati microcementi, che vengono utilizzati nel settore dei consolidamenti di terreni a bassa permeabilità.

# 6

## I COSTITUENTI DEL CEMENTO PORTLAND

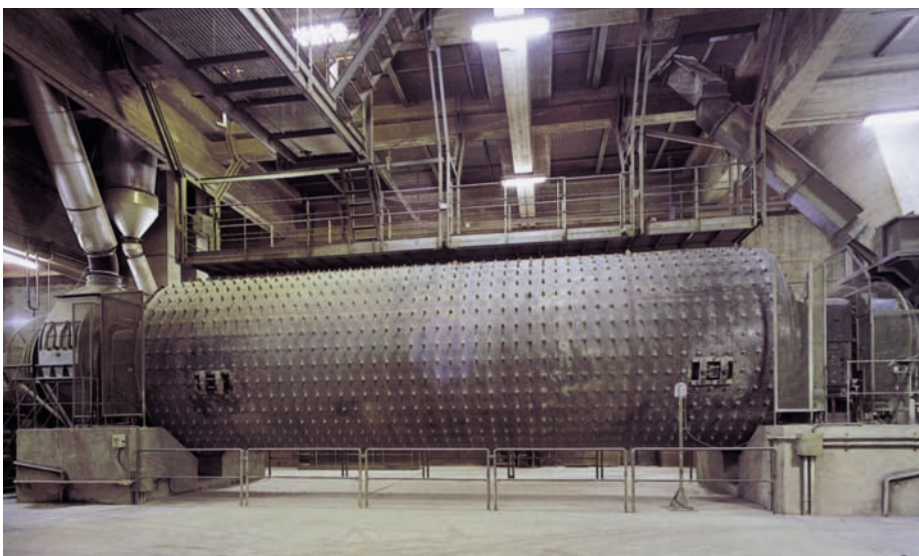
I costituenti mineralogici principali del cemento Portland sono rappresentati dal silicato tricalcico ( $C_3S$ ), dal silicato bicalcico ( $C_2S$ ), dall'alluminato tricalcico ( $C_3A$ ) e dalla fase ferrica ( $C_4AF$ )<sup>5</sup>, tra i quali i più importanti sono i silicati, sia perché essi sono presenti in percentuale preponderante (dal 75 all' 80%)<sup>6</sup>, sia perché essi sono responsabili delle prestazioni meccaniche della pasta di cemento indurita alle quali, invece, non contribuiscono gli alluminati.

La reazione di idratazione dei silicati con l'acqua può essere schematizzata come segue:



La reazione deve intendersi puramente indicativa; infatti, risulta alquanto difficile, sia stimare la composizione del C-S-H (cioè il rapporto C/S e S/H), che determinare il quantitativo di idrossido di calcio prodotto dall'idratazione. In linea di massima in una pasta di cemento completamente idratata il C-S-H rappresenta circa il 60 - 70% dei prodotti solidi. L'idrossido di calcio, invece, varia dal 18 al 25%.

Sebbene l'alluminato tricalcico ( $C_3A$ ) sia presente nel clinker in percentuale modesta (1-13%) esso influenza significativamente la reazione di idratazione subito dopo il mescolamento con acqua. La velocità a cui avviene la reazione di idratazione del  $C_3A$ , già molto rapida, subisce un'ulteriore accelerazione, come avviene nel cemento, in presenza di calce. La conseguenza di una reazione troppo rapida è rappresentata dalla pratica impossibilità di utilizzare il clinker di cemento Portland<sup>7</sup> per la produzione di malte e calcestruzzi. Al fine di rallentare il processo di idratazione del  $C_3A$ , evitando così la presa rapida, nel clinker di cemento Portland viene aggiunto **il gesso**. La reazione risulta fortemente rallentata per la formazione di un sale quaternario, denominato **ettringite** che si forma durante le prime ore, rivestendo un ruolo fondamentale nei processi di presa, e già dopo qualche giorno è presente in piccole quantità in forma di cristalli aghiformi di lunghezza di pochi micrometri.



Molino Cemento - Stabilimento Cementirosi (PC)

<sup>5</sup> Nella chimica del cemento convenzionalmente i simboli hanno il seguente significato: C=CaO; S=SiO<sub>2</sub>; A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; H=H<sub>2</sub>O.

<sup>6</sup> La norma EN 197-1 sui cementi comuni stabilisce che le percentuali dei silicati di calcio deve essere almeno pari ai 2/3 della massa del clinker.

<sup>7</sup> Per sfruttare la presa rapida del clinker di cemento Portland esso viene convenientemente impiegato nella produzione di leganti e malte premiscelate a presa rapida destinate al fissaggio di zanche di porte e finestre, tombini, cassette elettriche, etc., laddove una perdita di plasticità dell'impasto viene richiesta per poter effettuare celermente le lavorazioni.



## I CEMENTI COMUNI E LE AGGIUNTE MINERALI

**I**l cemento Portland puro, inteso come una mera miscela di clinker di cemento e gesso, rappresenta oggi solo una modesta aliquota dell'intera produzione di cemento. In Italia, ad esempio, **il cemento Portland, nel 2014, ha rappresentato il 13.4% del cemento consumato nel settore delle costruzioni**. I cementi commercialmente più diffusi, infatti, sono costituiti da miscele di clinker di cemento Portland e di aggiunte minerali in percentuali variabili dall' 8% al 95% costituite da:

- **materiali pozzolanici** (ad esempio, le pozzolane naturali, le ceneri volanti siliciche a basso tenore di ossido di calcio, il fumo di silice, etc.);
- **materiali pozzolanici a comportamento idraulico** (ad esempio, la loppa d'altoforno e le ceneri volanti calciche ad alto tenore di ossido di calcio);
- **materiali inerti** (ad esempio le polveri di calcare).

### I materiali pozzolanici

Le pozzolane sono materiali inorganici, di natura silicea o silico-alluminosa che di per sé non posseggono caratteristiche di legante idraulico, ma che in forma di polvere, di finezza simile a quella del cemento Portland, sono in grado, qualora vengano mescolate con acqua in presenza di calce, di indurire, alla temperatura ambientale, sia all'aria che sott'acqua, dando luogo a prodotti di idratazione relativamente poco solubili e, quindi, resistenti all'azione dilavante dell'acqua.

Le caratteristiche peculiari di un materiale pozzolanico sono rappresentate non solo dalla natura chimica (come già anticipato silicea o silico-alluminosa), ma anche da un basso grado di cristallinità (materiali amorfi o vetrosi)<sup>8</sup> e da una superficie specifica (l'area superficiale per unità di massa o di volume) relativamente elevata (da qualche m<sup>2</sup>/g nelle pozzolane naturali, a qualche decina di m<sup>2</sup>/g nelle pozzolane industriali).

Appartengono alla categoria dei materiali pozzolanici **le rocce e i minerali di origine vulcanica** (o anche sedimentaria) di natura prevalentemente allumino-silicatica che grazie al brusco raffreddamento della lava hanno acquisito una struttura prevalentemente vetrosa.

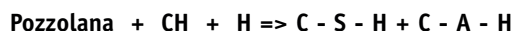


Pila lato Revere - Raddoppio Ferroviario - Direttrice Bologna-Brennero

Tra i materiali a comportamento pozzolanico **le ceneri volanti** a basso tenore di CaO libero (1-2.5%)<sup>9</sup> sono di gran lunga quelle più utilizzate. Esse rappresentano il sottoprodotto della combustione di antracite o del carbone bituminoso nelle centrali termoelettriche. Le impurità presenti nel carbone fondono per effetto dell'alta temperatura raggiunta durante la combustione ed in forma di goccioline liquide vengono trascinate dai fumi. Successivamente, per effetto del brusco raffreddamento queste solidificano, acquisendo una struttura prevalentemente vetrosa, ed in parte si agglomerano in forma di particelle sferiche di natura silico-alluminosa a struttura amorfa<sup>10</sup> e di granulometria simile a quella del cemento.

Rivestono, infine, un'importanza particolare tra i materiali pozzolanici i **fumi di silice** (o microsilici) ottenuti come sottoprodotto della lavorazione all'arco elettrico del silicio e delle leghe ferro-silicio. Questi materiali si presentano in forma di polvere con una finezza molto più spinta sia del cemento Portland che della cenere volante (la dimensione media dei granuli è di circa 0.1-0.2 micrometri). Il fumo di silice è costituito quasi esclusivamente da ossido di silicio, presente in percentuale superiore all'85%, e per questo motivo, unitamente alla più elevata superficie specifica, risulta possedere una reattività di gran lunga superiore a quella della cenere volante.

Indipendentemente dal tipo di pozzolana impiegata l'indurimento della miscela acqua/calce/materiale pozzolanico è da ascrivere ad una reazione chimica che coinvolge il CH del legante aereo con i silicati e gli alluminati presenti nella pozzolana con formazione degli stessi prodotti dell'idratazione dei costituenti del cemento Portland:



La capacità di un materiale pozzolanico di combinarsi con la calce per produrre composti insolubili in acqua viene vantaggiosamente sfruttata nella produzione dei moderni cementi costituiti da miscele di cemento Portland e materiali pozzolanici di diversa natura. In questi cementi il processo di idratazione può essere schematizzato in due processi distinti, il primo dei quali consiste nella idratazione del cemento Portland con formazione degli alluminati e silicati primari e della calce. Nel secondo processo, quest'ultima, si combina con i silicati e gli alluminati del materiale pozzolanico dando luogo al C-A-H e al C-S-H "secondari".



*Plinto di Fondazione galena destra - Viadotto Po - Linea Ferroviaria TAV*



Gruppo Cementirosi S.p.A.

### **I materiali pozzolanici a comportamento idraulico**

Appartiene alla categoria dei materiali pozzolanici a comportamento idraulico la loppa d'altoforno derivante dalla produzione della ghisa. Sebbene la loppa possieda proprietà idrauliche, essendo capace di idratarsi se mescolata con acqua, tuttavia, il suo processo di idratazione, in assenza di una fonte esterna di calce, procede con estrema lentezza.

Per ovviare a questo inconveniente la loppa viene mescolata con alcune sostanze – i cosiddetti attivatori – in grado di modificare la struttura degli idrati rendendoli più permeabili favorendo, quindi, l'idratazione della loppa anidra e garantendo che il processo si manifesti più velocemente. Gli attivatori del processo di idratazione sono costituiti dalla calce (proveniente dal processo di idratazione dei silicati del cemento), ma anche dal gesso.

### **Le aggiunte inerti**

Per la produzione dei cementi moderni, oltre ai materiali pozzolanici e ai materiali pozzolanici a comportamento idraulico, vengono utilizzati aggiunte inerti che mescolate insieme al clinker di cemento Portland in forma di polveri non sono interessate da trasformazioni chimiche in presenza d'acqua e, pertanto, sono da ritenersi dei semplici materiali di riempimento (filler).

L'aggiunta minerale inerte più importante per la produzione del cemento è rappresentata dal calcare (carbonato di calcio)<sup>11</sup> utilizzato in proporzioni variabili tra il 6 e il 35%.



Gruppo Cementirossi S.p.A.

---

<sup>8)</sup> Lo stato amorfo è caratterizzato da una disposizione disordinata degli atomi o degli ioni che compongono un solido: questo stato di disordine è responsabile di una maggiore reattività dei materiali amorfi rispetto ad un materiale di stessa natura chimica, ma caratterizzato da una struttura cristallina con una disposizione ordinata degli atomi o degli ioni.

<sup>9)</sup> Il tenore di CaO reattivo ammesso per queste ceneri dalla EN 197-1 non deve essere maggiore del 10%.

<sup>10)</sup> Le particelle che non vengono raffreddate rapidamente possono dar luogo alla formazione di allumino-silicati a struttura prevalentemente cristallina (la sillimanite  $-Al_2O_3 \cdot SiO_2$  e la mullite  $(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$  e alla forma alfa del quarzo. Questi composti hanno scarsa reattività, pertanto, se presenti in una cenere volante in elevate quantità possono ridurre la pozzolanicità.

<sup>11)</sup> I calcari impiegabili nel confezionamento dei cementi debbono essere caratterizzati da un tenore di carbonato di calcio maggiore del 75% e da un tenore di argilla inferiore a 1.2g/100g. Le polveri di calcare, inoltre, vengono classificate in base al tenore di carbonio organico totale (TOC) in L ed LL con un TOC rispettivamente minore di 0.2% e 0.5% in massa.

# 8

## I CEMENTI COMUNI E LA NORMA UNI-EN 197-1

**I** cementi disponibili in commercio sono principalmente costituiti da miscele di cemento Portland con materiali pozzolanici, materiali pozzolanici a comportamento idraulico e aggiunte inerti.

Nell'ambito della Comunità europea la produzione dei cementi è basata sui requisiti composizionali, prestazionali e produttivi stabiliti dalla norma EN 197-1 recepita a livello nazionale dalla norma UNI EN 197-1. In accordo con questa normativa, i cementi possono essere prodotti utilizzando i seguenti *costituenti principali*:

- clinker di cemento Portland (K);
- gesso;
- pozzolane naturali (P) e naturali calcinate (Q);
- ceneri volanti di tipo silicico (V) e calcico (W);
- loppe granulate d'altoforno (S);
- microsilici o fumo di silice (D);
- calcari (L o LL);
- scisti calcinati (T).



Stabilimento Cementirossi di Piacenza

### I tipi di cemento

A seconda dei costituenti impiegati e della relativa percentuale di utilizzo, i cementi comuni sono costituiti da cinque tipi principali individuati da un numero romano da I a V. I cementi di tipo II, III, IV e V, inoltre, sono suddivisi in sottotipi in accordo alla Tabella di pag 15.

Tutti i cementi, infine, devono soddisfare i requisiti chimici e prestazionali indicati nelle Tabelle seguenti (prospetto 1 della norma EN 197-1).

I cementi di **tipo I** (prospetto 2 e 3 della norma UNI 197-1) sono i **cementi Portland** puri costituiti da una percentuale di clinker di cemento Portland almeno pari al 95%.

I cementi di **tipo II** vengono denominati **Portland di miscela** in quanto il costituente presente in maggior percentuale è rappresentato dal clinker di cemento Portland in combinazione con una o più aggiunte minerali.

I **cementi d'altoforno (tipo III)** sono costituiti esclusivamente da clinker di cemento Portland e loppa granulata d'altoforno aggiunta in percentuali superiori al 35% (limite che differenzia questi cementi da quelli Portland alla loppa) e sono previsti in tre sottotipi, ognuno individuato dalla lettera A, B o C (subito dopo il numero romano) che individua la percentuale con cui la loppa è presente nel cemento compresa, rispettivamente, negli intervalli 36-65%, 66-80% o 81-95%.

Il **cemento pozzolanico (tipo IV)** è ottenuto per miscela del clinker di cemento Portland con microsilice, pozzolane naturali e naturali calcinate e ceneri volanti. Sono previsti due sottotipi che si differenziano per la percentuale di impiego delle aggiunte pozzolaniche, variabili negli intervalli 11-35% e 36-55%, individuate, rispettivamente, dalle lettere A o B (dopo il numero romano IV).

Relativamente al cemento tipo IV/B, si fa notare come la percentuale massima di impiego delle aggiunte a comportamento pozzolanico sia fissata al 55%.

Oltre questo limite il quantitativo di calce proveniente dall'idratazione del clinker non sarebbe sufficiente a garantire la reazione pozzolanica, con il risultato che parte del materiale pozzolanico rimarrebbe nell'impasto in forma di materiale inerte incapace, quindi, di



Gruppo Cementirossi S.p.A.

contribuire alle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

Il **cemento composito (tipo V)**, da non confondere con quello Portland composito (tipo II/A-M o II/B-M), è costituito da una miscela di clinker di cemento Portland, loppa d'altoforno, e pozzolane (naturali o naturali calcinate) e/o cenere volante silicica. Sono previsti due sottotipi in cui la percentuale della loppa, da una parte, e quella delle pozzolane e della cenere, dall'altra, deve essere inclusa nell'intervallo 18-30% (tipo V/A) oppure 31-50% (tipo V/B).

### Le classi di resistenza del cemento

Ognuno dei tipi e sottotipi di cemento previsti dalla norma UNI EN 197-1 è disponibile, almeno in teoria, in sei differenti classi di resistenza individuate dalle sigle 32.5N, 32.5R, 42.5N, 42.5R, 52.5N e 52.5R. Per i cementi d'altoforno (CEM III) è prevista, inoltre, la classe di resistenza a lento indurimento (L). L'appartenenza di un cemento ad una determinata classe di resistenza, tra quelle sopramenzionate, è stabilita sostanzialmente dai valori di resistenza meccanica a compressioni ottenuti su provini di malta confezionati e conservati in accordo alle procedure previste dalla norma EN 196-1.

Nella Tabella (Prospetto 2 della UNI-EN 197-1) che individua i requisiti minimi in termini di resistenza a compressione di un determinato cemento, valutata su malta, si può notare come la sigla numerica rappresenti il valore in  $N/mm^2$  della tensione di rottura a compressione ottenuto a 28 giorni e questo indipendentemente che il cemento risulti ad *indurimento normale (N)* o a *rapido indurimento (R)* o a *indurimento lento (L)*.

La differenza tra due cementi N ed R di pari resistenza meccanica a compressione a 28 giorni (ad esempio,  $42.5 N/mm^2$ ) consiste nella resistenza a compressione, valutata su provini maturati per 2 giorni, che dovrà risultare maggiore di  $10 N/mm^2$  o  $20 N/mm^2$ , rispettivamente per i cementi di classe 42.5N e 42.5R. Questo, ovviamente, non significa che il calcestruzzo confezionato con un cemento di classe 42.5N non possa attingere valori di resistenza a compressione a 2 giorni di  $20 N/mm^2$ .

Ad esempio, si potranno conseguire questi risultati adottando per il calcestruzzo con il cemento 42.5N rapporti *a/c* più bassi di 0.50 per conseguire il risultato atteso. La norma, tuttavia, vuole mettere in evidenza che – a parità di tutte le condizioni – il calcestruzzo confezionato con un cemento di classe 42.5R possiederà alle brevi stagionature (ed in particolare dopo 2 giorni) prestazioni meccaniche superiori rispetto ad un analogo impasto, di pari rapporto *a/c*, confezionato con un cemento di classe 42.5N.



*Laboratorio analisi e prove - Cementirosi sede di Piacenza*

Prospetto 2: requisiti meccanici e fisici definiti come valori caratteristici.

CLASSE DI RESISTENZA	RESISTENZA A COMPRESSIONE (N/mm <sup>2</sup> )				TEMPO DI INIZIO PRESA min	STABILITÀ (espansione) mm
	Resistenza a breve		Resistenza standardizzata			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni			
32.5L*	-	≥ 12				
32.5N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	
32.5R	≥ 10	-				
42.5L*	-	≥ 16				
42.5N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	≤ 10
42.5R	≥ 20	-				
52.5L*	≥ 10	-				
52.5N	≥ 20	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5R	≥ 30	-				

Prospetto 3: requisiti chimici definiti come valori caratteristici.

1	2	3	4	5
Proprietà	Metodo di riferimento	Tipo di cemento	Classe di resistenza	Requisiti <sup>a)</sup>
Perdita al fuoco	EN 196-2	CEM I CEM III	Tutte le classi	≤ 5,0%
Residuo insolubile	EN 196-2 <sup>b)</sup>	CEM I CEM III	Tutte le classi	≤ 5,0%
Solfati (come SO <sub>3</sub> )	EN 196-2	CEM I CEM II <sup>c)</sup> CEM IV CEM V	32,5N 32,5R 42,5N	≤ 3,5%
			42,5R 52,5N 52,5R	≤ 4,0%
		CEM III <sup>d)</sup>	Tutte le classi	
Cloruri	EN 196-21	Tutte le classi <sup>e)</sup>	Tutte le classi	≤ 0,10% <sup>f)</sup>
Pozzolanicità	EN 196-5	CEM IV	Tutte le classi	Esito positivo della prova

a) I requisiti sono espressi in percentuale in massa del cemento finale.

b) Determinazione del residuo insolubile in acido cloridrico e carbonato di sodio.

c) Il cemento tipo CEM II/B-T può contenere fino al 4,5% di solfato per tutte le classi di resistenza.

d) Il cemento tipo CEM III/C può contenere fino al 4,5% di solfato.

e) Il cemento tipo CEM III può contenere più dello 0,10% di cloruri, ma in tal caso si dovrà dichiarare il contenuto massimo di cloruro sull'imballo e/o sulla bolla di consegna.

f) Per utilizzi nel precompresso, i cementi possono essere prodotti con un requisito inferiore. In tale caso il valore 0,10% deve essere sostituito dal detto minore valore che deve essere dichiarato nel documento di consegna.

Prospetto 1: i 27 prodotti della famiglia dei cementi comuni.

Tipi Principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		C				
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Poz naturale	
			K	S	D <sup>b)</sup>	P	
<b>CEM I</b>	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	
<b>CEM II</b>	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	
	Cemento Portland composito <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-94	←			
		CEM II/B-M	65-79	←			
	<b>CEM III</b>	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	
<b>CEM IV</b>	Cemento pozzolanico <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←		
		CEM IV/B	45-64	-	←		
<b>CEM V</b>	Cemento composito <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←	

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 compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi compositi CEM V/A e CEM V/B





## CEMENTI DISPONIBILI SUL TERRITORIO NAZIONALE E DESTINAZIONI

**I**n base alle considerazioni esposte ai paragrafi precedenti, i cementi potenzialmente disponibili sul mercato, tenendo conto che almeno 27 sono i tipi/sottotipi e 6 le classi di resistenza, sono più di 162. Tuttavia, i cementi realmente a disposizione sul mercato sono in numero decisamente inferiore.

In base a quanto riportato dalle statistiche di settore, infatti, almeno in Italia non vengono prodotti i cementi Portland ai fumi di silice, alle ceneri volanti<sup>12</sup> e allo scisto calcinato. Infine, sono esclusi dalla produzione i cementi ad alto e altissimo tenore di loppa (tipo III/B e III/C) e i cementi compositi di tipo V/B. I cementi d'altoforno e quelli compositi commercializzati, inoltre, rappresentano solo un'aliquota marginale, rispettivamente pari allo 0.5% e 2.2%, dell'intera produzione.

I tipi di cemento più importanti sono:

- il cemento Portland al calcare (circa il 66% della produzione);
- il cemento pozzolanico (circa il 12.7%);
- il cemento Portland (circa il 13.4%);
- il cemento d'altoforno (circa il 4.2%).

Relativamente alle classi di resistenza, i cementi di classe 32.5N ed R rappresentano il 39.3% circa della produzione; quelli di classe 42.5 e 52.5 sia nella versione N che R il 60.7%. Il mercato nel corso degli ultimi anni ha mostrato una propensione verso un maggior impiego dei cementi ad alta resistenza se si tiene conto che 20 anni fa i cementi di classe 32.5 (a quell'epoca individuati con la sigla 325) rappresentavano circa il 71% del consumo totale.

Per quanto attiene, infine, alle **destinazioni del cemento quella più importante è rappresentata dalla produzione del calcestruzzo nelle centrali di betonaggio (circa il 44.5%)**, cui si aggiunge l'8.6% utilizzato per il confezionamento del conglomerato negli stabilimenti di prefabbricazione e il 6.1% circa impiegato direttamente dalle imprese di costruzione. In sostanza, circa il 59% del cemento prodotto è destinato alla realizzazione del calcestruzzo. In definitiva, si può concludere che la produzione del cemento è sostanzialmente finalizzata al confezionamento del calcestruzzo destinato alla realizzazione delle strutture ed infrastrutture civili (residenziali, commerciali, etc.) ed industriali.

<sup>12)</sup> Questa è una peculiarità del mercato italiano dove l'impiego delle ceneri avviene in maniera diffusa e consistente direttamente in centrale di betonaggio ove queste aggiunte minerali vengono utilizzate come ingrediente, unitamente al cemento, all'acqua, agli aggregati e agli additivi, per il confezionamento del calcestruzzo. Rispetto all'impiego di un cemento Portland alle ceneri, con percentuali prefissate dell'aggiunta pozzolanica, l'utilizzo della cenere direttamente in centrale di betonaggio, come ingrediente aggiuntivo del calcestruzzo, consente una maggiore flessibilità. Infatti, il quantitativo di cenere per m<sup>3</sup> di impasto può essere modulato in relazione alle prestazioni che si intendono conseguire. Per contro, l'utilizzo in centrale presenta, per il controllo meno stringente della qualità della cenere rispetto a quello realizzabile in cemeniteria, qualche controindicazione legata soprattutto alla variazione della percentuale di incombusto dell'aggiunta pozzolanica che potrebbe determinare variazioni nell'acqua di impasto del calcestruzzo.

## 10 L'ACQUA DI IMPASTO

La qualità dell'acqua assume un ruolo chiave nel confezionamento del conglomerato: una sua 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. La norma UNI EN 1008 a tal proposito fissa dei requisiti di accettazione sia per le acque potabili che per quelle di riciclo dell'industria del calcestruzzo, quelle 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 preliminare finalizzata ad escludere che:

- inquinanti di natura organica possano rallentare la cinetica di idratazione con inevitabili ripercussioni negative sui tempi di disarmo delle strutture;
- eventuali tensioattivi possano promuovere indesiderati inglobamenti di aria nel calcestruzzo con conseguenti abbattimenti delle prestazioni meccaniche;
- tracce di olio o di grasso possano determinare sia un rallentamento dello sviluppo delle resistenze 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" che deve risultare inferiore al limite riportato in Tabella.

*Valori massimi consentiti di alcune sostanze nelle acque destinate al confezionamento del conglomerato cementizio.*

SOSTANZE	CONTENUTO MASSIMO AMMISSIBILE
Cloruri	1000 (500 mg/l per strutture in c.a.p.)
Solfati	2000
Alcali	1500
Zuccheri	100
Fosfati	100
Nitrati	500
Piombo	100
ZINCO	100

Per il cloruro, indipendentemente dal contenuto di questo ione nelle acque, deve essere rispettato il contenuto totale nel calcestruzzo in accordo a quanto stabilito dalla EN 206-1.

Relativamente al quantitativo limite di solfato, esso è finalizzato ad impedire formazione di gesso ed ettringite secondaria, con conseguente espansione e fessurazione del calcestruzzo.

Il limite nel contenuto di alcali nell'acqua di impasto discende dalla necessità di limitare la presenza di questi ioni al fine di minimizzare il rischio della reazione alcali-aggregato. Se si tiene conto che il dosaggio medio di acqua di impasto è all'incirca di 180 Kg/m<sup>3</sup>, ammettere un tenore di alcali pari a 1500 mg/l equivale a introdurre nel calcestruzzo all'incirca 0.27 Kg di alcali che risultano, pertanto, marginali rispetto a quelli apportati dal cemento.

La restrizione nel contenuto delle altre sostanze riportate in Tabella ha come obiettivo quello di evitare interferenze sulla cinetica di idratazione del cemento in quanto sia gli zuccheri che i fosfati, ma anche alcuni sali di piombo e di zinco, possono rallentarla in modo significativo. 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 le perdite di lavorabilità durante il trasporto e la messa in opera del calcestruzzo.

Come sopra menzionato la norma UNI EN 1008 consente di utilizzare nel confezionamento del conglomerato le acque di riciclo delle centrali che producono il calcestruzzo. Le acque reflue negli impianti di produzione del conglomerato provengono dal lavaggio delle autobetoniere e dalla pulizia dei piazzali e sono raccolte nelle vasche di stoccaggio. Esse vengono successivamente riutilizzate in ciclo chiuso per il lavaggio dei mezzi adibiti al trasporto e al pompaggio del conglomerato a fine giornata lavorativa, per la diluizione del calcestruzzo residuo prima dello scarico all'impianto di riciclo e, infine, una volta "chiarificate", per l'ordinaria produzione del conglomerato cementizio. I sistemi per il recupero dei reflui e dei residui solidi sono di due tipi: con separatore elicoidale oppure con vasca provvista di agitatore.

Negli impianti di riciclo il materiale solido viene sottoposto a lavaggio forzato e le frazioni aventi dimensioni maggiori di 0.6 mm vengono restituite integralmente lavate. Dopo questo trattamento di pulizia, le acque di riciclo contengono particelle di materiale solido, che rimangono in sospensione, le cui dimensioni sono generalmente inferiori a 0.2 mm e la cui quantità varia fortemente in relazione all'acqua utilizzata per il lavaggio, al dosaggio di cemento del calcestruzzo prima del lavaggio e alla durata del ciclo.

Generalmente le acque di lavaggio contengono un residuo secco non superiore a 45g/l e un sedimento a riposo variabile tra 5 e 15ml/80ml. Relativamente a quest'ultimo aspetto, si fa notare come il sedimento sia superiore al limite imposto dalla norma UNI-EN 1008 e, quindi, le acque di riciclo non sarebbero idonee per il confezionamento del calcestruzzo. Tuttavia, si fa notare che, anche nella ipotesi cautelativa di impiegare 220 Kg/m<sup>3</sup> di acqua "riciclata", l'apporto di sostanze finissime di appena 10 Kg/m<sup>3</sup> sarebbe troppo esiguo per poter determinare una significativa riduzione della lavorabilità del calcestruzzo. Infatti, prove condotte impiegando nel confezionamento del calcestruzzo acque di riciclo con un sedimento a riposo compreso nell'intervallo sopramenzionato indicano che la riduzione di lavorabilità è all'incirca di 20 mm rispetto all'impasto di pari a/c confezionato con acqua potabile.

Le acque di riciclo soddisfano i requisiti di pH in quanto i valori misurati si attestano intorno a 13 (valore minimo ammesso dalla norma UNI-EN 1008 pari a 4), quelli relativi al contenuto di cloruri (che risulta compreso tra 39 e 62 mg/l circa inferiore ai 1000 mg/l ammessi dalla norma) e quelli relativi al contenuto di solfati, che essendo variabile tra 220 e 567 mg/l, risulta inferiore al limite (2000 mg/l) previsto dalla normativa vigente.

La presenza di solidi sospesi inoltre, non influenza negativamente le prestazioni meccaniche degli impasti. La resistenza meccanica a compressione a 7 e 28 giorni di calcestruzzi confezionati con acque di riciclo, infatti, risulta inferiore di meno del 5% rispetto a quella del conglomerato realizzato con acque potabili. In sostanza, si può concludere che le acque di lavaggio provenienti dall'industria del calcestruzzo possono essere utilizzate senza pregiudicare le prestazioni reologiche e meccaniche del conglomerato rispetto a quelle ottenibili impiegando le acque potabili.

# 11

## GLI AGGREGATI

**G**li aggregati per il confezionamento del calcestruzzo sono costituiti da:

- elementi lapidei provenienti da giacimenti naturali, come nel caso degli inerti di origine alluvionale estratti dal letto dei fiumi;
- materiale granulare ottenuto dalla frantumazione delle rocce;
- sottoprodotti di altri processi industriali, come avviene, ad esempio, per le scorie siderurgiche;
- materiale granulare ottenuto mediante processi industriali, come nel caso dell'argilla espansa utilizzata nel confezionamento dei calcestruzzi leggeri;
- materiale ottenuto per selezione e frantumazione di macerie provenienti dalla demolizione di edifici, di strutture in calcestruzzo armato oppure dal riciclo degli scarti di produzione del calcestruzzo negli stabilimenti che producono manufatti prefabbricati.

Indipendentemente dalla natura, gli aggregati per la produzione di calcestruzzo destinato ad usi strutturali debbono essere provvisti di marcatura CE in accordo al D.M. 11/04/2007, con sistema di attestazione di tipo 2+ ai sensi del DPR n. 246/93. Pertanto, come ribadito anche nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) al punto 11.2.9.2, gli aggregati per il calcestruzzo debbono essere provvisti di marcatura CE e le loro proprietà (requisiti minimi), vengono fissate dalla norma italiana UNI 8520/2 parte integrante, per l'applicazione nel territorio italiano, della norma europea armonizzata UNI EN 12620 (per gli aggregati leggeri la norma di riferimento è la UNI EN 13055-1).

Le più importanti proprietà degli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo sono riassunte in Figura unitamente alle prestazioni sulle quali esse esercitano un'influenza significativa. Come si può notare, gli aggregati intervengono in pratica a definire tutte le proprietà del conglomerato da quelle reologiche a quelle meccaniche, dallo sviluppo delle resistenze alla durabilità delle strutture e alle qualità estetiche della superficie dei getti.

*Proprietà degli aggregati e corrispondenti prestazioni del calcestruzzo che vengono influenzate.*

PROPRIETA' DELL'AGGREGATO	PRESTAZIONI DEL CALCESTRUZZO INFLUENZATE
- Distribuzione granulometrica - Forma - Tessitura - Contenuto di sostanze finissime	Proprietà reologiche del calcestruzzo fresco
- Forma e tessitura - Massa volumica - Distribuzione granulometrica - Natura di sostanze finissime - Modulo elastico	Proprietà elasto-meccaniche del calcestruzzo indurito
Contenuto di: - Sostanza umida - Zuccheri - Acido fulvico	Cinetica di idratazione del cemento Tempi di presa e di indurimento
Contenuto di: - Cloruri - Solfati - Zolfo totale - Minerali alcali reattivi - Gelività	Durabilità delle strutture in calcestruzzo armato
Contenuto di impurezze organiche leggere	Finitura superficiale ed estetica dei manufatti



Gruppo Cementirosi S.p.A.

### Granulometria

La caratterizzazione dell'aggregato dal punto di vista granulometrico si effettua determinando la percentuale di granuli di stessa dimensione mediante una serie di setacci impiantati dall'alto verso il basso con aperture decrescenti. L'analisi granulometrica consiste nel determinare la percentuale di granuli che vengono trattenuti (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; essa consente di classificare l'aggregato in base all'apertura del setaccio di maggiore e minore dimensione (D/d) cui corrispondono le percentuali di materiale trattenuto (o passante: il complemento a 100 del trattenuto) riportate in Tabella.

Requisiti granulometrici.

TIPO DI AGGREGATO	PASSANTE A D (%)	TRATTENUTO A D (%)	PASSANTE A d (%)
Aggregato grosso $D > 11.2\text{mm}$ e $D/d > 2$	90 - 99	10 - 1	0 - 15
Aggregato grosso $D \leq 11.2\text{mm}$ e $D/d \leq 2$	85 - 99 80 - 99	15 - 1 20 - 1	0 - 20 0 - 20
Aggregato fine $D \leq 4\text{mm}$ e $d=0$	85 - 99	15 - 1	-
Naturale 0/8 $D=8\text{mm}$ e $d=0$	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 Da 85 a 100	Passante a 0.063mm Da 70 a 100

Sulla base dell'analisi granulometrica è possibile, quindi, effettuare una prima distinzione tra **aggregati grossi e fini** (sabbie); questi ultimi<sup>14</sup> sono costituiti per almeno l'85% da granuli di dimensioni inferiori a 4 mm. Il diametro massimo dell'aggregato grosso rappresenta l'apertura del vaglio cui corrisponde una percentuale di materiale di dimensione maggiore di D variabile tra 1 e 20%. Il **filler** è costituito, invece, da materiale finissimo di dimensioni inferiori a 2 mm e granuli che almeno per il 70% posseggono dimensioni minori di 0.063 mm. Sono previsti, infine, due tipologie di aggregati con distribuzione granulometrica continua provvisti di granuli di dimensioni variabili da 8 oppure da 45 mm, rispettivamente per l'aggregato denominato "**Naturale 0/8**" e "**Misto**", fino a granuli finissimi tipici delle sabbie.

### Distribuzione granulometrica ottimale dell'aggregato per calcestruzzo

Se da una parte risulta di una facilità estrema caratterizzare l'aggregato disponibile in centrale di betonaggio dal punto di vista granulometrico, non altrettanto si può affermare in merito alla scelta di quale distribuzione granulometrica risulti ottimale per il confezionamento del calcestruzzo. Da un punto di vista teorico la distribuzione ideale è quella che consente di confezionare un conglomerato sufficientemente lavorabile con il minor dosaggio di acqua possibile, caratterizzato da una ridotta tendenza alla segregazione e che nel contempo risulti anche relativamente economico. E' inutile sottolineare come le proprietà sopramenzionate risultano sfortunatamente antitetiche in quanto:

- per ridurre la tendenza alla segregazione, ad esempio, è opportuno che l'aggregato contenga un sufficiente quantitativo di materiale fine passante a 0.250 mm. Questa esigenza, tuttavia, soprattutto negli impasti con modesti dosaggi di cemento, può determinare un significativo incremento della richiesta d'acqua per conseguire la lavorabilità desiderata, con la diretta conseguenza che si dovrebbe necessariamente aumentare il dosaggio di cemento per lasciare invariato il rapporto a/c e, quindi, le prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

- per massimizzare il volume occupato dagli aggregati al fine di rendere il calcestruzzo più economico, per il minor volume di pasta di cemento, è opportuno ricorrere a distribuzioni granulometriche di tipo continuo in cui i granuli di minori dimensioni sono in grado di riempire i vuoti tra le particelle più grandi. Tuttavia, estremizzare il concetto di minimizzazione dei vuoti conduce ad un volume di pasta di cemento che potrebbe risultare insufficiente a ricoprire completamente la superficie dei granuli di aggregato o condurre al confezionamento di impasti così aspri da risultare di difficile posa in opera.

Le considerazioni sopra espresse inducono a ritenere che **non esiste una unica curva granulometrica ideale valida per qualsiasi calcestruzzo, ma ne esistono tante ottimali da scegliere in base all'esigenza che risulta più cogente in relazione al tipo di calcestruzzo e di struttura cui esso è destinato.**

Quanto sopra affermato è indirettamente confermato dal fatto che in letteratura sono disponibili numerose curve granulometriche "pseudo-ideali" per ognuna delle quali si incontrano nelle centrali di betonaggio strenui sostenitori e altrettanto accaniti detrattori.

Nella Tabella vengono riassunte per ognuna delle curve granulometriche maggiormente utilizzate, le tipologie di calcestruzzo per le quali esse vengono consigliate.

*Curve granulometriche ottimali e corrispondenti calcestruzzi per i quali sono consigliate.*

CURVA OTTIMALE	CALCESTRUZZI PER I QUALI LA CURVA E' CONSIGLIATA
Fuller	Dosaggio di cemento: 280 - 320 kg/m <sup>3</sup> consistenza: S2 - S3
Fuller modificata	Dosaggio di cemento: 340 - 360 kg/m <sup>3</sup> consistenza: S2 - S3
Bolomey	Dosaggio di cemento: 280 - 320 kg/m <sup>3</sup> consistenza: S4 - S5
Bolomey modificata	Dosaggio di cemento: > 320 kg/m <sup>3</sup> consistenza: S4 - S5
Cubica	Calcestruzzi per diga; D > 63 mm; consistenza S1 o V1 - V2
Faury	Calcestruzzi per strutture prefabbricate con vibrazione a cassero

### **La combinazione granulometrica degli aggregati disponibili in centrale di betonaggio**

Ovviamente, salvo casi eccezionali, gli aggregati disponibili non posseggono una distribuzione granulometrica prossima a quella ottimale; pertanto, per riprodurre al meglio la granulometria della curva prescelta è necessario ricorrere all'impiego di aggregati di diversa pezzatura: generalmente almeno una sabbia e un aggregato grosso. La norma UNI 8520/2, a tal proposito, suggerisce per il confezionamento di calcestruzzi con classi di resistenza maggiori di C12/15 l'utilizzo di almeno due frazioni granulometriche e di almeno tre per conglomerati aventi classe di resistenza superiore a C30/37. L'impiego di un maggior numero di pezzature, infatti, consente di meglio riprodurre la distribuzione ottimale prescelta nel caso in cui gli aggregati dovessero evidenziare variazioni granulometriche tra le diverse forniture. Per lo stesso motivo al fine di evitare che la distribuzione granulometrica possa subire variazioni significative, anche in presenza di forniture di aggregato sostanzialmente costanti, è opportuno che lo stoccaggio in centrale di betonaggio avvenga in modo da evitare che ci siano "inquinamenti" tra le frazioni contigue realizzando degli idonei setti divisorii.

Individuata la curva granulometrica ottimale, la determinazione delle percentuali di impiego degli aggregati disponibili per poterla riprodurre al meglio rappresenta un problema di facile soluzione che può risolversi con metodi sia grafici che numerici.

E' importante sottolineare come un aumento della dimensione massima dell'aggregato,



Gruppo Cementirosi S.p.A.

a pari distribuzione granulometrica, indipendentemente dalla curva scelta, compatibilmente con la geometria e la percentuale di armatura dell'elemento da realizzare, determina una riduzione dell'area superficiale specifica degli elementi lapidei e, conseguentemente, una riduzione dell'acqua di impasto. Pertanto, a pari rapporto acqua/cemento, una distribuzione granulometrica di maggiori dimensioni massime consente di ridurre il dosaggio di cemento con innegabili vantaggi sia sul costo del conglomerato che sulla minimizzazione dei fenomeni lenti e dello sviluppo di calore.

Relativamente alla forma degli aggregati una caratteristica di particolare interesse è rappresentata dalla quantità di **elementi piatti**, stimati attraverso l'**indice di appiattimento** (UNI-EN 933-3) che rappresenta la percentuale di granuli che posseggono una delle dimensioni inferiore a circa 0.6 volte la dimensione media della frazione granulometrica cui essi appartengono. Un loro eccesso può accentuare, per la naturale tendenza degli stessi a disporsi secondo direzioni preferenziali sia il comportamento anisotropo del calcestruzzo che il fenomeno del bleeding interno.

### Requisiti granulometrici e prescrizioni di capitolato

Sebbene non ci siano dubbi sul fatto che la reologia del calcestruzzo fresco sia fortemente influenzata dalla forma e dalla distribuzione granulometrica degli aggregati; tuttavia, l'esatto ruolo svolto dai vari fattori in gioco risulta ancora ben lontana dall'essere compresa appieno. Per questo motivo, si ritiene che **in un capitolato tecnico relativo al calcestruzzo imporre dei vincoli stringenti in termini di granulometria sia fondamentalmente errato e possa risultare sia antieconomico che tecnicamente svantaggioso**. In sostanza, fissate le caratteristiche del conglomerato in termini di classe di resistenza, lavorabilità, segregazione e diametro massimo dell'aggregato è opportuno lasciare al produttore la possibilità di scegliere quale curva ottimale impiegare, in relazione anche agli aggregati disponibili e alle conoscenze maturate durante la produzione del conglomerato, a patto che sia in grado di rispettare le voci di capitolato senza vincolarlo con prescrizioni teoriche o esperienze legate in altri contesti che potrebbero risultare devianti e pericolose per l'opera che ci si accinge a realizzare.

### Sostanze indesiderabili di natura organica negli aggregati

Alcuni aggregati possono essere "inquinati" dalla presenza di impurezze di natura organica (principalmente prodotti di decomposizione di materiale di origine vegetale), che possono interferire sul processo di idratazione del cemento, rallentandolo. La risposta alla possibilità o meno di impiegare un aggregato può essere ottenuta da prove di confronto in termini di tempi di presa e di resistenza meccanica a compressione della malta confezionata con l'aggregato in esame, sospettato contenere sostanze organiche, rispetto alle stesse prestazioni conseguite con un aggregato di caratteristiche note esente da queste impurezze. In accordo con la **prova di confronto in malta**, per ritenere accettabile un aggregato, relativamente alla presenza di impurezze organiche, i tempi di presa non debbono risultare più lunghi di 120 min e la resistenza a compressione a 28 giorni non minore di più del 20% rispetto alle analoghe prestazioni dell'impasto di riferimento.

La presenza di sostanze organiche in eccesso può rivelarsi particolarmente pericolosa nel caso di calcestruzzi che richiedano uno scasso precoce o allorquando si esegua il getto nel periodo freddo. Infatti, in quest'ultimo caso, la cinetica di idratazione, già di per sé lenta per effetto della bassa temperatura, essendo ulteriormente rallentata per la presenza delle impurezze organiche, potrebbe esporre il calcestruzzo al rischio di degrado per formazione di ghiaccio se la temperatura durante le ore notturne si abbassa al di sotto di 0°C. Inoltre, la presenza di un eccesso di sostanze organiche può rivelarsi particolarmente negativa anche nel caso in cui il calcestruzzo con l'aggregato inquinato venga utilizzato per la realizzazione di pavimentazioni industriali; infatti, il ritardo sulla cinetica di idratazione costringerebbe a rimandare le operazioni per la realizzazione dello strato di usura superficiale (che possono essere iniziate solo quando il conglomerato ha iniziato la presa)

con inevitabili ripercussioni sul costo complessivo dell'opera.

Gli aggregati possono contenere particelle di natura organica leggere. Queste, per la minore massa volumica rispetto ai granuli dell'aggregato lapideo, tendono a risalire verso la superficie degli elementi orizzontali trascinati dall'acqua di bleeding e ad essere richiamati durante la vibrazione sulla parete del cassero. Al fine di evitare questi inconvenienti il limite nel contenuto di impurezze organiche leggere negli aggregati destinati al confezionamento di calcestruzzi per strutture faccia-vista o per pavimentazioni viene fissato pari allo 0.25 e allo 0.05% rispettivamente per gli aggregati fini e grossi.

### **Sostanze finissime negli aggregati**

Le prestazioni meccaniche del calcestruzzo sono influenzate dalla presenza sulla superficie dei granuli di particelle di materiale finissimo costituite dai residui di polvere derivanti dal processo produttivo e da materiale di natura limo-argilloso che possono ridurre l'adesione con la matrice cementizia. Per i motivi sopraesposti la norma UNI 8520/2 impone un limite al contenuto di frazioni fini passanti allo staccio di 0.063 mm in funzione della natura dell'aggregato.

Se gli aggregati posseggono una elevata percentuale di finissimo debbono essere sottoposti ad una prova tesa ad accertare se le sostanze fini sono di natura limo-argillose poiché, se così fosse, oltre ad incrementare la richiesta d'acqua sarebbero anche pericolose per il possibile abbattimento delle prestazioni meccaniche del conglomerato. Questa valutazione si esegue mediante un **test di sedimentazione** (in accordo con la norma UNI-EN 933-8) che misura l'**equivalente di sabbia (SE)** oppure mediante la valutazione del **valore del blu di metilene** (in accordo alla UNI-EN 933-9). L'aggregato risulta accettabile se SE risulta non inferiore a 80 o 70 rispettivamente per aggregati naturali e di frantumazione oppure se il valore di blu è inferiore a 1.2 g/Kg.

### **Resistenza a compressione e modulo elastico dell'aggregato**

La resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo dipende quasi esclusivamente dalle proprietà della matrice cementizia: la pasta di cemento, infatti, 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. I valori tipici di questa proprietà meccanica variano da circa 150 N/mm<sup>2</sup> per i calcari fino a oltre 250 N/mm<sup>2</sup> per le rocce quarzitiche. 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 25-30 N/mm<sup>2</sup>; si evince, quindi, come tale proprietà dell'aggregato, per i tradizionali conglomerati, non rivesta un ruolo fondamentale. La resistenza a compressione dell'aggregato, invece, potrebbe acquisire un maggior rilievo nei calcestruzzi ad alta e altissima resistenza meccanica<sup>15</sup> (con resistenze caratteristiche a compressione a 28 giorni maggiori o uguali a 60 N/mm<sup>2</sup>).

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 40000-90000 N/mm<sup>2</sup> e, pertanto, maggiore di quello della pasta di cemento i cui valori si attestano tra 15000 e 20000 N/mm<sup>2</sup>. 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.



### Aggregati alcali reattivi

Alcune forme di silice presenti negli elementi lapidei non sono stabili in presenza di alcali (sodio e potassio) e possono dar luogo ad espansioni distruttive nei manufatti. Gli alcali sono sempre presenti nel calcestruzzo in quanto contenuti nei cementi; essi, inoltre, possono pervenire per diffusione dall'ambiente esterno (acqua di mare ricca in cloruro di sodio e sali disgelanti a base di cloruro di sodio). Pertanto, l'impiego di aggregati contenenti queste sostanze indesiderabili espongono il calcestruzzo ad un forte rischio di dissesto.

Le principali forme mineralogiche alcali-reattive sono costituite prevalentemente da silice, sia di natura cristallina che criptocristallina, o da silice idrata a struttura prevalentemente amorfa presenti in diversi tipi di rocce.

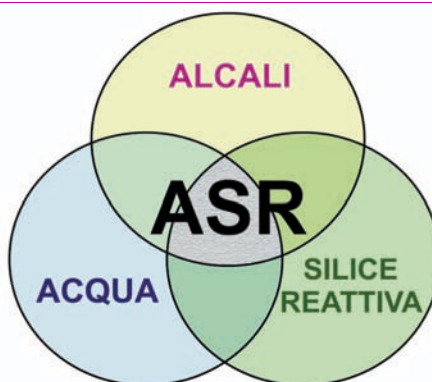
In presenza di alcali queste forme mineralogiche danno luogo ad una reazione chimica che porta alla formazione di silicati idrati alcalini a struttura gelatinosa che si depositano all'interno delle porosità dell'aggregato, all'interfaccia pasta-aggregato e nelle soluzioni di continuità presenti nella matrice cementizia. La formazione del gel alcalino è capace di promuovere la fessurazione e, successivamente, l'espulsione di parti consistenti di conglomerato cementizio. Il quadro fessurativo tipico della reazione alcali-aggregato è costituito da soluzioni di continuità ad andamento irregolare che non seguono il disegno dei ferri di armatura. L'ampiezza delle lesioni, inoltre, può risultare anche dell'ordine di qualche millimetro e ad esse si accompagnano anche forti disallineamenti, dello 0.1-0.5%, in quanto l'espansione avviene in maniera disuniforme interessando gli strati corticali delle strutture in misura maggiore per effetto del più elevato grado di saturazione.

La reazione alcali-aggregato è tanto più intensa, e i suoi effetti conseguentemente più deleteri, quanto maggiore è:

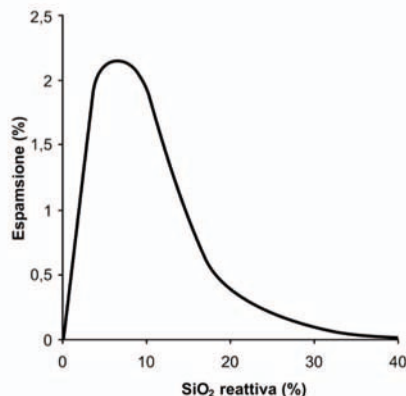
- la concentrazione di alcali nel calcestruzzo;
- il tenore di silice reattiva (almeno fino ad un certo valore, come meglio verrà specificato nel seguito) negli aggregati;
- il grado di saturazione del calcestruzzo.

Relativamente alla concentrazione critica di alcali si ritiene che la reazione non acquisti rilevanza dal punto di vista ingegneristico quando essa, espressa come  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente<sup>16</sup>, risulta nel calcestruzzo inferiore a  $3 \text{ Kg/m}^3$ . L'espansione, connessa con la reazione alcali-aggregato, cresce all'aumentare del contenuto di silice, ma una volta raggiunto un valore massimo essa diminuisce; in sostanza, esiste un valore "pessimale" del contenuto di silice in corrispondenza del quale l'espansione è massima.

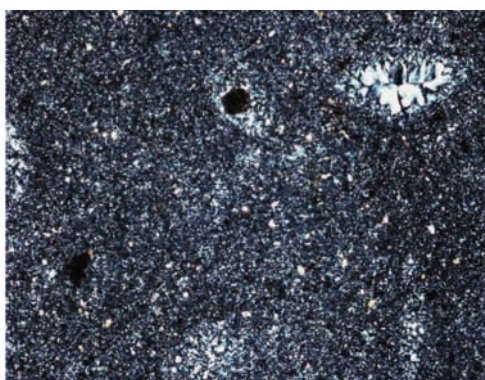
*I fattori che governano il meccanismo di degrado per reazione alcali-aggregato (ASR: Alkali-Silica Reaction).*



*Espansione di malte di cemento in funzione del tenore di silice reattiva negli aggregati.*



La reazione alcali-silice risulta molto pericolosa giacché si manifesta dopo qualche mese o addirittura dopo qualche anno (in funzione della concentrazione di alcali, della natura e della percentuale di silice presente negli aggregati e del grado di saturazione del calcestruzzo) dal getto del calcestruzzo e, quindi, quando risulta difficile qualsiasi intervento di ripristino per bloccare il fenomeno espansivo, essendo la struttura già in servizio. Per questo motivo la norma UNI 8520/2 impone che gli aggregati per calcestruzzo vengano sottoposti prima del loro impiego ad un esame petrografico da condursi in accordo alla norma UNI-EN 932-3, per accertare la presenza di minerali alcali reattivi. Nella eventualità che venga rilevata la presenza di una delle forme silicee pericolose, tuttavia, prima di scartare l'aggregato si procede ad effettuare una prova di espansione accelerata (UNI 8520/22) su prismi di malta confezionati con l'aggregato in esame e con un cemento volutamente ricco in alcali ( $\text{Na}_2\text{O} > 1\%$ ), mantenuti in una soluzione di idrossido di sodio (1N) alla temperatura di 80°C: trascorsi 16 giorni, l'espansione deve risultare al massimo pari allo 0.1%. In presenza di espansioni superiori a quella massima prevista nella prova accelerata, l'aggregato ancora non è da ritenersi inidoneo, ma deve essere sottoposto ad una ulteriore verifica che consiste nel misurare l'espansione in condizioni meno severe. I prismi di malta confezionati con le stesse modalità della prova accelerata vengono mantenuti in ambiente umido (anziché immersi nella soluzione di idrossido di sodio) alla temperatura di 38°C (invece che alla temperatura di 80 °C). Perché un aggregato sia ritenuto idoneo al confezionamento del calcestruzzo l'espansione sui prismi di malta deve risultare inferiore a 0.05 e 0.1% rispettivamente dopo 3 e 6 mesi di conservazione in ambiente umido. Solo nell'eventualità che anche questa prova dovesse fornire esito negativo l'aggregato viene scartato.



*Microfotografia di un campione di aggregato costituito da silice microcristallina. In alto a destra campo è evidente una cavità di forma pressoché ellittica con riempimento di calcedonio.*

Al fine di minimizzare o possibilmente annullare la possibilità che la reazione insorga è possibile ricorrere nel confezionamento del calcestruzzo all'utilizzo delle pozzolane. L'effetto benefico di questi materiali nel ridurre l'espansione è da ricercarsi nell'aumento del contenuto di silice reattiva di elevata superficie specifica che consente di incrementare il rapporto alcali-silice al fine di uscire dall'intervallo (3.5-5.5) ritenuto potenzialmente pericoloso. Allo scopo, pertanto, è consigliabile nel confezionamento del calcestruzzo di ricorrere all'impiego di cementi pozzolanici alle ceneri volanti oppure ai cementi d'altoforno; se questi non fossero disponibili, come sovente avviene in alcune aeree del Paese soprattutto durante il periodo invernale, una regola pratica è quella di aggiungere al cemento disponibile (generalmente Portland al calcare) per ogni grammo di alcali in eccesso rispetto ai 3 Kg/m<sup>3</sup> (ritenuti il limite critico al di sotto del quale la reazione non si manifesta):

- 40 g di cenere volante;
- oppure 15 g di fumo di silice.

L'aggiunta di pozzolana nel confezionamento del calcestruzzo può rivelarsi non sufficiente in quelle strutture ove l'apporto di alcali dall'esterno diventa rilevante come nelle pavimentazioni rifinite a spolvero di quarzo e cemento o con strato di usura a pastina soprattutto se durante la vita di servizio si ricorre all'impiego dei sali disgelanti a base di cloruro di sodio.

Infatti, gli elementi lapidei potenzialmente reattivi presenti all'interfaccia con lo strato di usura rimarrebbero a forte rischio di espansione a causa del rilevante contenuto di alcali apportato dallo strato indurente. Pertanto, essi, inevitabilmente, finirebbero per generare la reazione espansiva responsabile dei fenomeni di *pop-out* tipici delle pavimentazioni.



*Reazione alcali-aggregato  
in una pavimentazione in calcestruzzo.*

Al fine di ridurre al minimo questo rischio di dissesto è necessario, pertanto:

- impiegare preferibilmente aggregati conformi alla 8520-2 relativamente alla potenziale reattività agli alcali con totale assenza all'esame petrografico di forme mineralogiche di silice amorfa, quarzo criptocristallino, quarzo a estinzione ondulata, tridimite, cristobalite, etc;
- utilizzare cemento pozzolanico con ceneri volanti o in alternativa cementi Portland al calcare con aggiunta di cenere volante o di fumo di silice in parziale sostituzione della sabbia per il confezionamento del calcestruzzo. L'aggiunta deve avvenire in misura di circa 45 grammi di cenere volante (oppure 15 grammi di fumo di silice) per ogni grammo di alcali (espressi come ossido di sodio equivalente) in eccesso (apportati dal cemento) rispetto a 3 Kg/m<sup>3</sup>;
- sostituire parte del cemento impiegato per la miscela anidra destinata alla realizzazione dello strato di usura con fumo di silice, cenere volante (o, eventualmente, se disponibile loppa d'altoforno). In alternativa, impiegare cemento pozzolanico alle ceneri o cemento d'altoforno in luogo del cemento Portland o di quello Portland al calcare;

- unitamente a questi accorgimenti è opportuno adottare dei provvedimenti in termini di particolari costruttivi che consistono nel:

**A)** posizionare una barriera a vapore (foglio di politene) sulla massicciata prima di eseguire il getto del pavimento<sup>17</sup>;

**B)** realizzare pendenze adeguate (almeno 10 mm/m) per favorire un rapido smaltimento delle acque evitando che esse ristagnino sulla pavimentazione e che le stesse possano imbibire la pavimentazione dal basso soprattutto nelle zone di tombino e/o di canaletta.

Provvedimenti per prevenire la reazione alcali-aggregato in pavimentazioni con strato di usura a spolvero o a pastina.

<b>CALCESTRUZZO PER LA PAVIMENTAZIONE</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Aggreganti privi di forme alcali-reattivi</li><li>- Cemento Pozzolatico alle ceneri</li><li>- Cementi Portland al calcare e cenere volante o fumo di silice in sostituzione parziale della sabbia</li></ul>
<b>MISCELA ANIDRA O MALTA PER LO STRATO DI USURA A SPOLVERO O A PASTINA</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cemento Pozzolatico alle ceneri</li><li>- Cementi Portland al calcare e cenere volante o fumo di silice</li></ul>
<b>PARTICOLARI COSTRUTTIVI</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Barriera vapore</li><li>- Pendenze minime: 1.0%</li></ul>

### **Sostanze indesiderabili negli aggregati: cloruri, solfati e zolfo**

Relativamente ai cloruri introdotti tramite gli aggregati (determinati in accordo alla UNI-EN 1744 punto 7) la norma UNI 8520/2 stabilisce che, indicativamente, essi debbono risultare inferiori allo 0.03% in massa<sup>18</sup>. Considerando che gli aggregati vengono impiegati in un calcestruzzo in misura di circa 1850 Kg/m<sup>3</sup> e che il dosaggio medio di cemento in un impasto è all'incirca di 280 Kg/m<sup>3</sup>, la percentuale di cloruri aggiunti tramite inerti contraddistinti dal tenore massimo ammesso di Cl risulta più o meno dello 0.2% e, quindi, pari approssimativamente alla metà della minima concentrazione ritenuta critica ai fini dell'innescio della corrosione dei ferri. E' opportuno sottolineare che il limite del contenuto di cloruri degli aggregati è puramente indicativo. Questa posizione della norma 8520/2 è condivisibile in quanto ai fini della durabilità è importante che il cloruro complessivo nel calcestruzzo risulti inferiore a quanto stabilito dalla norma EN 206.

Il deterioramento per attacco solfatico può manifestarsi allorché nel confezionamento del calcestruzzo vengano impiegati aggregati inquinati da solfati in forma di gesso o anidrite. Le reazioni degradanti sono le stesse di quelle promosse dal solfato proveniente dall'ambiente esterno e i fenomeni di dissesto si manifestano in forma di fessurazioni, espansioni e espulsioni di porzioni consistenti di struttura. Per questo motivo è indispensabile sottoporre gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo ad un preventivo esame teso ad accertare l'assenza di minerali solfatici potenzialmente pericolosi. La norma UNI 8520/2 suggerisce, a tale scopo, di effettuare un preliminare esame petrografico e, qualora venisse accertata la presenza di gesso o anidrite, di determinare (in accordo alla UNI-EN 1744/1 punto 12) il contenuto di solfati solubili in acido: sono utilizzabili per il confezionamento del calcestruzzo aggregati che presentino un tenore di solfati (espressi come SO<sub>3</sub>) inferiore a 0.2 e 0.8 % in massa rispettivamente per le frazioni grosse e per quelli fini<sup>19</sup> inclusi i filler.

Oltre ai solfati, gli aggregati possono essere inquinati da composti che contengono zolfo che, ossidandosi, potrebbero dar luogo a fenomeni espansivi in forma di *pop-out* simili a quelli determinati dalla reazione alcali-aggregato. Per questo motivo la norma UNI 8520/2 impone un limite al contenuto di zolfo (da valutarsi in accordo alla UNI-EN 1744-1 punto 11) pari all'1 e al 2%, rispettivamente, per gli aggregati naturali e per le scorie

d'altoforno. Se negli aggregati è accertata la presenza di alcune forme di solfuri ossidabili quali pirite, pirrotina o marcasite, essendo queste forme reattive, il limite al contenuto di zolfo diventa più stringente (0.1%). Questi solfuri, infatti, a contatto con acqua e ossigeno formano un solfato ferroso che può decomporre per generare un idrossido, mentre gli ioni solfato possono reagire con i prodotti dell'idratazione del cemento. Si può anche creare acido solforico che può attaccare la pasta di cemento con formazione di macchie e crateri superficiali favorite dalle alte temperature e da ambienti particolarmente umidi.

### **Porosità, assorbimento e umidità degli aggregati: influenze sul processo produttivo del conglomerato**

All'interno dei granuli dell'aggregato sono presenti dei pori di dimensioni variabili da qualche decimo di micron a qualche decimo di millimetro, alcuni dei quali sono comunicanti con l'esterno (**pori aperti**). Il quantitativo di acqua rispetto alla massa secca dell'aggregato necessario a saturare completamente i pori aperti dell'aggregato (che può essere determinato con la procedura descritta dalla norma UNI-EN 1097-6) prende il nome di **assorbimento**. Esso dipende sostanzialmente dalla natura della roccia da cui provengono i granuli lapidei; pertanto, per aggregati provenienti da una stessa cava non subisce modifiche sostanziali nel tempo e la sua determinazione può essere effettuata con cadenza semestrale. Per gli aggregati disponibili sul territorio nazionale l'assorbimento varia:

- per le sabbie dallo 0.2 all'1.5%;
- per gli aggregati grossi dallo 0.8 al 3% circa.

Gli aggregati disponibili presso la centrale di betonaggio per il confezionamento del calcestruzzo generalmente si presentano:

- con i pori aperti completamente privi di acqua: aggregato **asciutto**;
- con i pori aperti parzialmente riempiti di acqua: aggregato **insaturo**;
- con i pori aperti completamente saturi e la superficie ricoperta da un velo di acqua: aggregato bagnato.

La massa di acqua in percentuale rispetto alla massa secca dell'aggregato prende il nome di umidità dell'aggregato. L'assorbimento, quindi, non è altro che un particolare valore di umidità che individua un aggregato con le porosità aperte sature e la superficie asciutta: aggregato **saturo a superficie asciutta (s.s.a.)**.

Se nel confezionamento del calcestruzzo vengono utilizzati aggregati asciutti o insaturi, i granuli sottraggono parte dell'acqua introdotta nel mescolatore fino a saturare completamente le porosità aperte. L'acqua assorbita, non essendo disponibile per il processo di idratazione del cemento, non deve essere tenuta in conto nel calcolo del rapporto a/c dell'impasto<sup>20</sup>. Se, per contro, si introducono nel mescolatore aggregati bagnati, l'acqua in eccesso (rispetto a quella necessaria a saturare i pori aperti) presente sulla superficie dell'inerte viene ceduta all'impasto e coinvolta nel processo di idratazione del cemento. L'acqua in "più", quindi, insieme a quella introdotta nel mescolatore, deve essere conteggiata nel calcolo del rapporto acqua/cemento dell'impasto. Si intuisce, quindi, come nella produzione del calcestruzzo diventi di fondamentale importanza, se si vuole rispettare il rapporto a/c prefissato e, corrispondentemente, evitare che le prestazioni meccaniche dell'impasto subiscano forti oscillazioni, determinare l'esatto quantitativo di acqua sottratto dagli aggregati asciutti o insaturi o ceduto da quelli bagnati.

A titolo di esempio, si supponga che l'acqua efficace debba essere 150 Kg/m<sup>3</sup>, il dosaggio di cemento 300 Kg/m<sup>3</sup> (a/c=0.50) e quello degli aggregati (in condizioni s.s.a.) pari a 1800 Kg/m<sup>3</sup>; inoltre, l'aggregato disponibile in centrale di betonaggio sia completamente asciutto (u=0) e caratterizzato da un assorbimento pari all'1.5%. Le pesate di materiale da introdurre realmente nel mescolatore saranno:

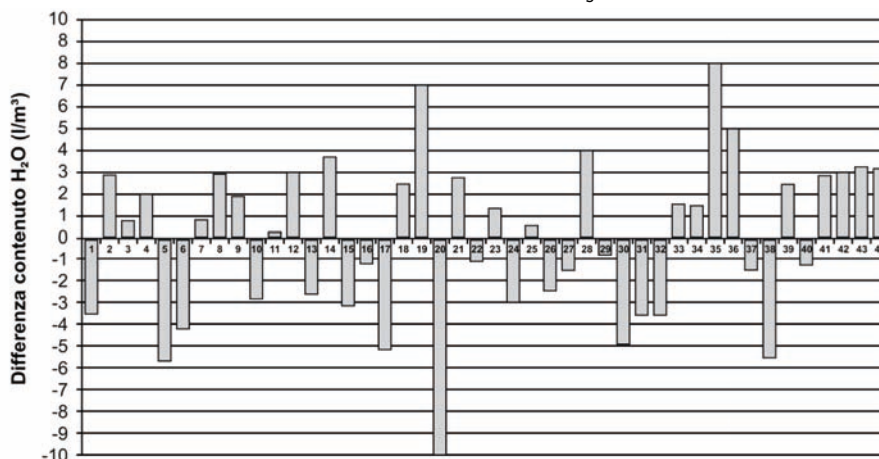
- aggregati asciutti ( $u=0$ ):  $1773 \text{ Kg/m}^3$  ( $1800 \cdot 100/101.5$ )
- acqua:  $177 \text{ Kg/m}^3$  ( $150 + (1800-1773)$ )
- cemento:  $300 \text{ Kg/m}^3$  (rapporto  $a_{\text{efficace}}/\text{cemento} = (177-23)/300 = 0.50$ )

Se nel caso dell'esempio precedente l'aggregato fosse bagnato e caratterizzato da un'umidità del 2.5%, le pesate da introdurre nel mescolatore risulterebbero:

- aggregati bagnati ( $u=2.5\%$ ):  $1818 \text{ Kg/m}^3$  ( $1800 \cdot 102.5/101.5$ )
- acqua:  $132 \text{ kg/m}^3$  ( $150 + (1800-1818)$ )
- cemento:  $300 \text{ Kg/m}^3$  (rapporto  $a_{\text{efficace}}/\text{cemento} = (132 + 18)/300 = 0.50$ )

Il problema della correzione delle pesate, almeno a "tavolino", risulta di facile soluzione. Non ugualmente avviene nella pratica in quanto, se da una parte il valore dell'assorbimento può essere determinato per l'aggregato *una tantum*, dall'altra, la misura dell'umidità degli aggregati, stoccati nella centrale di betonaggio, varia sensibilmente e deve essere rilevata continuamente. Il valore dell'umidità, infatti, è fortemente influenzato non solo dalle condizioni climatiche, ma anche dalle modalità di stoccaggio dei materiali lapidei. Questa dipendenza impone, se si vogliono evitare forti oscillazioni nel rapporto a/c, la determinazione dell'umidità per ogni carico di aggregati che viene introdotto nel mescolatore. Per risolvere il problema della misurazione dell'umidità dell'aggregato in tempo reale vengono impiegate sonde che attraverso la misura della resistività elettrica e mediante delle opportune curve di taratura sono in grado di determinare il contenuto di acqua dell'aggregato. La misura della resistività, infatti, è influenzata dal tenore di umidità dei granuli lapidei. Recentemente, è stato proposto un nuovo sistema di misurazione dell'umidità degli aggregati basato sull'utilizzo delle onde elettromagnetiche. Il sistema è basato sull'impiego di due sensori che possono essere posizionati all'uscita del materiale dal silos, sui nastri trasportatori oppure sulla bilancia. Con questo sistema di misurazione si ottiene uno scostamento del valore dell'acqua di impasto effettivo di appena  $6 \text{ Kg/m}^3$  rispetto al valore nominale che, in termini di rapporto a/c, equivale ad un'oscillazione di circa 0.01-0.02. Questo significa, ad esempio, che con questo sistema di controllo si potrebbe ridurre lo scarto quadratico medio dei valori di resistenza a compressione dai valori tipici ( $5 \text{ N/mm}^2$ ) delle attuali centrali di betonaggio che già operano uno stringente controllo di produzione a circa  $2-2.5 \text{ N/mm}^2$  con conseguenti benefici sia sulla sicurezza delle strutture che sull'economicità del processo produttivo.

Scostamento tra il valore effettivo dell'acqua efficace e quello determinato tramite la lettura con i sensori elettromagnetici.





<sup>13)</sup> Gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo debbono, inoltre, essere provvisti di marcatura CE in accordo a quanto stabilito dalla Direttiva 89/106/CEE e dal D.P.R. 246 del 21.4.1993.

<sup>14)</sup> Le sabbie oltre ad essere individuate dall'apertura dei setacci D/d possono essere caratterizzate dal punto di vista granulometrico attraverso il modulo di finezza che rappresenta la somma dei trattenuti percentuali ai setacci di apertura 0.125, 0.250, 0.5, 1, 2 e 4 mm divisa per 100.

<sup>15)</sup> Per i calcestruzzi aventi classe di resistenza maggiore o uguale a C50/60 la norma UNI 8520/2 suggerisce di impiegare aggregati con un coefficiente Los Angeles (LA) non superiore a 30. Il coefficiente LA misura la percentuale di materiale fine prodotta per effetto dell'attrito e dell'abrasione esercitata da biglie di acciaio introdotte unitamente all'aggregato in un cilindro rotante. Il coefficiente LA mostra una buona correlazione non solo con la resistenza all'abrasione dei granuli dell'aggregato lapideo, ma anche con la resistenza a compressione e a trazione per flessione del calcestruzzo confezionato con l'aggregato analizzato.

<sup>16)</sup> Il contenuto di alcali come Na<sub>2</sub>O equivalenti (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) vale :  $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658 K_2O$ . Per quanto semplicistico, in quanto a parità di concentrazione di alcali i calcestruzzi con un maggior tenore di ossido di potassio sono potenzialmente più esposti al rischio di reazione alcali-aggregato, il criterio che stabilisce l'assenza di pericolosità per tenori di Na<sub>2</sub>O equivalenti inferiori ai 3Kg/m<sup>3</sup>, risulta valido dal punto di vista pratico.

<sup>17)</sup> Il posizionamento della barriera vapore si rende indispensabile quando la superficie superiore del pavimento debba ricevere un rivestimento impermeabile in resina. Infatti, l'eventuale risalita di acqua per capillarità dal terreno di sottofondo determinerebbe un accumulo della stessa al di sotto del rivestimento praticamente impermeabile. A seguito del riscaldamento degli ambienti, l'aumento della tensione di vapore potrebbe determinare il distacco del rivestimento con formazione di bolle. E' da sottolineare come in assenza di barriera vapore la realizzazione di un rivestimento in resina su una pavimentazione in calcestruzzo finirebbe per esaltare il rischio di reazione alcali-aggregato a causa dell'aumento del grado di saturazione del calcestruzzo determinato dall'impedimento all'evaporazione di acqua esercitato proprio dal rivestimento impermeabile.

<sup>18)</sup> Qualora gli aggregati grossi venissero estratti dal mare, la norma europea EN 12620 impone di quantificare il contenuto in conchiglie. Sebbene questi gusci sembrano non influenzare la durabilità del calcestruzzo, né le prestazioni meccaniche, un loro eccesso potrebbe determinare un incremento della richiesta d'acqua a pari lavorabilità del conglomerato.

<sup>19)</sup> Il contenuto di solfati ammesso nelle scorie d'altoforno (1%) risulta maggiore di quello ammesso negli aggregati naturali in quanto parte del solfato è incapsulato nei granuli e non può, pertanto, reagire con i prodotti di idratazione del cemento.

<sup>20)</sup> Nel proporzionamento dell'aggregato tenendo presente che l'acqua efficace è quella che si trova esternamente ai granuli dell'aggregato, al fine di calcolare la massa degli aggregati in un m<sup>3</sup> di calcestruzzo, occorrerà moltiplicare il volume complessivamente occupato dai granuli (comprendente sia lo scheletro solido che le porosità aperte e chiuse) per la massa volumica del granulo nella condizione s.s.a. Per gli aggregati disponibili sul territorio nazionale, ad eccezione di alcuni materiali lavici disponibili nella Sicilia Orientale, la massa volumica è solitamente compresa tra 2.60 e 2.70 g/cm<sup>3</sup>.

# 12

## AGGREGATI DI RICICLO

Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008), oltre agli aggregati naturali e a quelli artificiali, prevedono che per il confezionamento del calcestruzzo possano essere utilizzati aggregati di riciclo ottenuti dalla selezione e successiva frantumazione di materiale edile proveniente dalla demolizione di edifici, di strutture in calcestruzzo armato oppure dal riciclo degli scarti di produzione del calcestruzzo negli stabilimenti che producono manufatti prefabbricati. Suddette Norme fissano le percentuali massime di impiego di aggregati di riciclo in funzione della loro origine (se provenienti dalle macerie o se ottenuti dalla frantumazione esclusiva di strutture in calcestruzzo armato) e della resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo cui essi sono destinati.

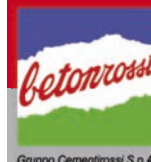
ORIGINE DEL MATERIALE DA RICICLO	CLASSE DEL CALCESTRUZZO	PERCENTUALE DI IMPIEGO
Demolizioni di edifici (macerie)	= C8/10	fino al 100 %
Demolizioni di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C30/37 ≤ C20/25	≤ 30 % fino al 60 %
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati - da qualsiasi classe da calcestruzzi >C45/55	≤ C45/55 Stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 15% fino al 5%

In accordo al nuovo Regolamento UE 305/2011 (detto CPR) del Parlamento europeo e del Consiglio del 9 marzo 2011, anche gli aggregati di riciclo, come quelli naturali, devono essere marcati CE rispettando le caratteristiche minime fissate in funzione della destinazione d'uso. Altresì, l'utilizzo degli aggregati di riciclo, ovviamente nei limiti fissati dalla tabella soprariportata, è subordinato ad una prequalifica del calcestruzzo, in cui gli stessi vengono introdotti, documentata mediante prove di laboratorio tese ad accertarne prestazioni reologiche e meccaniche. Inoltre, per gli aggregati di riciclo le prove di controllo di produzione di fabbrica, in accordo con i prospetti H1, H2 ed H3 dell'annesso ZA alla norma UNI EN 12620 debbono essere effettuate ogni 100 tonnellate di prodotto e, comunque, ogni giorno di produzione.

Con la Direttiva 98/2008/CE l'Unione Europea ha sancito che gli Stati membri, entro il 2020, devono raggiungere l'obiettivo di riciclare almeno il 70% dei rifiuti C&D (rifiuti inerti provenienti dalle operazioni di costruzione e demolizione) all'interno di un progetto ambizioso che definisce le strategie ambientali degli Stati membri, in cui il "rifiuto" deve essere considerato come risorsa da trasformare in materia riutilizzabile. Alla luce degli obiettivi richiesti, l'industria della costruzione avrà bisogno di potenziare le competenze per quanto concerne il riutilizzo dei materiali attualmente considerati di scarto aumentando i progetti di ricerca su queste tematiche e, dall'altro canto, sarà necessario un aggiornamento normativo che permetta un maggiore utilizzo di tali prodotti secondari per la produzione del conglomerato cementizio. Purtroppo, una recente indagine condotta ha evidenziato che la situazione italiana non è - relativamente a questo aspetto - delle più rosee. Infatti, le imprese italiane che utilizzano aggregati riciclati nella produzione di calcestruzzo preconfezionato rappresentano appena l'11.4% del totale ed il rimanente 88.6% ha dichiarato di non farne uso. Le principali ragioni per le quali non vengono utilizzati gli aggregati di riciclo risiedono sia in una mancanza di richiesta da parte dei progettisti nella fase di prescrizione, sia per l'assenza di certezza in termini prestazionali della miscela nonché per una forte limitazione imposta dalla normativa vigente.

In Europa esistono già dei Paesi virtuosi, come Danimarca ed Inghilterra, ove - grazie a degli incentivi economici per l'utilizzo di aggregati riciclati, all'aumento delle tasse per il conferimento a discarica dei rifiuti C&D e a multe per l'inosservanza delle regole sancite - è fortemente diffuso l'uso di questo tipo di aggregati nella produzione del calcestruzzo.

Anche in Svizzera, nella revisione della norma SIA 262 «Costruzioni di calcestruzzo» è



Gruppo Cementirosi S.p.A.

stata inserita la possibilità di realizzare opere in calcestruzzo armato strutturale ricorrendo al calcestruzzo con aggregati di riciclo. La composizione, le proprietà e le prestazioni dei conglomerati con aggregati di riciclo vengono riportate in un quaderno tecnico (SIA 2030:2010 Recyclingbeton) che viene richiamato dalla SIA 262. In accordo al quaderno tecnico SIA 2030:2010 possono essere identificati diversi tipi di calcestruzzi confezionati con materiale di riciclo:

**1. CALCESTRUZZO RICICLATO:** Calcestruzzo conforme alla SN EN 206-1 in cui almeno il 25% dell'aggregato avente una pezzatura maggiore di 4mm è di riciclo;

**2. CALCESTRUZZO RICICLATO** tipo RC-C (con aggregati di riciclo provenienti dalla demolizione del calcestruzzo:  $R_c$ ): Calcestruzzo conforme alla SN EN 206-1 in cui almeno il 25% dell'aggregato avente una pezzatura maggiore di 4mm è di riciclo di tipo  $R_c$ ;

**3. CALCESTRUZZO RICICLATO** tipo RC-M (con aggregati di riciclo provenienti dalla demolizione di edifici, macerie:  $R_b$ ): Calcestruzzo conforme alla SN EN 206-1 in cui almeno il 25% dell'aggregato avente una pezzatura maggiore di 4mm è di riciclo: 5% di tipo  $R_b$  e  $(R_b+R_c) \geq 25\%$ .

Inoltre, nel suddetto quaderno tecnico, identificato l'aggregato in funzione della sua origine, vi è riportata una tabella in cui sono imposti i limiti massimi di utilizzo per ogni miscela di aggregati e un'altra con le indicazioni per l'impiego nel rispetto delle condizioni di durabilità previste per l'opera da realizzare.

Sarebbe, quindi, auspicabile che anche in Italia, attraverso un aggiornamento normativo, una maggiore sensibilizzazione sulle tematiche ambientali e una semplificazione burocratica, ci fosse una concreta riduzione dei conferimenti a discarica con l'incremento di recupero di materia ed energia, come già avviene in altri stati membri dell'Europa.

SIGLA	TIPI DI MISCELA	AGGREGATI CONFORMI ALLA SN EN 12620-1				ALTRE AGGIUNTE	
		$R_u^1$	$R_c^1$	$R_b^1$	$R_a^1$	$X+R_g^1$	FL <sup>1</sup>
C x/y	Tradizionale	$\geq 75\%$	$< 25\%$	$\leq 5\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0.3\%$	$\leq 2\text{cm}^3/\text{kg}$
C x/y RC-C	Calcestruzzo di riciclo con aggregati dalla demolizione di calcestruzzo	$< 75\%$	$\geq 25\%$	$\leq 5\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0.3\%$	$\leq 2\text{cm}^3/\text{kg}$
C x/y RC-M	Calcestruzzo di riciclo con aggregati dalla demolizione di edifici (macerie)	$< 95\%$		$\geq 5\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0.3\%$	$\leq 2\text{cm}^3/\text{kg}$

<sup>1</sup>  $R_a$  = Materiali bituminosi conformi alla SN EN 933-11;  $R_b$  = Mattoni e tegole in argilla, pietra arenaria calcarea, cemento cellulare (non-floating) conformi alla SN EN 933-11;  $R_c$  = Aggregato riciclato proveniente dalla demolizione di calcestruzzo, secondo SN EN 933-11;  $R_g$  = Aggregato di vetro, secondo SN EN 933-11;  $R_u$  = Aggregato naturale; X = Aggregato di altra natura: terreni coerenti (argilla), metallo, legno, materiali sintetici, gomma, gesso (SN EN 933-11); FL = Materiale galleggiante in volume, in accordo alla SN EN 933-11

	CALCESTRUZZO DI RICICLO	CLASSI DI ESPOSIZIONE				
		X0 (CH)	XC1 (CH) SECCO	XC1 (CH) UMIDO XC2 (CH) XC3 (CH)	XC4 (CH)	XD (CH) XF (CH) XA1-3 (CH)
RC-C	$R_c \geq 25\%$ $R_b < 5\%$	Ammesso				Ammesso a seguito di prove preliminari
RC-M	$R_b = 5 \pm 25\%$ $R_c + R_b \geq 25\%$	Ammesso			Ammesso a seguito di prove preliminari	Non ammesso
	$R_b \geq 25\%$	Ammesso	Ammesso solo a seguito di prove preliminari			

## 13

## GLI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO

**G**li additivi per calcestruzzo sono sostanze chimiche di natura prevalentemente organica (generalmente impiegati in forma liquida) che vengono aggiunte in percentuali (rispetto alla massa del cemento e delle aggiunte pozzolaniche) variabili tra lo 0.1 e il 3%, producendo sensibili modifiche alle caratteristiche del conglomerato sia allo stato fresco che a quello indurito. Nella moderna tecnologia del calcestruzzo questi prodotti, nell'ultimo ventennio, hanno assunto un ruolo di primaria importanza tanto che, ormai, possono ritenersi un ingrediente utilizzato di routine nella produzione del conglomerato cementizio. In Italia, ad esempio, stime ufficiose parlano di un consumo di additivi di circa 250000 tonnellate impiegate in circa l'80% della produzione complessiva di calcestruzzo.

Gli additivi per calcestruzzo vengono classificati, in accordo con la norma UNI-EN 934-2 che ne definisce anche i requisiti minimi, in base alla funzione principale che essi svolgono allorché vengono introdotti nell'impasto.

### Gli additivi resistenti all'acqua e ritentori di acqua

Tra gli additivi per calcestruzzo sono da annoverare sia quelli ritentori di acqua che quelli resistenti all'acqua. Questi ultimi, in grado di ridurre l'assorbimento di acqua per capillarità<sup>21</sup> sono utilizzati per il confezionamento di calcestruzzi destinati alla realizzazione di muri interrati in presenza di acque di falda; tuttavia, essi sono poco diffusi in quanto risulta molto più economico ed efficace confezionare calcestruzzi "impermeabili" adottando rapporti acqua/cemento inferiori a 0.55. Una possibile applicazione di questi additivi, riguarda i calcestruzzi faccia-vista colorati per i quali esiste un problema di perdita di colore nel tempo.

Al pari degli additivi resistenti all'acqua anche quelli ritentori di acqua sono praticamente non utilizzati per la produzione del calcestruzzo. Si tratta, infatti, di prodotti capaci di ridurre l'acqua essudata<sup>22</sup>. In passato questi additivi sono stati utilizzati per migliorare la pompabilità di calcestruzzi magri con dosaggi di cemento inferiori ai 260-280 Kg/m<sup>3</sup> più che per ridurre l'acqua essudata<sup>23</sup>. 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 ed, in particolare, alle ceneri volanti.

### Gli additivi ritardanti di presa

Gli 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 allorché 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. Gli additivi ritardanti in questo contesto vengono impiegati per ridurre la perdita di lavorabilità in modo da poter garantire allo scarico sul cantiere quella prefissata dal progettista. In linea di massima, questi additivi consentono di ridurre la perdita di lavorabilità di circa il 50-60% rispetto ad un conglomerato non additivato. E' da evidenziare, inoltre, come gli additivi ritardanti di presa posseggono anche una sia pur modesta capacità di ridurre l'acqua di impasto a pari consistenza, di circa il 2-5% in funzione del dosaggio di prodotto (generalmente 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 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



Gruppo Cementirosi S.p.A.

giunto “freddo” che in servizio potrebbe dar 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.

E’ da segnalare, tuttavia, come l’impiego degli additivi ritardanti è in forte diminuzione in quanto negli ultimi anni sono apparsi sul mercato superfluidificanti che associano alla funzione principale di aumento della fluidità (o della riduzione d’acqua a pari consistenza) un eccellente mantenimento della lavorabilità iniziale e un effetto di ritardo dei tempi di presa. Per comodità, quindi, nella produzione del calcestruzzo si preferisce impiegare un unico prodotto piuttosto che utilizzare un additivo fluidificante/superfluidificante e uno capace di allungare i tempi di presa.

### **Gli additivi acceleranti di presa**

Gli additivi acceleranti di presa sono sostanze capaci, soprattutto alle basse temperature, di anticipare i tempi di inizio e fine presa del conglomerato<sup>24</sup>. I principali campi di applicazione degli additivi acceleranti di presa riguardano:

- i calcestruzzi destinati alle pavimentazioni industriali con strato di usura a “spolvero” o a “pastina”;
- i betoncini (applicati a spruzzo: spritz-beton) per la realizzazione di rivestimenti provvisori e definitivi in galleria finalizzati sia ad evitare la caduta di materiale dalle pareti di scavo – onde salvaguardare l’incolumità del personale di cantiere– che bloccare le venute di acqua dalla roccia.

Nelle pavimentazioni industriali in calcestruzzo la realizzazione dello strato di usura superficiale può iniziare soltanto quando il calcestruzzo ha già iniziato la presa. Durante il periodo invernale l’inizio presa si verifica all’incirca dopo 8-10 ore dal getto, costringendo le 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. L’utilizzo degli additivi acceleranti di presa, in questo contesto, si rileva di particolare utilità per la possibilità di anticipare l’esecuzione dello strato di usura di qualche ora consentendo di terminare le operazioni di finitura entro la tarda serata. In questo modo, la “squadra” di operai può essere utilizzata il giorno successivo su un altro cantiere al contrario di quanto accadrebbe se i lavori venissero ultimati a notte inoltrata.

### **Gli additivi acceleranti di indurimento**

Gli 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<sup>25</sup>.

L’effetto accelerante dell’additivo sulle resistenze meccaniche a compressione del calcestruzzo, tuttavia, si esaurisce già dopo qualche giorno (circa 7 giorni) e alle lunghe stagionature può anche determinare una diminuzione (sebbene contenuta al di sotto del 10%) delle resistenze meccaniche a compressione rispetto all’impasto non additivato<sup>26</sup>. Il principale campo di applicazione di questi prodotti, pertanto, riguarda i calcestruzzi da utilizzarsi durante le stagioni fredde allorquando la cinetica di idratazione del cemento è rallentata dalle basse temperature ambientali. In queste circostanze, infatti, rimane alto il rischio che per effetto di eventuali gelate notturne il calcestruzzo, ancora non sufficientemente indurito, possa essere irrimediabilmente danneggiato dal congelamento dell’acqua contenuta al suo interno. E’ da segnalare come nella moderna tecnologia del calcestruzzo gli additivi acceleranti di indurimento sono in lento declino in quanto nella produzione del conglomerato si preferisce utilizzare additivi superfluidificanti che associano alla caratte-



Gruppo Cementirosi S.p.A.

ristica principale di aumento della lavorabilità un'azione collaterale di accelerazione dei processi di presa e indurimento che, almeno nei nostri climi, sono sufficienti per poter effettuare i getti in tutta sicurezza anche nel periodo invernale.

### **Gli additivi fluidificanti e superfluidificanti**

I fluidificanti (o riduttori di acqua) e i superfluidificanti (o riduttori di acqua ad alta efficacia) rappresentano sicuramente gli additivi per calcestruzzo più diffusi e massicciamente impiegati nel settore della tecnologia del calcestruzzo. Infatti, in Italia si stima che essi rappresentino circa il 90-95% dell'intero mercato del settore. Il consumo di questi additivi si attesta all'incirca tra 220000 e 235000 tonnellate/anno. Di queste circa 180000-200000 tonnellate sono costituite dai superfluidificanti che, pertanto, rappresentano di gran lunga gli additivi più importanti sia da un punto di vista strettamente commerciale che tecnico.

Aggiunti all'impasto in misura solitamente variabile tra lo 0.2-0.5% (fluidificanti) e lo 0.6-2.0% (superfluidificanti) questi additivi svolgono sostanzialmente due funzioni principali:

**A)** sono capaci di **ridurre l'acqua di impasto rispetto a quella di un conglomerato di pari consistenza** non additivato (riduttori/super-riduttori di acqua). La riduzione dell'acqua di impasto può essere finalizzata:

**A1) alla riduzione del rapporto a/c lasciando invariato il dosaggio di cemento originario.** Questa modalità di impiego produce effetti benefici sulla riduzione della tendenza alla segregazione dell'impasto e ha come obiettivo primario quello di aumentare le prestazioni meccaniche del calcestruzzo, ridurre la permeabilità e, conseguentemente, ottenere un conglomerato più durevole caratterizzato da minor ritiro e deformazione viscosa;

**A2) alla riduzione del dosaggio di cemento originario lasciando invariato il rapporto a/c.** In questa evenienza, l'obiettivo primario che si intende conseguire può essere di tipo strettamente economico oppure finalizzato a ridurre lo sviluppo di calore a seguito dalla reazione esotermica di idratazione del cemento con l'acqua o per incrementare il volume della frazione lapidea al fine di attenuare le contrazioni da ritiro igrometrico con l'intento di minimizzare il quadro fessurativo delle strutture.

**B)** consentono di **incrementare la lavorabilità del calcestruzzo** (fluidificanti/superfluidificanti) **lasciando invariata sia l'acqua di impasto che il dosaggio di cemento** di un conglomerato non additivato. In effetti, questa modalità di impiego è "fittizia" in quanto equivale a quella A2 sopradescritta.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Principali modalità di impiego degli additivi riduttori di acqua e riduttori di acqua ad alta efficacia e relativi effetti sulle proprietà del calcestruzzo.

MODALITA' DI IMPIEGO	EFFETTI
Riduzione dell'acqua di impasto rispetto ad un impasto di pari consistenza lasciando invariato il dosaggio di cemento	<b>RIDUZIONE RAPPORTO ACQUA/CEMENTO:</b> - incremento delle prestazioni meccaniche - diminuzione della permeabilità - rallentamento della cinetica di diffusione dei fluidi gassosi e delle sostanze in forma ionica disciolte nell'acqua - diminuzione del ritiro igrometrico - diminuzione della deformazione viscosa - riduzione della segregazione e del bleeding
Riduzione dell'acqua di impasto rispetto ad un impasto di pari consistenza e rapporto acqua/cemento	<b>RIDUZIONE DEL DOSAGGIO DI CEMENTO:</b> - diminuzione del costo unitario del calcestruzzo - riduzione dello sviluppo di calore per effetto della reazione esotermica di idratazione del cemento - diminuzione del ritiro igrometrico - diminuzione della deformazione viscosa

Gli additivi fluidificanti e superfluidificanti vengono classificati in accordo alla norma UNI-EN 934-2 in base al potere di riduzione dell'acqua di impasto e al conseguente beneficio in termini di prestazioni meccaniche derivante dalla riduzione del rapporto acqua/cemento in:

- **fluidificanti/riduttori di acqua (FL)** quelli che consentono di ridurre l'acqua di impasto di almeno il 5% rispetto a quella richiesta per confezionare un conglomerato di pari consistenza, incrementando, inoltre, le resistenze a compressione a 7 e 28 giorni di almeno il 10% rispetto a quelle del calcestruzzo di riferimento non additivato (norma UNI-EN 934/2 – prospetto 2);

- **superfluidificanti/riduttori di acqua ad alta efficacia (SF)** quelli in grado di ridurre l'acqua di impasto a pari consistenza dell'impasto di riferimento di almeno il 12% assicurando, inoltre, che la resistenza a 1 e 28 giorni risulti maggiore di quella del calcestruzzo non additivato rispettivamente di almeno il 40 e il 15% (norma UNI-EN 934/2 – prospetto 3.1). Questi additivi debbono anche garantire un incremento della lavorabilità di almeno 120 mm in termini di slump rispetto all'impasto di pari rapporto a/c senza pregiudicare la resistenza meccanica a compressione a 28 giorni che deve risultare almeno pari al 90% di quella dell'impasto di riferimento.

Gli additivi superfluidificanti accanto all'azione principale disperdente, possono presentare degli effetti collaterali quali:

- ritardo della cinetica di idratazione; è il caso degli additivi utilizzati nel periodo caldo quando il trasporto del calcestruzzo richiede tempi lunghi che consentono, attraverso un allungamento della durata del periodo dormiente, di limitare la perdita di lavorabilità del conglomerato cementizio;

- accelerazione dei tempi di presa e di indurimento; sono i superfluidificanti utilizzati nel periodo invernale per bilanciare il ritardo della cinetica di idratazione del cemento determinato dalle basse temperature oppure i prodotti utilizzati negli stabilimenti di prefabbricazione dove esiste la necessità di conseguire elevate resistenze meccaniche il giorno successivo al getto per poter indurre la precompressione sulle strutture e dove la perdita di lavorabilità del calcestruzzo non costituisce un problema in quanto il tempo di trasporto è generalmente di pochi minuti<sup>27</sup>.

Proprio per tener conto non solo delle influenze esercitate dall'additivo sulla reologia dell'impasto, ma anche di quelle sui tempi di presa e di indurimento, la norma UNI-EN

934/2 accanto alle due categorie principali di fluidificanti/superfluidificanti prevede ulteriori tre categorie di prodotti distinti in base alle influenze esercitate sui tempi di presa e sullo sviluppo delle resistenze meccaniche:

- **fluidificanti ritardanti (FR)**, quelli che posseggono un potere di riduzione d'acqua di almeno il 5% e un tempo di inizio presa/fine presa rispettivamente maggiore di 90 min e non superiore di 360 min rispetto a quelli dell'impasto di riferimento. La resistenza a compressione a 28 giorni, inoltre, deve risultare almeno pari a quella dell'impasto non additivato di pari consistenza;
- **fluidificanti acceleranti (FA)**, che associano al potere di riduzione d'acqua (almeno 5%) un tempo di presa iniziale alla temperatura di 5°C minore del 60% di quello dell'impasto di riferimento e una resistenza a 28 giorni non inferiore di più del 10% dell'impasto non additivato di pari lavorabilità;
- **superfluidificanti ritardanti (SR)**, che al potere di riduzione d'acqua minimo (12%) associano gli stessi effetti sui tempi di presa degli additivi fluidificanti ritardanti. Inoltre, essi debbono garantire un incremento delle resistenze meccaniche a 28 giorni di almeno il 15% rispetto all'impasto di riferimento non additivato. Infine, impiegati a pari rapporto a/c debbono garantire dopo 60 min dal confezionamento dell'impasto una lavorabilità superiore a quella del calcestruzzo di riferimento.

#### **Potere di riduzione dell'acqua di impasto e della perdita di lavorabilità**

Come è stato già accennato, il principale impiego degli additivi fluidificanti e superfluidificanti riguarda la possibilità di confezionare impasti con un minor dosaggio di acqua di impasto rispetto ad un conglomerato di pari consistenza. La riduzione di acqua dipende sia dal tipo di additivo che dal dosaggio; sebbene sia praticamente impossibile definire l'esatta diminuzione per tutti i prodotti disponibili sul mercato (alla luce delle centinaia di formulazioni disponibili per quelli a base di ligninsolfonato e naftalensolfonato e delle decine di prodotti a base acrilica), tuttavia, si può dare un'indicazione di massima (vedi Tabella seguente) in base alla natura dei polimeri sui quali gli additivi sono basati, all'appartenenza degli stessi alle classi individuate dalla UNI-EN 934-2 e al dosaggio d'impiego. Come si può notare dalla Tabella gli additivi acrilici, a pari dosaggio, posseggono un potere disperdente maggiore rispetto ai prodotti a base di naftalensolfonato. All'incirca per ottenere una riduzione d'acqua del 20% occorre una percentuale di additivo acrilico pari allo 0.8%, mentre la stessa riduzione si ottiene impiegando l'1.2% di un superfluidificante a base di naftalensolfonato.

*Riduzione dell'acqua di impasto in funzione del tipo e del dosaggio di additivo (F: Fluidificante prospetto 2 UNI-EN 934-2); (FR: Fluidificante ritardante prospetto 10 UNI-EN 934-2); (FA: Fluidificante accelerante prospetto 12 UNI-EN 934-2); (SR: superfluidificante ritardante prospetto 11 UNI-EN 934-2 a base di naftalensolfonato); (SA: superfluidificante ritardante prospetto 11 UNI-EN 934-2 a base di copolimeri di esteri acrilici); (SN/SM: superfluidificante prospetto 3.1 e 3.2 UNI-EN 934-2 a base di naftalensolfonato o di melamminasolfonato); (SAC: superfluidificante accelerante prospetto 3.1 e 3.2 UNI-EN 934-2 a base acrilica).*

DOSAGGIO % IN MASSA SUL CEMENTO	RIDUZIONE DELL'ACQUA DI IMPASTO (%)				
	TIPO DI ADDITIVO				
	F	FR/FA	SR/SAC	SA	SN/SM
0.30-0.50	7 - 10	5 - 7	-	-	-
0.60	-	-	-	15	-
0.80	-	-	10	20	12
1.00	-	-	12	25	15
1.20	-	-	17	28	20
1.50	-	-	-	30	25
1.80	-	-	-	34	28



Un altro importante aspetto reologico del calcestruzzo riguarda la capacità dell'impasto di conservare la lavorabilità iniziale per un tempo sufficientemente lungo in modo da garantire che alla consegna del calcestruzzo in cantiere lo stesso possieda le caratteristiche prescritte dal progettista in relazione alle difficoltà di esecuzione del getto. Attesa la necessità di utilizzare conglomerati che al getto posseggano consistenze fluide (S4) o superfluide (S5), se la perdita di lavorabilità durante il trasporto - soprattutto per tempi lunghi e durante la stagione estiva - risultasse eccessiva è alto il rischio che in cantiere si provveda a aggiunte di acqua che pregiudicherebbero sia le prestazioni meccaniche che la durabilità del conglomerato in opera. Da un punto di vista pratico è necessario, pertanto, limitare la perdita di consistenza del conglomerato durante il trasporto. Gli additivi fluidificanti/superfluidificanti, soprattutto quelli a base di naftalensolfonato formulati con ritardanti di presa e i polimeri acrilici con ridotta lunghezza delle catene laterali e basso peso molecolare della catena principale possono offrire un notevole contributo riguardo a questa importante proprietà reologica del conglomerato cementizio. Sebbene, come già accennato per l'effetto disperdente, il mantenimento della lavorabilità nel tempo varia fortemente in relazione al tipo e al dosaggio di additivo, tuttavia, indicativamente la riduzione della perdita di consistenza ( $\Delta L$ ) può essere stabilita in base alla natura del polimero, alla classe di appartenenza in accordo alla UNI-EN 934/2 e al dosaggio (vedi Tabella che segue).

*Riduzione della perdita di lavorabilità in funzione del tipo e del dosaggio di additivo (R: Ritardante prospetto 8 UNI-EN 934-2); (FR: Fluidificante ritardante prospetto 10 UNI-EN 934-2); (SR: superfluidificante ritardante prospetto 11 UNI-EN 934-2 a base di naftalensolfonato); (SA: superfluidificante ritardante prospetto 11 UNI-EN 934-2 a base di copolimeri di esteri acrilici); (SN: superfluidificante prospetto 3.1 e 3.2 UNI-EN 934-2 a base di naftalensolfonato).*

DOSAGGIO % IN MASSA SUL CEMENTO	RIDUZIONE DELL'ACQUA DI $\Delta L$ (%)				
	TIPO DI ADDITIVO				
	R	FR	SR	SA	SN
0.30-0.50	50 - 60	30 - 50	-	-	-
0.60	-	-	-	40	-
0.80	-	-	35	50	10
1.00	-	-	40	65	15
1.20	-	-	45	80	20
1.50	-	-	-	85	-
1.80	-	-	-	90	-

Come si può notare, gli additivi acrilici garantiscono un miglior mantenimento della lavorabilità rispetto a quelli a base di ligninsolfonato e naftalensolfonato. In linea del tutto teorica la stessa perdita di lavorabilità si potrebbe ottenere anche ricorrendo ad un surdosaggio di efficaci ritardanti di presa o di superfluidificanti ritardanti formulati con naftalensolfonato. Questa possibilità, però, ha come controindicazione un eccessivo ritardo anche sui tempi di indurimento con il risultato che il calcestruzzo si potrebbe presentare il giorno seguente non sufficientemente indurito o addirittura ancora plastico con inevitabili ripercussioni sui tempi di scasso delle strutture. Gli additivi acrilici, invece, pur garantendo un eccellente mantenimento della lavorabilità per tempi lunghi non determinano ritardi sulla cinetica di idratazione del cemento. E' da sottolineare, tuttavia, che le prestazioni dei polimeri acrilici, in termini di conservazione della lavorabilità e di prestazioni meccaniche del calcestruzzo alle brevi stagionature dipende dal tipo di cemento. Pertanto, è opportuno che la compatibilità del tipo di additivo con un determinato cemento venga preliminarmente accertata prima di procedere ad un impiego di routine del prodotto per il confezionamento del calcestruzzo.

A conclusione di questa sezione relativa agli additivi per calcestruzzo si riassumono nella per ogni categoria di prodotto prevista dalla norma UNI-EN 934/2, i principali campi di applicazione.

Principali campi di impiego degli additivi per calcestruzzo.

ADDITIVO	UNI 934/2	APPLICAZIONI
Resistenti all'acqua	PR. 9	- calcestruzzi per muri interrati - calcestruzzi colorati - masselli autobloccanti
Ritentori di acqua	PR. 4	- calcestruzzi magri pompabili (in disuso)
Ritardanti di presa	PR. 8	- trasporto del calcestruzzo per lunghe distanze in clima caldo - strutture a grande sviluppo lineare ed orizzontale
Acceleranti di presa	PR.6	- pavimentazioni con strato di usura - calcestruzzo proiettato (requisiti non previsti da UNI-EN 934/2)
- Fluidificanti - Fluidificanti ritardanti - Fluidificanti acceleranti	- PR. 2 - PR. 10 - PR. 12	Calcestruzzi con resistenze inferiori o uguali a C 16/20: - clima caldo - clima freddo

Principali campi di impiego degli additivi superfluidificanti.

ADDITIVO	UNI 934/2	APPLICAZIONI
Superfluidificanti a base di naftalensolfonato	PR. 3.1-3.2	- calcestruzzi per il periodo invernale
Superfluidificanti ritardanti a base di naftalensolfonato	PR. 11.1 e 11.2	- calcestruzzi per il periodo estivo
Superfluidificanti acceleranti a base di naftalensolfonato	PR. 3.1-3.2	- calcestruzzi con resistenza $\geq$ C35/45 per il periodo invernale - calcestruzzi per prefabbricazione
Superfluidificanti a base di melammina solfonata	PR. 3.1-3.2	- calcestruzzi per prefabbricazione
Superfluidificanti di tipo acrilico	PR. 3.1-3.2	- calcestruzzi per il periodo invernale
Superfluidificanti ritardanti di tipo acrilico	PR. 11.1 e 11.2	- calcestruzzi con resistenza $>$ C32/40 per il periodo estivo con lunghi tempi di trasporto
Superfluidificanti acceleranti di tipo acrilico	PR. 3.1-3.2	- calcestruzzi ad alta ed altissima resistenza meccanica $>$ C50/60

<sup>21)</sup> L'assorbimento valutato su provini di malta maturati per 7 giorni e poi lasciati per altri 7 giorni in immersione deve risultare almeno del 50% più basso di quello della malta non additivata. Inoltre, l'assorbimento di provini maturati per 28 giorni e esposti all'acqua per 90 deve risultare almeno del 60% più basso di quello della malta di riferimento (prospetto 9 – norma UNI-EN 934-2).

<sup>22)</sup> La riduzione dell'acqua essudata a seguito dell'aggiunta dell'additivo ritentore d'acqua deve risultare del 50% almeno di quella dell'impasto di riferimento (norma UNI-EN 934/2 – prospetto 4).

<sup>23)</sup> Sul mercato sono disponibili alcuni additivi superfluidificanti nella cui formulazione è presente un additivo ritentore d'acqua. Questi prodotti, sebbene non molto diffusi, vengono utilizzati allorquando per una carenza di materiale fine nelle sabbie gli impasti, soprattutto quelli magri, evidenziano una elevata tendenza alla segregazione.

<sup>24)</sup> Alla temperatura di 5°C l'impasto prodotto con l'additivo accelerante deve presentare un tempo di inizio presa inferiore di almeno il 60% rispetto a quello della miscela di riferimento non additivata di pari consistenza (norma UNI-EN 934/2-prospetto 6).

<sup>25)</sup> La resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo con accelerante di indurimento dopo 1 giorno alla temperatura di 20°C e dopo 2 giorni alla temperatura di 5°C deve risultare rispettivamente almeno pari al 120 e 130% di quella del conglomerato non additivato (UNI-EN 934/2 – prospetto 7).

<sup>26)</sup> La resistenza a compressione dopo 28 giorni alla temperatura di 20°C del calcestruzzo con accelerante di indurimento deve risultare non inferiore di più del 10% rispetto a quella del conglomerato senza additivo (UNI-EN 934/2 – prospetto 7).

<sup>27)</sup> Negli stabilimenti di prefabbricazione l'impianto di produzione del calcestruzzo è adiacente alle "piste" ove occorre effettuare il getto del conglomerato. Pertanto, soprattutto negli impianti con trasporto automatizzato del calcestruzzo mediante carrelli su binario, il tempo che trascorre dalla miscelazione al getto, al massimo di qualche decina di minuti, non è sufficiente per produrre perdite di lavorabilità significative anche confezionando l'impasto con un additivo superfluidificante di caratteristiche acceleranti.

# 14

## LE AGGIUNTE POZZOLANICHE IN CENTRALE DI BETONAGGIO

**I** materiali pozzolanici oltre ad essere impiegati nella produzione dei cementi comuni vengono diffusamente impiegati anche direttamente in centrale di betonaggio per la produzione del calcestruzzo. Questa modalità di impiego offre il vantaggio, rispetto all'utilizzo dei cementi Portland di miscela o dei cementi tipo III, IV e V dove la percentuale di materiale pozzolanico viene fissata dal produttore, di poter modulare il dosaggio di queste aggiunte nell'impasto in relazione alle specifiche prestazioni che si vogliono conferire al calcestruzzo.

Le aggiunte più comunemente impiegate in centrale di betonaggio sono costituite dalla cenere volante e dal fumo di silice.

### La cenere volante

Almeno in Italia la cenere volante può ormai essere considerata un ingrediente di routine per la produzione del calcestruzzo essendo utilizzata in centrale di betonaggio estensivamente da circa un ventennio. La cenere volante e, in generale, tutte le aggiunte di tipo II in accordo alla EN 206, possono essere utilizzate:

- in sostituzione di parte del cemento lasciando invariato il rapporto acqua/cemento equivalente,  $(a/c)_{eq}$ , derivante dalle esigenze meccaniche e di durabilità dell'impasto;
- in aggiunta al cemento (sostituendo, quindi, parte della sabbia) con una conseguente diminuzione del rapporto acqua/cemento equivalente.

Il calcolo del rapporto  $(a/c)_{eq}$  si effettua in accordo a quanto stabilito dalla norma EN 206 tenendo conto che indipendentemente dalla quantità di cenere volante (CV) introdotta nel calcestruzzo:

- si può computare nel calcolo un quantitativo di cenere (cv) non superiore a 1/3 della massa del cemento;
- la somma della massa del cemento ( $c_{eff}$ ) e della cenere (cv) nell'impasto deve risultare maggiore della massa di cemento minimo ( $c_{min}$ ) derivante dalle esigenze di durabilità;
- la differenza tra la massa di cemento minima ( $c_{min}$ ) e quella effettivamente impiegata ( $c_{eff}$ ) a seguito della parziale sostituzione con cenere deve risultare minore di  $K_{cv} (c_{min} - 200 \text{ Kg/m}^3)$ , dove  $K_{cv}$  il fattore di equivalenza della cenere è fissato dalla norma UNI 11104 e può essere desunto dalla Tabella che segue.

Valori del coefficiente  $K_{cv}$  (Norma UNI 11104)

TIPO DI CEMENTO	CLASSE DEL CEMENTO	$K_{cv}$
CEM I	32.5 N,R	0.2
CEM I	42.5 N,R 52.5 N,R	0.4
CEM II/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2
CEM III/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2
CEM IV/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2
CEM V/A	32.5 N,R 42.5 N,R	0.2

Rispetto agli impasti di solo cemento quelli confezionati con cenere volante in aggiunta, alla luce del fatto che la cenere volante nei primi giorni di stagionatura si comporta come materiale sostanzialmente inerte per il ridotto contenuto di idrossido di calcio derivante dalla reazione pozzolanica, posseggono sia durante la fase plastica che nei primi 3 giorni, rapporti  $(a/c)_{eq}$  sostanzialmente identici a quello del calcestruzzo di solo cemento. Alle stagionature successive, quando inizia la reazione pozzolanica, il rapporto  $(a/c)_{eq}$  degli impasti con cenere in aggiunta diventa minore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Conseguentemente, si possono trarre le seguenti conclusioni circa **l'utilizzo della cenere volante in aggiunta al cemento:**

- non modifica i tempi di presa dell'impasto di solo cemento<sup>28</sup>;
- non modifica lo sviluppo di calore e conseguentemente i gradienti termici nei getti massivi;
- non modifica le prestazioni meccaniche a 1-3 giorni le quali, invece, risultano alle stagionature successive (7 e 28 giorni) maggiori di quelle dell'impasto di solo cemento;
- la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle sollecitazioni aggressive ambientali migliora sia per la maggiore impermeabilità derivante dal minor rapporto  $(a/c)_{eq}$  che per il minor contenuto di idrossido di calcio nella matrice cementizia impegnato nella reazione pozzolanica con la cenere volante.

Gli impasti confezionati con cenere in sostituzione parziale del cemento sia durante la fase plastica che alle brevi stagionature sono caratterizzati da un rapporto  $(a/c)_{eq}$  superiore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Solo alle lunghe stagionature (dopo i 28 giorni) grazie alla reazione pozzolanica, il rapporto  $(a/c)_{eq}$  eguaglierà quello del calcestruzzo di solo cemento. Pertanto, in seguito a questo assunto si intuisce che l'impiego della cenere volante in sostituzione parziale del cemento:

- determina un allungamento dei tempi di presa rispetto all'impasto di solo cemento. Questo giustifica, ad esempio, perché calcestruzzi con cenere in sostituzione vengono raramente impiegati nel settore delle pavimentazioni industriali in quanto l'allungamento dei tempi di presa costringerebbe ad una maggiore attesa per poter realizzare gli strati di usura a base di spolvero o pastina<sup>29</sup>;
- consente di ridurre lo sviluppo di calore e, conseguentemente, i gradienti termici nei getti massivi;
- produce una riduzione delle resistenze meccaniche a compressione alle brevi stagionature rispetto a quelle dell'impasto di solo cemento. Una diretta conseguenza di questo risiede nella necessità di operare una stagionatura umida più prolungata rispetto ad un calcestruzzo di solo cemento per compensare la maggiore porosità derivante da un maggior rapporto  $(a/c)_{eq}$ ;
- permette di conseguire alle lunghe stagionature (purché il conglomerato venga maturato a umido) resistenze a compressione sostanzialmente equivalenti a quelle dell'impasto di solo cemento;
- garantisce una maggiore durabilità nei confronti della reazione alcali-aggregato, della penetrazione del cloruro e dell'attacco solfatico. La resistenza alla penetrazione dell'anidride carbonica, invece, diminuisce per i calcestruzzi scadenti e non migliora per quelli con rapporti  $a/c$  inferiori a 0.50.

Relativamente alle influenze esercitate dall'impiego della cenere sulle proprietà reologiche del calcestruzzo è importante sottolineare come è convinzione abbastanza diffusa che l'introduzione di cenere volante nell'impasto produca un generalizzato miglioramento della lavorabilità del calcestruzzo a pari acqua di impasto rispetto a quello del conglomerato di solo cemento (o, il che è lo stesso, che l'impiego di cenere produca una riduzione dell'acqua di impasto a pari consistenza). In effetti, la lavorabilità del calcestruzzo potrà risultare maggiore o minore a seconda della qualità della cenere impiegata. Da questo punto di vista il parametro più significativo è rappresentato dalla percentuale di materiale di dimensioni superiori a 0.045 mm. Le particelle di dimensioni superiori a questo valore, infatti, sono costituite prevalentemente da materiale incombusto e presentano una struttura spugnosa caratterizzata da una elevata superficie specifica. Pertanto, l'impiego di ceneri con tenori rilevanti di particelle superiori a 45  $\mu$ m in sostituzione del cemento, può



Gruppo Cementirosi S.p.A.

determinare un incremento della richiesta d'acqua per conseguire la stessa lavorabilità di un impasto privo di cenere.

L'impiego di cenere in aggiunta o in sostituzione del cemento determina rispettivamente nessuna modifica o un leggero miglioramento in termini di mantenimento della lavorabilità del calcestruzzo durante il trasporto.

Relativamente alla riduzione dell'acqua di bleeding e al miglioramento della pompabilità degli impasti si possono ottenere dei vantaggi significativi solo se la cenere volante viene impiegata in aggiunta al cemento. In tal caso la riduzione dell'acqua di bleeding può risultare, per aggiunte di cenere comprese tra 40 e 60 Kg/m<sup>3</sup>, di circa il 100%.

### Il fumo di silice

Rispetto alla cenere volante il fumo di silice, per il maggior contenuto di SiO<sub>2</sub>, per la maggiore finezza e per la totale assenza di composti cristallini a bassa reattività possiede caratteristiche pozzolaniche migliori<sup>30</sup>. Tuttavia, per l'elevato costo esso viene utilizzato in centrale di betonaggio solo in casi eccezionali per la produzione di calcestruzzi speciali allorquando si richiede una elevata impermeabilità oppure si vogliono produrre impasti ad alta ed altissima resistenza meccanica a compressione.

A causa della finezza delle particelle, il fumo di silice determina sempre un incremento della richiesta d'acqua a pari consistenza di un impasto di solo cemento, stimabile in circa il 7-15% per quantitativi di microsilice variabili tra il 5 e il 10%. Ne consegue che l'aggiunta di questo materiale non può essere effettuato disgiuntamente dall'impiego di un additivo superfluidificante.

Relativamente al calcolo del rapporto  $(a/c)_{eq}$  esso si persegue dividendo l'acqua di impasto per il dosaggio di cemento ( $c_{eff}$ ) sommato a quello del fumo di silice ( $fs$ ) moltiplicato per il corrispondente fattore di equivalenza:

$$(a/c)_{eq} = \frac{a}{(c_{eff} + k_{fs} \cdot fs)}$$

dove  $K_{fs}$  è il fattore di equivalenza del fumo di silice pari a 2 per i calcestruzzi con rapporto a/c inferiore a 0.45 e per tutti quelli che indipendentemente dal rapporto a/c sono destinati a strutture in classe di esposizione diverse dalla XC e XF. Per i conglomerati destinati a queste strutture aventi rapporti a/c maggiori di 0.45 il fattore di equivalenza viene posto pari a 1. In sostanza, questo significa che per la stragrande maggioranza delle strutture impiegare 1 Kg di fumo di silice equivale ad impiegare 1 kg di cemento.

La norma EN 206, inoltre, impone:

- di computare al massimo un quantitativo di fumo di silice non superiore all'11% della massa del cemento;
- il dosaggio di cemento effettivamente impiegato e di fumo di silice non deve risultare inferiore a quello minimo desunto da considerazioni legate alla durabilità;
- se il dosaggio di cemento minimo per la durabilità è inferiore a 300 kg/m<sup>3</sup> deve verificarsi anche che la differenza tra dosaggio di cemento minimo e dosaggio effettivo deve risultare inferiore a 30 kg/m<sup>3</sup>.

Rispetto agli impasti di solo cemento quelli confezionati con fumo di silice in aggiunta, alla luce del fatto che solo per le prime 12 ore di stagionatura si comporta come materiale sostanzialmente inerte, possiede durante la fase plastica rapporto  $(a/c)_{eq}$  sostanzialmente identico a quello del calcestruzzo di solo cemento. Già alla stagionatura di 1 giorno, ed



Gruppo Cementirosi S.p.A.

ancor più a quelle successive, il rapporto  $(a/c)_{eq}$  degli impasti con fumo di silice in aggiunta diventa minore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Conseguentemente, si possono trarre le seguenti conclusioni circa l'utilizzo del **fumo di silice in aggiunta al cemento**:

- non modifica i tempi di presa dell'impasto di solo cemento;
- incrementa lo sviluppo di calore e conseguentemente i gradienti termici nei getti massivi;
- migliora, sia pur lievemente, le prestazioni meccaniche già dopo 1 giorno rispetto a quelle dell'impasto di solo cemento;
- incrementa in maniera significativa le resistenze meccaniche alle stagionature successive (3 e 28 giorni) rispetto all'impasto di solo cemento;
- la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle sollecitazioni aggressive ambientali migliora sia per la maggiore impermeabilità derivante dal minor rapporto  $(a/c)_{eq}$  che per il minor contenuto di idrossido di calcio impegnato nella reazione pozzolanica.

L'impasto confezionato con fumo di silice **in sostituzione parziale del cemento** durante la fase plastica e dopo circa 24 ore è caratterizzato da un rapporto  $(a/c)_{eq}$  inferiore rispetto a quello dell'impasto di solo cemento. Già alla stagionatura di 3 giorni, però, grazie alla elevata reattività pozzolanica del fumo di silice, il rapporto  $(a/c)_{eq}$  dapprima eguaglierà quello della malta di solo cemento e, successivamente, risulterà inferiore. Pertanto, in seguito a questo assunto si intuisce che l'impiego del **fumo di silice in sostituzione parziale del cemento**:

- determina un allungamento dei tempi di presa rispetto all'impasto di solo cemento;
- consente di ridurre lo sviluppo di calore e, conseguentemente, i gradienti termici nei getti massivi, anche se per questo scopo è più conveniente dal punto di vista economico ricorrere all'impiego della cenere volante;
- produce una riduzione modesta delle resistenze meccaniche a compressione a 1 giorno rispetto a quella dell'impasto di solo cemento;
- permette di eguagliare già dopo 3 giorni la resistenza a compressione del calcestruzzo di solo cemento e alle stagionature successive di superarla;
- garantisce una maggiore durabilità nei confronti della reazione alcali-aggregato, della penetrazione del cloruro e dell'attacco solfatico.

Tra le maggiori potenzialità del fumo di silice, infine, si deve menzionare quella di confezionare calcestruzzi di alta ed altissima resistenza meccanica a compressione grazie alla possibilità di ricorrere a surdosaggi di additivo superfluidificante (4-6%) rispetto a quelli tradizionalmente impiegati per i conglomerati convenzionali (1-2%) senza generare apprezzabili ritardi nei tempi di presa e di indurimento del conglomerato cementizio.

<sup>28)</sup> Questo assunto è valido per le ceneri siliciche. Le ceneri calciche, invece, per la presenza dell'ossido di calcio e di composti di natura cristallina con caratteristiche idrauliche determinano un accorciamento dei tempi di presa qualora impiegate in aggiunta al cemento. E' da evidenziare che queste ceneri, molto diffuse negli Stati Uniti, non sono disponibili in Italia. Inoltre, la norma EN 450 di fatto le esclude dall'impiego nel calcestruzzo fissando per le ceneri da utilizzare direttamente nelle centrali di betonaggio un limite al contenuto di CaO del 10% inferiore a quello normalmente presente nelle ceneri calciche. L'esclusione di queste ceneri, inoltre, discende dal mancato rispetto di un ulteriore requisito imposto dalla norma relativo alla somma della silice, dell'allumina e del sesquiossido di ferro che deve risultare maggiore del 70%. Nelle ceneri calciche, infatti, la somma di questi costituenti varia generalmente tra il 50 e il 60%.

<sup>29)</sup> Al fine di evitare eccessivi ritardi sui tempi di presa con conseguenti ripercussioni sui tempi di scasso la norma EN 450 impone che il tempo di inizio presa di una malta confezionata con il 25% di cenere in sostituzione del cemento non deve risultare maggiore di più di 120 minuti rispetto a quello della malta di solo cemento.

<sup>30)</sup> Il contenuto di silice in accordo alla norma EN 13263 deve essere superiore all'85%. L'area superficiale specifica deve risultare compresa tra 15 e 35 m<sup>2</sup>/Kg, questa, quindi, risulta di gran lunga maggiore di quella della cenere (0.3-0.6 m<sup>2</sup>/Kg).



Gruppo Cementirosi S.p.A.

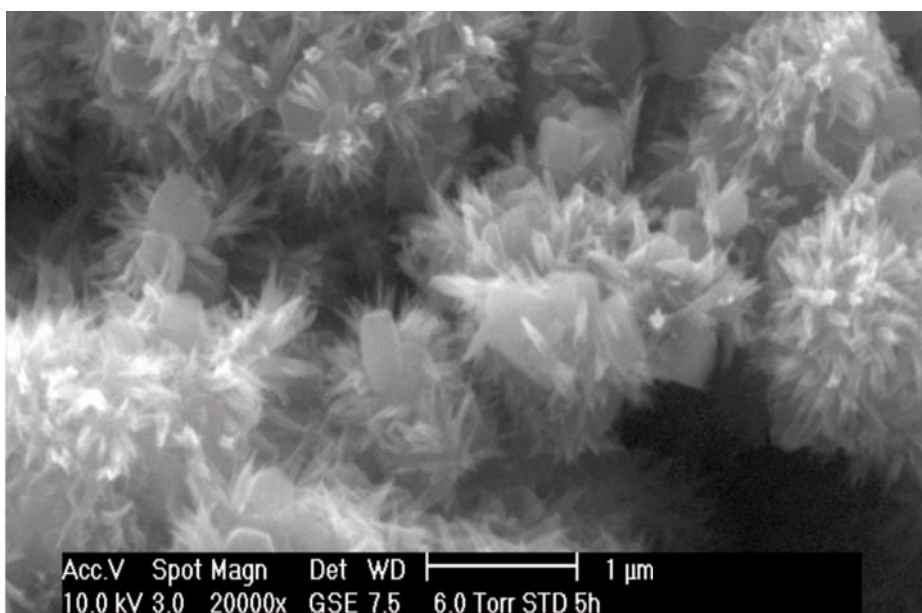
15

## LA PRESA E L'INDURIMENTO DEL CALCESTRUZZO

Un calcestruzzo subito dopo il mescolamento si presenta, a seconda del quantitativo di acqua e di additivo impiegato, come una massa di consistenza plastico-fluida dotata di scorrevolezza ed eccellente deformabilità.

In questo stato, il calcestruzzo permane per qualche ora (questo tempo dipende generalmente dal quantitativo di acqua impiegato, dal tipo e dalla classe del cemento utilizzato, dalla temperatura, da eventuali additivi aggiunti all'impasto) e può, quindi, essere rimescolato, trasportato, introdotto all'interno di una cassero assumendone la forma e, infine, essere compattato. Successivamente, il calcestruzzo "inizia la presa" perdendo le iniziali caratteristiche di scorrevolezza e diviene sempre meno deformabile a tal punto che un suo eventuale rimescolamento, non solo risulterebbe di difficile attuazione, ma disturberebbe il processo di idratazione determinando una irrimediabile drastica penalizzazione delle prestazioni meccaniche dell'impasto.

Questo processo termina, "fine presa", dopo 6-24 ore (ancora una volta questo tempo è influenzato dai parametri sopramenzionati) ed è seguito dalla fase dell'indurimento vero e proprio che coincide con la trasformazione dell'impasto in una massa, dell'aspetto tipico dei materiali lapidei, dotata di apprezzabile resistenza meccanica a compressione.



Si ringraziano i Laboratori Mapei per la pubblicazione di questa immagine

Le trasformazioni macroscopiche della reologia del calcestruzzo sono associate ad una serie di trasformazioni chimiche che si manifestano in diversi stadi con sviluppo di calore. Il primo stadio, chiamato periodo di *preinduzione*, è caratterizzato da un forte sviluppo di calore determinato dalla idratazione del  $C_3A$ , con la produzione degli alluminati idrati esagonali, cui segue, quando la soluzione si satura di solfato di calcio, la formazione dell'ettringite.

Quest'ultima si deposita sul  $C_3A$  ancora anidro impedendo che il processo continui. Il periodo di *preinduzione* è seguito da una fase "dormiente" in cui la reazione di idratazione risulta sostanzialmente bloccata, come testimoniato dalla pratica assenza di calore sviluppato.

Al periodo *dormiente* segue una terza fase caratterizzata da una elevata velocità di sviluppo del calore conseguente, da una parte, alla rottura della pellicola di ettringite e, quindi, alla ripresa dell'idratazione. Questa fase coincide con "l'inizio presa" dell'impasto e con la conseguente perdita di plasticità. Il processo prosegue per qualche ora e prima che esso raggiunga il massimo valore della velocità di sviluppo del calore l'impasto termina la presa ("fine presa") e inizia l'indurimento vero e proprio del calcestruzzo.

Da un punto di vista pratico il periodo di *preinduzione* e quello *dormiente* coincidono con le fasi di mescolamento degli ingredienti del calcestruzzo in betoniera, di trasporto dalla centrale di betonaggio al cantiere, di posa in opera e compattazione del conglomerato all'interno della cassaforma. La durata di questi periodi, pertanto, deve essere tale da non ostacolare queste operazioni che sono legate evidentemente alla logistica del cantiere e al tipo di opera che si deve realizzare.

L'inizio della presa rappresenta il momento in cui l'impasto non è più manipolabile; non sarà, quindi, possibile né gettarlo all'interno del cassero né consigliabile effettuare, ad esempio, alcuna compattazione anche se la posa è stata ultimata.

Il tempo di inizio presa coincide, inoltre, con il momento in cui è possibile iniziare la stagionatura umida dell'impasto mediante la bagnatura con acqua delle superfici del getto non casserate, operazione necessaria ad evitare la precoce evaporazione dell'acqua che determinerebbe negli strati più corticali del getto una maggiore porosità oltre alla comparsa delle fessurazioni da ritiro plastico. È sconsigliabile, invece, irrorare le superfici del getto prima che l'impasto faccia presa in quanto il calcestruzzo ancora plastico finirebbe per assorbirla con un aumento del rapporto acqua-cemento e, conseguentemente, con uno scaldamento delle prestazioni meccaniche e di durabilità del manufatto realizzato.

Altrettanto importante è il tempo di fine presa, soprattutto in relazione ai tempi di scasso di un determinato elemento strutturale. Ad esempio, è sconsigliabile procedere alla rimozione dello sponde di un cassero di un muro di sostegno prima che il calcestruzzo termini la presa in quanto il solo peso proprio del conglomerato potrebbe determinare uno spanciamento della struttura al piede del muro. Allo stesso modo, la conoscenza dei tempi di fine presa può rivelarsi fondamentale per una struttura gettata nel periodo invernale se si prevede che la temperatura durante la notte possa scendere al di sotto di 0°C. Infatti, un impasto con un tempo di presa troppo lungo potrebbe non avere una resistenza a compressione/trazione sufficiente per poter resistere senza fessurarsi alle tensioni indotte dalla formazione del ghiaccio.

In cantiere la determinazione dei tempi di presa può essere effettuata sulla malta ottenuta per vagliatura del calcestruzzo con un crivello 5 UNI 2334. Il tempo di presa, determinato mediante il penetrometro Proctor, viene messo in relazione con la resistenza offerta dalla malta alla penetrazione di una sonda. L'inizio e la fine presa vengono individuati dal tempo trascorso dal confezionamento dell'impasto fino a quando lo stesso offre una resistenza alla penetrazione della sonda, rispettivamente di 3.5 e 28 N/mm<sup>2</sup>.

Al termine della presa, inizia il processo di indurimento cui è associato lo sviluppo delle resistenze meccaniche dell'impasto che dipendono dal rapporto *a/c*, dal tipo e dalla classe di cemento utilizzato, dalla temperatura, dalla natura e dal dosaggio degli additivi utilizzati, dalle modalità con cui il calcestruzzo viene maturato. Sebbene siano stati proposti diversi metodi per valutare il grado di indurimento dell'impasto, dal punto di vista pratico il metodo più affidabile, di facile applicazione anche nel cantiere, è ancora oggi rappresentato dalla determinazione della resistenza meccanica a compressione mediante prove di schiacciamento su provini confezionati al momento del getto.



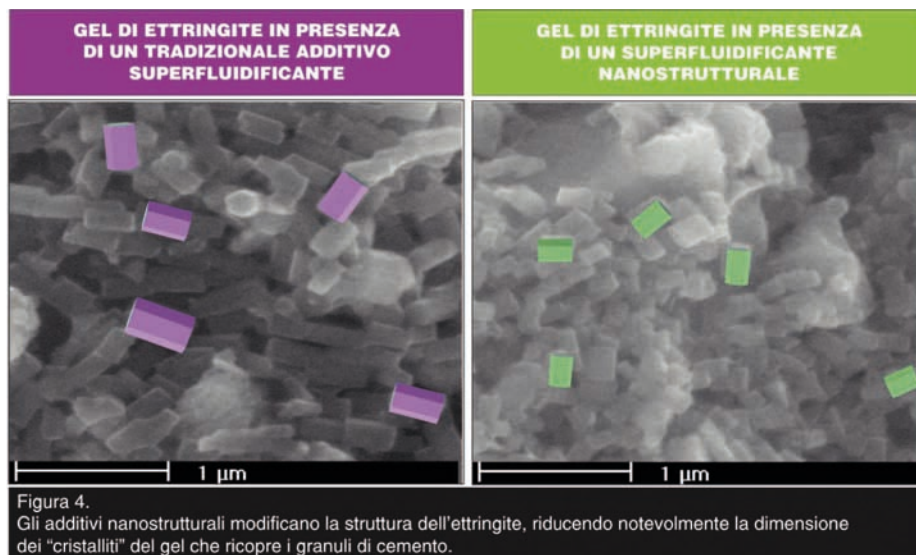
Gruppo Cementirosi S.p.A.

16

## LA MICROSTRUTTURA DELLA MATRICE CEMENTIZIA

I prodotti di idratazione di un cemento Portland nei primissimi minuti che seguono il mescolamento del legante con acqua, sono costituiti da uno strato all'apparenza gelatinoso delle fasi ettringitiche (Aft) che ricopre i granuli di cemento anidro. Dopo una decina di minuti circa queste fasi si presentano in forma di cristalliti di dimensioni dell'ordine delle centinaia di nanometri. Dopo qualche ora, i prodotti di idratazione, e in particolare il C-S-H derivante dalla reazione dei silicati con l'acqua, si presentano in forma di fibre che inglobano al loro interno i cristalli del CH. Alle stagionature più lunghe quando il processo di indurimento è in una fase più avanzata i prodotti di idratazione si presentano in forma di particelle o granuli massivi a morfologia prevalentemente piatta.

Allo stato indurito la microstruttura della matrice cementizia può essere schematicamente ricondotta ad una serie di particelle di cemento anidro ricoperte dai prodotti di idratazione. Lo spazio non occupato dai composti idratati è costituito da una serie di vuoti che prendono il nome di *pori capillari*. Le prestazioni elasto-meccaniche (resistenza meccanica a compressione e trazione e il modulo elastico), le variazioni dimensionali determinate sia dai carichi agenti che dalle variazioni igrometriche ambientali (deformazione viscosa e ritiro) e la durabilità (la capacità del materiale di resistere alle aggressioni chimico-fisiche prodotte dall'ambiente) dipendono sia dalla natura e dalla morfologia dei prodotti di idratazione, ma sono altresì strettamente influenzate anche dalla natura e dalla distribuzione dimensionale delle porosità presenti nella matrice cementizia.



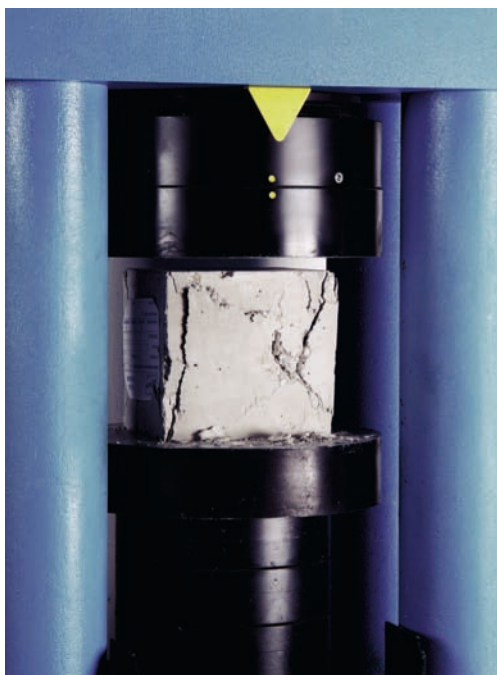
Si ringraziano i Laboratori Mapei per la pubblicazione di questa immagine

17

## RESISTENZA MECCANICA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO

La resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo rappresenta una delle proprietà più importanti dal punto di vista ingegneristico. E' ben noto, infatti, che nell'ambito di un determinato elemento strutturale in conglomerato cementizio armato al calcestruzzo viene affidato prevalentemente il compito di resistere agli sforzi di compressione, prescindendo, invece, dalla resistenza a trazione, essendo questo tipo di sforzi generalmente appannaggio delle barre di armatura. Tuttavia, occorre sottolineare come in particolari condizioni anche la resistenza a trazione può assumere un'importanza rilevante. E' il caso, ad esempio, delle pavimentazioni in calcestruzzo.

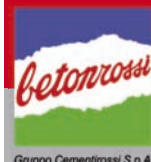
Nel progetto del calcestruzzo destinato alla realizzazione di una determinata struttura, inoltre, il requisito di durabilità può risultare più cogente rispetto alla prestazione meccanica richiesta per il conglomerato. E' il caso, ad esempio, di strutture orizzontali in calcestruzzo (impalcati di ponti e viadotti, pavimentazioni aeroportuali, strade in calcestruzzo, piazzali esterni per la movimentazione e lo stoccaggio delle merci) esposte all'azione dei cicli di gelo-disgelo e dei sali disgelanti utilizzati per la rimozione del ghiaccio.



Provino di calcestruzzo dopo la rottura a compressione

In altre situazioni, infine, la prestazione più importante può essere rappresentata dalla minimizzazione dei gradienti termici conseguenti allo sviluppo di calore legato all'idratazione del cemento (strutture massive quali dighe, muri e fondazioni di grande spessore).

Tuttavia, anche quando la resistenza a compressione non rappresenta la prestazione più importante del conglomerato, ai fini della prescrizione di capitolato, si preferisce tramutare la caratteristica più rilevante in una resistenza a compressione equivalente. Questo accade, ad esempio, quando il parametro progettuale più cogente è rappresentato dalla resistenza a trazione oppure dalla durabilità. Questa esigenza nasce dal fatto che la resistenza meccanica a compressione è di facile determinazione su provini di materiale prelevati direttamente in cantiere; le altre caratteristiche, invece, presuppongono sia il confezionamento di provini di geometria più complessa, non sempre reperibili in cantiere, sia l'impiego di strumentazioni di prova che non tutti i laboratori di controllo qualità dei materiali dispongono.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

18

## RESISTENZA A COMPRESSIONE E PARAMETRI COMPOSIZIONALI

**A**l fine di comprendere l'influenza dei fattori composizionali, quali il rapporto acqua/cemento, il tipo e la classe di cemento, e quelli legati alla maturazione, sulla porosità della matrice cementizia e conseguentemente sulle prestazioni meccaniche degli impasti è opportuno procedere ad una analisi quantitativa del volume dei prodotti di idratazione, del cemento anidro residuo e dei pori capillari attraverso il modello di Powers.

Le ipotesi alla base del modello sono le seguenti:

- l'idratazione del cemento avviene senza apprezzabile riduzione del volume originariamente occupato dall'acqua e dal cemento;
- la massa volumica del cemento è assunta pari a 3.15 Kg/l e quella dell'acqua pari ad 1 Kg/L;
- l'acqua chimicamente legata necessaria per la completa idratazione del cemento è pari al 23% della massa del cemento;
- l'acqua interstratica costituisce il 28% del volume totale dei prodotti di idratazione;
- per ogni parte in volume di cemento anidro si formano 2.14 parti di prodotti idratati.

In queste ipotesi la porosità capillare ( $p_c$ ) intesa come volume totale dei pori capillari ( $V_{tpc}$ ) rispetto al volume totale della matrice (coincidente con il volume occupato inizialmente dal cemento anidro,  $V_c$ , e dall'acqua,  $V_a$ ) vale:

$$p_c = (a/c - 0.3615g)/ (V_a + V_c) = (a/c - 0.3615g)/(0.317 + a/c) \quad [2]$$

L'equazione indica che la porosità capillare dipende dal rapporto  $a/c$  e dalla frazione di cemento idratato ( $g$ ). Di fatto, però, **il parametro che influenza in maniera più significativa la porosità è rappresentato dal rapporto  $a/c$** . Al diminuire del rapporto  $a/c$  diminuisce drasticamente la porosità capillare; infatti, passando da un rapporto  $a/c$  di 0.8 a 0.5 si ha una diminuzione della porosità di circa tre volte<sup>31</sup>. Per i rapporti  $a/c$  usualmente impiegati nel confezionamento dei calcestruzzi (0.50-0.65), la porosità capillare, a seconda del grado di idratazione, varia dal 15 al 45% circa del volume della matrice.

La resistenza meccanica a compressione ( $R_c$ ) può essere correlata alla porosità capillare, secondo Powers, attraverso il rapporto tra il volume occupato dai prodotti dell'idratazione e il volume totale della matrice individuato da Powers come rapporto gel/spazio ( $x$ ), mediante la seguente espressione:

$$R_c = 234 \cdot x^3$$

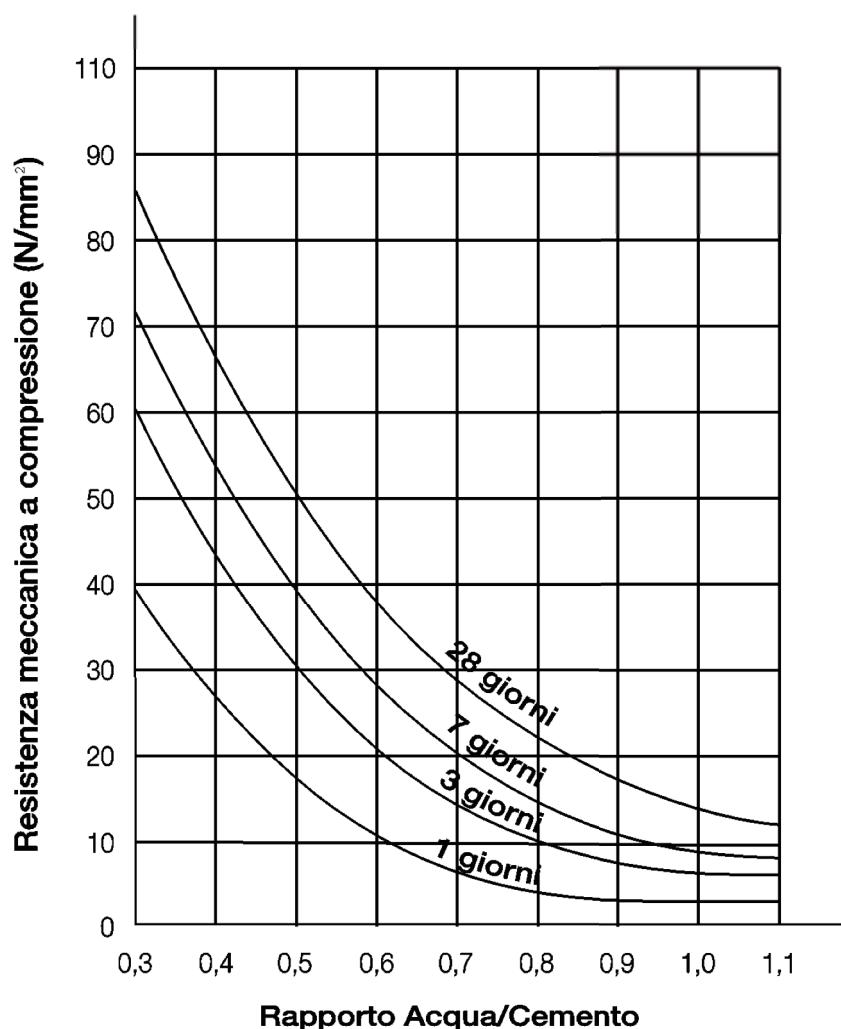
L'equazione porge che la resistenza a compressione è proporzionale al cubo del rapporto gel/spazio e il valore della costante  $K$  (234 N/mm<sup>2</sup>) rappresenta la resistenza intrinseca dei prodotti di idratazione (quando il rapporto gel/spazio tende ad 1).

Esplicitando i termini nell'equazione di Powers l'espressione si ha:

$$R_c = K [0.679g / (0.318g + a/c)]^3$$

la quale porge che **la resistenza meccanica a compressione aumenta al diminuire del rapporto  $a/c$  e all'aumentare del grado di idratazione  $g$**  come risultato della diminuzione del volume dei pori capillari e, quindi, della porosità della matrice.

La funzione è del tipo  $R_c = Q/(a/c)$ , o con la simbologia usuale in matematica  $y = Q/x$ , e presenta un andamento di tipo iperboloidico del tipo di quello riportato nella Figura che segue che è relativo alla resistenza a compressione di calcestruzzi confezionati con un cemento CE II/A-LL 42.5 R al variare del rapporto  $a/c$ . Il grafico, inoltre, fornisce il valore della resistenza meccanica a compressione al variare del tempo trascorso dal confezionamento dell'impasto (1, 3, 7 oppure 28 giorni). Esso, quindi, rappresenta un valido strumento pratico per stabilire nota la resistenza meccanica che si vuole conseguire dopo un certo tempo di maturazione, quale deve essere il rapporto  $a/c$  da adottare nel confezionamento dell'impasto. Ovviamente, il grafico consente anche di prevedere, noto il tipo/classe di cemento e il rapporto  $a/c$ , la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo ad un certo tempo  $t$ .



<sup>31)</sup> Oltre ad una diminuzione della porosità, abbassando il rapporto  $a/c$  si ottiene una struttura porosa caratterizzata da pori di più piccole dimensioni. Ad esempio, ad una riduzione di  $a/c$  da 0,8 a 0,5 consegue una diminuzione del diametro medio dei pori di circa 10 volte. A questo "refinement" della struttura porosa corrisponde una matrice meno penetrabile dagli agenti aggressivi e conseguentemente più durevole.

19

## LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO: PROVINI CUBICI E CILINDRICI

La determinazione della resistenza a compressione consiste nell'effettuare prove di schiacciamento su provini di calcestruzzo cubici o cilindrici. Il confezionamento dei provini ("cubetti" o "cilindri") viene effettuato impiegando casseri di acciaio, di plastica rigida o di polistirolo (questa tipologia di cassero è quella più impiegata in cantiere per ovvi motivi legati alla leggerezza del materiale). La prova di schiacciamento consiste nel posizionare il provino tra i piatti di acciaio di una pressa aumentando il carico applicato (Norma UNI-EN 12390-3) in modo che l'incremento della tensione di compressione risulti di 0.2 e 1.0 N/(mm<sup>2</sup> · s)<sup>32</sup>.



Provini in cls

In Italia le Norme Tecniche impongono di effettuare la determinazione della resistenza a compressione su provini cubici. A rigore, per la differenza esistente tra i moduli elastici e di Poisson dell'acciaio (di cui sono costituiti i piatti della pressa) e il calcestruzzo, i valori della resistenza a compressione desunti su provini cubici beneficiano di un effetto di confinamento che aumenta la tensione di rottura del conglomerato rispetto a quella che il materiale evidenzerebbe in una prova di schiacciamento in regime uniassiale. Al fine di ridurre l'influenza del confinamento sui valori di  $R_c$ , in molti Paesi, ad esempio negli Stati Uniti, ma anche in alcune Nazioni europee, vengono utilizzati provini cilindrici con rapporto altezza/diametro ( $h/d$ ) pari a 2. Per questi provini, infatti, la maggiore snellezza determina un minor grado di confinamento rispetto ai provini cubici, pertanto, quelli cilindrici forniscono per un dato calcestruzzo valori della resistenza meccanica a compressione più bassi. In linea di massima, si ammette che la resistenza a compressione su cilindri ( $f_c$ ) risulta all'incirca l'80% (l'83% in accordo alle Norme Tecniche sulle Costruzioni) di quella determinata impiegando provini cubici ( $R_c$ ):

$$f_c = 0.80 R_c$$



Laboratorio analisi e prove - Betonrossi sede di Piacenza

<sup>32)</sup> La velocità di incremento della tensione di compressione ( $\Delta\sigma_c$ ) influenza il valore della resistenza meccanica a compressione: maggiore è  $\Delta\sigma_c$  più elevata risulterà  $R_c$ .



## LA RESISTENZA CARATTERISTICA A COMPRESIONE

**A**i fini del calcolo strutturale delle opere in conglomerato cementizio non armato, a bassa percentuale di armatura<sup>33</sup>, armato e precompresso (D.M. 14/01/2008) il calcestruzzo, in accordo anche alla EN 206-1, viene identificato mediante la **resistenza convenzionale caratteristica a compressione** misurata su provini cubici (lato 150 mm),  $R_{ck}$  o cilindrici ( $d = 150$  mm;  $h = 300$ ),  $f_{ck}$ , confezionati e maturati in accordo alla norma UNI-EN 12390-2. Il controllo della resistenza a compressione viene effettuato prelevando in cantiere al momento del getto un volume di calcestruzzo sufficiente a confezionare due provini utilizzando stampi di dimensioni e tolleranze specificate dalla UNI-EN 12390-1. L'impasto introdotto nella cassaforma verrà compattato "a rifiuto", per l'eliminazione dell'aria nell'impasto, e i provini successivamente mantenuti in ambiente a temperatura e umidità controllata ( $T = 20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ ; U.R.  $\geq 95\%$  oppure in acqua) per 28 giorni (in accordo alla UNI-EN 12390-2), alla scadenza dei quali verranno sottoposti ad una prova di schiacciamento in accordo alla UNI-EN 12390-3 e 4. Il valore medio della resistenza a compressione ottenuto su due provini derivanti da un dato prelievo viene indicato come "resistenza di prelievo,  $R_{cp}$ ".

Classi di resistenza caratteristica previste dalla EN 206, UNI 11104 e dalla Norme Tecniche.

CLASSE DI RESISTENZA	$f_{ck}$ (MPa)	$R_{ck}$ (MPa)	TIPO DI STRUTTURA / (CLASSE DEL CALCESTRUZZO)
C 8/10	8	10	Non armate o a bassa percentuale di armatura / (molto bassa)
C 12/15 <sup>34</sup>	12	15	Semplicemente armate / (bassa)
C 16/20	16	20	
C 20/25	20	25	
C 25/30	25	30	Semplicemente armate o precomprese / (media)
C 28/35 <sup>35</sup>	28	35	
C 30/37 <sup>36</sup>	30	37	
C 32/40	32	40	
C 35/45	35	45	
C 40/50	40	50	
C 45/55	45	55	Semplicemente armate o precomprese / (alta)
C 50/60	50	60	
C 55/67	55	67	
C 60/75	60	75	
C 70/85	70	85	Alta resistenza
C 80/95 <sup>37</sup>	80	95	
C 90/105	90	105	
C 100/115 <sup>38</sup>	100	115	



La **resistenza caratteristica ( $R_{ck}$  o  $f_{ck}$ )** è definita come *quel particolare valore della resistenza a compressione al di sotto del quale ci si può attendere di trovare al massimo il 5% della popolazione di tutti i valori delle resistenze di prelievo*. La simbologia utilizzata per esprimere la classe di resistenza caratteristica del calcestruzzo in accordo alla EN 206 ed UNI 11104 è  $C x/y$  dove  $x$  ed  $y$  rappresentano rispettivamente il valore di  $f_{ck}$  e  $R_{ck}$  in  $N/mm^2$ . La Tabella riportata nella pagina precedente indica che segue riporta le classi di resistenza previste per il calcestruzzo dalle due normative sopramenzionate unitamente al tipo di struttura cui sono destinate e alla classificazione del conglomerato in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni.



<sup>33)</sup> Le strutture in conglomerato cementizio a bassa percentuale di armatura sono quelle in cui le sezioni rette resistenti hanno una percentuale di armatura inferiore allo 0.1% dell'area della sezione stessa ed una quantità di acciaio inferiore a  $0.3KN/m^2$ .

<sup>34)</sup> Per le opere in calcestruzzo semplicemente armato non è ammesso l'impiego di calcestruzzi con classe di resistenza inferiore a C16/20. Per le opere in c.a. in zona sismica non è possibile impiegare classi di resistenza inferiori a C20/25.

<sup>35)</sup> Per le opere in calcestruzzo armato precompresso non è previsto l'impiego di calcestruzzo con classe di resistenza inferiore a C28/35.

<sup>36-38)</sup> Tali classi di resistenza non sono previste nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008).

<sup>37)</sup> Ai fini del calcolo statico non potrà essere presa in conto una classe di resistenza superiore a C70/85. Pertanto, l'impiego di calcestruzzi con classi di resistenza superiori è ammesso previo esame e valutazione delle documentazioni di progetto da presentare caso per caso al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

21

## IL CONTROLLO DI ACCETTAZIONE E LA SCELTA DEL PRODUTTORE DEL CALCESTRUZZO

La dispersione dei risultati di resistenza meccanica a compressione dipende sostanzialmente dal controllo effettuato durante la produzione del calcestruzzo: dall'accuratezza nel dosaggio degli ingredienti, nel controllo esercitato sull'umidità dell'aggregato, dalle correzioni alla ricetta al variare delle proprietà degli ingredienti, etc. ed è caratteristico, quindi, di ogni centrale di betonaggio. Ne consegue che il controllo della qualità del calcestruzzo da utilizzare nella realizzazione di una struttura non può esaurirsi ad un mero prelievo del solo conglomerato fornito in cantiere al momento del getto, ma correttamente dovrebbe includere anche la verifica del controllo che il produttore esercita nell'arco di 12 mesi sui diversi lotti di conglomerato che appartengono alla famiglia del calcestruzzo da utilizzare. D'altra parte sono le stesse Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) a stabilire che la verifica che le resistenze a compressione di prelievo siano conformi al valore caratteristico indicato dal progettista delle opere venga effettuata mediante un **Controllo di Qualità** che consiste non solo nel controllo di accettazione da effettuarsi durante l'esecuzione dei getti in accordo con una delle due procedure (controllo di tipo A o B) previste dalle stesse Norme Tecniche, ma anche attraverso uno studio preliminare (o prequalifica).



Prova di slump in cantiere a Revere

Lo **studio preliminare**, da condursi prima dell'inizio delle operazioni di getto, ha come obiettivo quello di verificare che "la ricetta" utilizzata abbia i requisiti meccanici richiesti dal progetto. Generalmente, questa verifica viene condotta dal produttore di calcestruzzo e costituisce uno dei processi che lo stesso deve attuare per la valutazione di **conformità** delle tipologie di calcestruzzo commercializzate.

La **valutazione della conformità della resistenza a compressione è basata (in accordo alle EN 206-1) sui risultati dei prelievi su un periodo di 12 mesi al massimo**. Il numero di prelievi effettuati è pari a 3 per i primi 50 m<sup>3</sup> prodotti. Quindi, viene effettuato un prelievo ogni 200 m<sup>3</sup> (oppure 2 ogni settimana) fino al raggiungimento di almeno 35 risultati ottenuti i quali termina il periodo cosiddetto "iniziale" di produzione per una determinata tipologia di conglomerato. Al termine del periodo iniziale il processo di produzione entra nella fase "continua" e i prelievi potranno essere effettuati ogni 400 m<sup>3</sup> (oppure 1 a settimana). Queste indicazioni sulla frequenza dei controlli da esercitare in produzione valgono per il calcestruzzo confezionato con "certificazione del processo di produzione". Per i conglomerati sprovvisti di certificazione del processo di produzione, dopo i 3 campioni prelevati per i primi 50 m<sup>3</sup> di calcestruzzo il controllo consiste in un prelievo ogni 150 m<sup>3</sup> (e ogni giorno di produzione) indipendentemente che ci si trovi nella fase "iniziale" di produzione o in quella "continua".



Gruppo Cementirosi S.p.A.

La valutazione della conformità è basata sulla verifica della resistenza media di  $n$  prelievi (*criterio 1*) oppure di ogni singolo valore della stessa (*criterio 2*) in relazione alla resistenza caratteristica nominale di una determinata famiglia di impasti in accordo alla Tabella che segue.

*Controllo di conformità della resistenza a compressione in produzione: requisiti.*

PRODUZIONE	NUMERO, $n$ , DI PRELIEVI	CRITERIO 1	CRITERIO 2
Iniziale	3	$R_{cmp} > R_{ck} + 4$	$R_{cpi} > R_{ck} - 4$
Continua	15	$R_{cmp} > R_{ck} + 1.48 s_n$	$R_{cpi} > R_{ck} - 4$

Relativamente allo scarto quadratico medio,  $s_n$ , la Tabella che segue fornisce quelli realmente conseguibili nella produzione del calcestruzzo in funzione della tipologia di centrale di betonaggio e, in particolare, se la stessa è dotata di un premiscelatore, se il dosaggio è effettuato in automatico e se, infine, viene esercitato un controllo sull'umidità degli aggregati e sulla lavorabilità del calcestruzzo al termine della miscelazione degli ingredienti.



*Confezionamento di provini in cantiere*

*Valori di  $S_n$ , in  $N/mm^2$ , (per provini cubici e cilindrici) in funzione del controllo esercitato in centrale di betonaggio.*

Tipo di produzione	Premiscelatore, dosaggio automatico degli ingredienti e controllo umidità aggregati	Dosaggio automatico ingredienti e controllo umidità aggregati	Dosaggio automatico	Dosaggio manuale
$S_n$ (cub)	4.0	5.0	6.5	8
$S_n$ (cil)	3.0	4.0	5	6.5

## 22

### IL CONTROLLO DI ACCETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO ALLA CONSEGNA IN CANTIERE

L'impresa e la direzione lavori dopo aver accertato che il produttore del calcestruzzo effettua i controlli di conformità del conglomerato cementizio debbono esercitare un ulteriore controllo di "accettazione" durante la realizzazione dei getti mediante prelievi di calcestruzzo da effettuarsi "a bocca di betoniera" in accordo con una delle due procedure previste dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008)*.

Al direttore lavori è fatto obbligo di effettuare i prelievi per il controllo di accettazione del calcestruzzo secondo le procedure definite dalle Norme Tecniche per il controllo di tipo A e B. Val la pena di sottolineare che tali controlli possono essere eseguiti dalla Direzione Lavori senza necessitare di alcun contraddittorio con il fornitore del calcestruzzo. Se, invece, l'impresa con l'intento di verificare la rispondenza del calcestruzzo al contratto di acquisto stipulato (verifica del patto commerciale) volesse eseguire degli ulteriori prelievi è tenuta ad effettuarli in presenza e, quindi, in contraddittorio con il fornitore del conglomerato che potrà decidere se prelevare anch'egli dei provini da sottoporre alle prove di schiacciamento.

*Modalità di esecuzione delle prove di schiacciamento per la determinazione della resistenza caratteristica del conglomerato a "bocca di betoniera".*

MODALITA' DI PROVA	MOTIVAZIONE
PLANARITA' DELLE FACCE DEI PROVINI E PERPENDICOLARITA'	EVITARE ROTTURE DEL PROVINO PER CONCENTRAZIONI DI SFORZO O PER SFORZI DI TRAZIONE GENERATI DA ECCENTRICITA' DEL CARICO
COMPATTAZIONE A RIFIUTO DEL CALCESTRUZZO	ESPULSIONE DELL'ARIA DALL'IMPASTO E RAGGIUNGIMENTO DELLA MASSA VOLUMICA MASSIMA
TRASPORTO DOPO ALMENO 16h DAL CONFEZIONAMENTO	EVITARE CHE SI FORMINO MICROFESSURAZIONI NEL CALCESTRUZZO FRESCO PER EFFETTO DEGLI URTI DOVUTI AL TRASPORTO SU STRADE ACCIDENTATE
MATURAZIONE A 20°C	EVITARE CHE TEMPERATURE COSTANTEMENTE FREDE O TEMPERATURE ELEVATE DURANTE I PRIMI GIORNI DAL GETTO PENALIZZINO LA RESISTENZA A 28 GG.
MATURAZIONE IN ACQUA O IN AMBIENTE CON U.R.>95%	EVITARE LA COMPARSA DI FESSURAZIONI E GARANTIRE UNA CORRETTA IDRATAZIONE DEL CEMENTO

Il controllo di accettazione di tipo A è riferito ad un quantitativo di miscela omogenea non maggiore di 300 m<sup>3</sup> e stabilisce che un controllo consiste di tre prelievi (ognuno costituito da una coppia di provini) effettuati uno ogni 100 m<sup>3</sup> e ogni giorno in cui è previsto un getto<sup>37</sup>. Il controllo ha esito positivo se:

$$R_{cmp} \geq R_{ck} + 3.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$R_{cp1} \geq R_{ck} - 3.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$



Gruppo Cementirosi S.p.A.

dove:

$R_{ck}$  è il valore caratteristico prescritto dal progettista delle opere (o dal direttore lavori);  
 $R_{cmp}$  e  $R_{cp1}$  sono rispettivamente il valore medio e quello minimo delle resistenze di prelievo.

**Il controllo di accettazione di tipo B** è obbligatorio nelle costruzioni che prevedono più di 1500 m<sup>3</sup> di getto di miscela omogenea. Il controllo consiste di un prelievo per ogni giorno di getto e di almeno 15 prelievi per ogni 1500 m<sup>3</sup>. Il controllo è positivo se sono soddisfatte entrambe le disuguaglianze seguenti:

$$R_{cmp} \geq R_{ck} + 1.4 \cdot s_n \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$R_{cp1} \geq R_{ck} - 3.5 \quad (\text{N/mm}^2)$$

dove  $s_n$  è lo scarto quadratico medio delle resistenze a compressione di prelievo e i restanti i simboli hanno lo stesso significato delle disequazioni precedenti.

#### **Il controllo di accettazione così concepito ha una duplice valenza:**

- da una parte serve a stabilire se il calcestruzzo fornito è conforme alla resistenza caratteristica prescritta dal progettista utilizzata nei calcoli strutturali, per il rispetto della durabilità dell'opera ed, in generale, per il rispetto dei livelli di sicurezza prefissati per una determinata opera/elemento strutturale (**VALENZA DI SICUREZZA STRUTTURALE**);

- dall'altra il controllo di accettazione ha anche una **VALENZA CONTRATTUALE** per stabilire se il calcestruzzo fornito dal produttore corrisponde a quello concordato con la stipula del contratto di acquisto/fornitura (generalmente tra impresa esecutrice e fornitore del conglomerato).

Eventuali non conformità evidenziate dai valori di resistenza a compressione, misurati con le modalità sopra descritte, su provini prelevati a "bocca di betoniera" o a piè d'opera, rispetto alla resistenza caratteristica a compressione prescritta dal progettista e pattuita tra acquirente e fornitore ricadono senza alcuna ombra di dubbio sotto l'esclusiva responsabilità del produttore di calcestruzzo. In questa situazione, quindi, al calcestruzzo fornito:

- si applicherà con certezza una penale corrispondente al minor valore per la più bassa resistenza caratteristica posseduta dall'impasto fornito rispetto a quello prescritto;

- verranno accollati al produttore del calcestruzzo anche tutti gli altri oneri eventuali derivanti dalla minore resistenza caratteristica fornita e configurabili in eventuali interventi di consolidamento delle strutture oppure nella loro demolizione.



*Campionamento calcestruzzo fresco durante il getto*

## IL CONTROLLO DI ACCETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO

Di seguito viene riportato un esempio di come eseguire un controllo di accettazione del conglomerato in cantiere nella ipotesi che la  $R_{ck}$  del calcestruzzo richiesta a due produttori distinti sia pari a 25 N/mm<sup>2</sup>.

PRELIEVO N°	$R_{cpi}$ (N/mm <sup>2</sup> ) Produttore 1	$R_{cpi}$ (N/mm <sup>2</sup> ) Produttore 2	$(R_{cpi} - R_{cpm})^2$ Produttore 1	$(R_{cpi} - R_{cpm})^2$ Produttore 2
1	29	25	1	25
2	32	35	4	25
3	31	30	1	0
$R_{cpm}$ $R_{ck}$ (tipo A) $R_{cpmin}$	30.7 27.2 29	30 26.5 25	ACCETTATO (1 e 2)	
4	30	24	0	36
5	30	23	0	49
6	29	29	1	1
$R_{cpm}$ $R_{ck}$ (tipo A) $R_{cpmin}$	29.7 26.2 29	25.3 21.8 23	NON ACCETTATO 2	
7	29	31	1	1
8	30	36	0	36
9	28	37	4	49
$R_{cpm}$ $R_{ck}$ (tipo A) $R_{cpmin}$	29 25.5 28	34.7 31.2 31	ACCETTATO (1 e 2)	
10	32	38	4	64
11	33	21	9	81
12	27	31	9	1
$R_{cpm}$ $R_{ck}$ (tipo A) $R_{cpmin}$	30.7 27.2 27	30 26.5 21	NON ACCETTATO 2	
13	30	27	0	9
14	30	25	0	25
15	30	38	0	64
$R_{cpm}$ $R_{ck}$ (tipo A) $R_{cpmin}$	30 26.5 30	30 26.5 25	ACCETTATO (1 e 2)	
$s_n$ (N/mm <sup>2</sup> ) 1.48 $s_n$	1.56 2.18	5.77 8.08		
$R_{cpm}$ $R_{ck}$ (tipo B) $R_{cpmin}$	30 27.82 27	30 21.92 21	NON ACCETTATO 2	



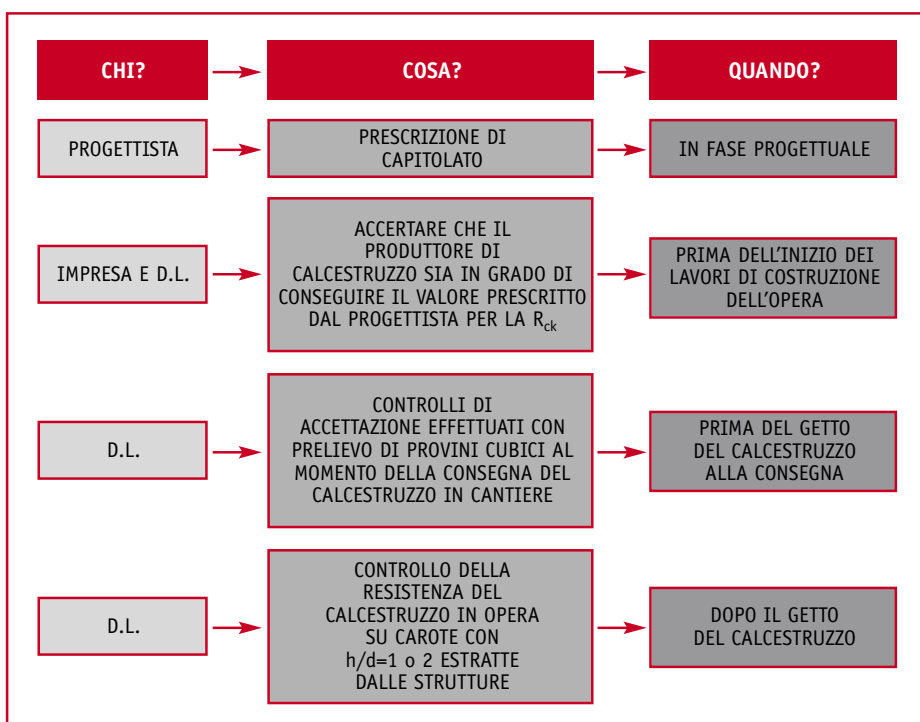
Gruppo Cementirosi S.p.A.

<sup>37)</sup> Si può derogare al prelievo giornaliero se la costruzione prevede un volume complessivo di calcestruzzo inferiore a 100 m<sup>3</sup>.

23

## IL CONTROLLO DELLA QUALITÀ DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

Se i risultati del controllo di accettazione dovessero non soddisfare una delle disuguaglianze definite dal tipo di controllo prescelto (A o B) si dovrà procedere ad una verifica statica dell'opera sulla base della resistenza caratteristica desunta dai controlli di accettazione e inferiore al valore prescritto dal progettista delle strutture, oppure si potrà optare per un controllo della resistenza del conglomerato mediante il prelievo di carote dalla struttura realizzata con il calcestruzzo non conforme.



Al fine di stabilire quali provvedimenti adottare per le strutture nell'eventualità che il controllo di accettazione abbia dato esito negativo, ma anche in quei casi in cui il Direttore Lavori ritiene necessario valutare le prestazioni del calcestruzzo in opera ancorché i controlli eseguiti sui provini prelevati a "bocca di betoniera" abbiano dato esito positivo, le Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14.01.2008 - indicano che si "... potrà procedere ad una valutazione delle caratteristiche di resistenza attraverso delle prove non distruttive" come peraltro veniva già suggerito nel precedente D.M. del 9 Gennaio 1996. La novità sostanziale introdotta dalle recenti Norme Tecniche consiste invece nel fatto che le norme ammettono che **Il valore medio della resistenza del calcestruzzo in opera, determinato mediante le procedure descritte dalla norme EN 12504 parte 1 e 2, debitamente trasformato in resistenza cubica, non deve essere inferiore all'85% della resistenza a compressione media di progetto. Quest'ultima si ricava incrementando la  $R_{ck}$  di progetto di 8 N/mm<sup>2</sup>.**

Le norme indicano sostanzialmente due possibilità per la misura della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera (definito dalle norme come "**resistenza strutturale**"):

- il prelievo e successivo schiacciamento di "carote" di calcestruzzo prelevate dalle strutture con utensile a corona diamantata (norma EN 12504-1);
- la determinazione della resistenza attraverso correlazioni tra la stessa e l'indice di rimbalzo misurato sulle strutture mediante il martello di Schmidt (sclerometro) in accordo a quanto indicato dalla norma EN 12504-2.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Alla luce delle notevoli incertezze segnalate in numerosi lavori sperimentali nel correlare l'indice di rimbalzo misurato con lo sclerometro con la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo<sup>38</sup>, qui di seguito si parlerà esclusivamente dei controlli in opera basati sulla determinazione della resistenza a compressione su carote prelevate dalle strutture in accordo alla EN 12504-1. Secondo questa normativa se la resistenza caratteristica viene prescritta dal progettista su provini cubici, essendo impossibile procedere al prelievo di provini cubici direttamente dalle strutture, esiste il problema di sottoporre a prove di schiacciamento carote di snellezza minore rispetto a



Carota in cls

quelle con  $h/d=2$  per rendere comparabili i valori ottenuti con quello prescritto che si riferisce a provini cubici. Infatti, se si adottassero per la determinazione della resistenza carote con  $h/d=2$ , il valore misurato risulterebbe comunque inferiore (di circa il 17-20%) a quello misurato su provini cubici per via della maggiore snellezza. Per superare questo problema la norma EN 12504-1 stabilisce che la resistenza a compressione deve essere valutata, al fine di renderla comparabile dal punto di vista geometrico a quella misurata su cubi, su carote estratte dalle strutture contraddistinte da un rapporto  $h/d=1$ . Essendo queste ultime elementi di geometria tozza i valori di resistenza misurati su queste carote sono paragonabili dal punto di vista geometrico a quelli determinati su provini cubici. D'altra parte le stesse *Linee Guide sul Calcestruzzo Strutturale* indicano che la resistenza su provino cilindrico con  $h/d=1$  è superiore del 18% a quella misurata su provino cilindrico con  $h/d=2$ . Quindi, se la resistenza a compressione su provini cilindrici ( $h/d=2$ ) è, in accordo alle norme tecniche, inferiore del 17% rispetto a quella misurata su provino cubico, si deve concludere che **dal punto di vista geometrico è equivalente misurare la resistenza a compressione su un provino cubico oppure su un provino cilindrico con rapporto  $h/d=1$ .**

Chiarito questo aspetto relativo alla geometria dei provini (le Norme Tecniche suggeriscono infatti che il "...valore medio misurato con tecniche opportune e debitamente trasformato in resistenza cubica...") occorre adesso addentrarsi nello spiegare il perché la norma ammette per il calcestruzzo in opera un valore medio della resistenza meccanica a compressione misurato su carote con rapporto  $h/d=1$  inferiore del 15% rispetto a quello della resistenza convenzionale caratteristica prescritta dal progettista delle strutture.

Innanzitutto, occorre evidenziare come le Norme Tecniche accettino per la prima volta che la resistenza a compressione del calcestruzzo in opera sia inferiore rispetto a quello prescritto dal progettista. Si può sostenere che per il calcestruzzo in opera sia ammessa una sorta di *malus* del 15%. Questa posizione del legislatore è assolutamente condivisibile nei suoi aspetti generali in quanto nella progettazione delle sezioni di elementi in calcestruzzo la resistenza di calcolo si desume dividendo la  $f_{ck}$  attraverso un coefficiente parziale di sicurezza (che vale 1.5) che tiene conto che la resistenza del calcestruzzo in opera è inferiore a quella misurata sui provini cubici confezionati "a bocca di betoniera" in quanto corrisponde:

- ad una pratica impossibilità da parte dell'impresa esecutrice di compattare a rifiuto il calcestruzzo con la stessa efficacia e la stessa facilità con cui si può garantire la completa espulsione dell'aria in un provino cubico (quello utilizzato per i controlli di accettazione a bocca di autobetoniera) di circa 3.5 litri.

- ad una pratica impossibilità da parte dell'impresa esecutrice di garantire per la struttura una maturazione umida per 28 giorni dall'esecuzione dei getti alla stregua di quanto avviene, invece, per la maturazione dei cubetti confezionati a "bocca di betoniera".

- oltre a due aspetti esecutivi evidenziati ai due punti precedenti, occorre tener presente che la resistenza a compressione del calcestruzzo in opera è anche strettamente dipendente dalla temperatura del conglomerato durante la maturazione e in particolare nella fase immediatamente successiva al getto.



*Prelievo di carote da un muro di contenimento*

Come per i controlli di accettazione effettuati sui provini prelevati a bocca di betoniera anche nel caso della resistenza a compressione misurata sulle carote estratte dalle strutture in opera il problema riveste una duplice natura: quella che attiene agli aspetti strutturali, di durabilità e di generale sicurezza delle strutture e quella più propriamente tesa a individuare le responsabilità di eventuali non conformità rispetto a quanto indicato dalle norme tecniche, allorquando, cioè, la resistenza media misurata su carote di calcestruzzo con rapporto  $h/d=1$  prelevate dalle strutture in opera risulti inferiore di più del 15% rispetto al valore medio di progetto.

Per meglio comprendere le implicazioni derivanti dalla novità introdotta dalle Norme Tecniche analizziamo le diverse casistiche che possono presentarsi nella realtà riassunte nelle Tabelle che seguono che si riferiscono a due situazioni distinte: la prima è quella relativa ad un cantiere dove correttamente la Direzione Lavori procede all'effettuazione dei controlli di accettazione. La seconda, invece, in una situazione dove per la mancanza dei prelievi effettuati a bocca di betoniera si controlla la sola resistenza del conglomerato in opera.

Le situazioni riassunte nelle Tabelle si riferiscono a cantieri dove il controllo della resistenza in opera avvenga, ovviamente, dopo che siano trascorsi almeno 28 giorni dall'esecuzione dei getti sia perché il valore medio della resistenza deve essere confrontato con quello caratteristico che si intende riferito ai 28 giorni, che per evitare indesiderati deleteri effetti di disturbo prodotti dall'azione del carotiere su calcestruzzi troppo giovani. L'età della struttura al momento del prelievo delle carote, inoltre, deve essere necessariamente prolungata se la temperatura del conglomerato in opera è risultata molto più bassa di 20°C. Ad esempio, se la struttura è realizzata nel periodo invernale potrebbe essere necessario posticipare il prelievo delle carote dopo i 60 giorni dal getto proprio per permettere che il calcestruzzo in opera possa raggiungere un grado di idratazione paragonabile a quello del provino maturato per 28 giorni ma a 20°C. Allo stesso modo la scelta del diametro della carota deve essere effettuata sulla base della dimensione massima dell'aggregato. Generalmente verranno prelevate carote con diametro e altezza pari a 100 mm che verranno sottoposte a rettifica meccanica prima delle prove di schiacciamento. I valori ottenuti, inol-

tre, dovranno tener conto della posizione del carotaggio, della direzione di carotaggio rispetto a quella di getto, del grado di umidità del calcestruzzo delle carote al momento della prova. Infine, prima di procedere al prelievo è opportuno con un magnetometro individuare le zone della struttura prive di armature che potrebbero penalizzare il valore di resistenza.

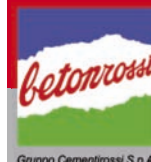
La normativa non specifica il numero di carote da sottoporre a prove di schiacciamento, tuttavia, si deve ritenere che per la validità del controllo della resistenza in opera si debba prelevare almeno tre carote e, comunque, non meno di sei carote per ogni tipologia di elementi strutturali (i plinti di un fabbricato, i muri di un cantinato, i pilastri del 1° piano, le travi e le solette dell'ultimo impalcato, etc.). In alternativa, si può fare utile riferimento alla norma EN 13791 la quale prevede un numero minimo di tre carote per ogni tipologia di elementi da indagare e un numero complessivo di carote almeno pari a 15 (*Approach A*) oppure compreso tra 3 e 14 (*Approach B*).

In questo contesto si possono analizzare le casistiche possibili riassunte nella Tabella che si riferisce ad una serie di elementi strutturali per i quali il progettista ha prescritto l'impiego di calcestruzzo con  $R_{ck}$  di 30 N/mm<sup>2</sup> ed un controllo di accettazione di tipo B.

**CASO 1 – Il controllo di accettazione effettuato sui cubetti a bocca di betoniera risulta positivo e nel contempo il valore medio della resistenza cubica in opera, ancorché inferiore a quello misurato sui provini cubici, risultando maggiore dell'85% del valore medio di progetto (38 N/mm<sup>2</sup>), è anch'esso conforme a quanto specificato dalle Norme Tecniche.** In questo caso, la direzione lavori non deve eseguire nessuna verifica dei livelli di sicurezza delle strutture. In sostanza, **la normativa ritiene che la penalizzazione del valore della resistenza cubica media ("la resistenza strutturale") in opera, essendo contenuta al di sotto del 15% del valore medio di progetto, è ampiamente compensata dai coefficienti parziali di sicurezza del materiale adottati per le verifiche già effettuate dal progettista dell'opera.** Tutti gli attori coinvolti hanno svolto correttamente i compiti assegnati.

**CASO 2 - Il controllo di accettazione effettuato sui cubetti a bocca di betoniera risulta positivo mentre il valore medio della resistenza cubica in opera, è inferiore all'85% del valore medio di progetto prescritto dal progettista.** In questo contesto gli scadenti valori della resistenza a compressione in opera evidenziano una erronea manipolazione da parte dell'impresa di un calcestruzzo fornito dal produttore in conformità alle specifiche progettuali. Queste situazioni sono da ascrivere ad errori nella posa (segregazione esterna dei getti soprattutto in elementi inclinati quali travi di copertura, solette di scale, rampe di accesso a parcheggi), a compattazioni inefficaci (tempo insufficiente di vibrazione, inserimento troppo diradato o poco profondo del vibratore nel getto, etc) e/o ad una maturazione umida assente o di breve durata. La situazione accertata impone alla Direzione Lavori di procedere ad una verifica del livello di sicurezza delle strutture utilizzando un valore caratteristico più basso di quello prescritto e desunto dalla seguente correlazione:  $R_{m,opera}/0.85 - 8$ . Ad esempio, se nel caso di Tabella 1 il valore medio della resistenza in opera fosse risultato di 31.5 N/mm<sup>2</sup> le verifiche possono essere condotte con un nuovo valore caratteristico pari a 29 N/mm<sup>2</sup> ( $31.5/0.85 - 8$ ). E' evidente che in questo contesto qualsiasi onere derivante dal controllo dei livelli di sicurezza (dequalificazione dell'opera, esecuzione di lavori di consolidamento o demolizione) ricade sotto l'esclusiva responsabilità dell'impresa.

**CASO 3 - Il controllo di accettazione effettuato sui cubetti a bocca di betoniera risulta negativo evidenziando per il calcestruzzo un valore caratteristico inferiore a quello prescritto. Il valore medio della resistenza cubica in opera, invece, è maggiore dell'85% del valore medio effettivo del calcestruzzo fornito.** Anche in questo caso ci sono pochi dubbi sulle responsabilità della mancata conformità del calcestruzzo al valore prescritto che va attribuita in toto al fornitore del conglomerato. Inoltre, il valore medio misurato in opera superiore all'85% del valore medio realmente posseduto dal conglomerato fornito evidenzia come l'impresa abbia correttamente utilizzato il conglomerato procedendo ad una corretta posa in opera, compattazione e maturazione dei getti. Pertanto, eventuali provvedimenti che la Direzione Lavori dovesse adottare a seguito della verifica



dei livelli di sicurezza delle strutture – che anche in questo caso si rende necessaria - dovranno essere imputati al fornitore del conglomerato.

**CASO 4 - Il controllo di accettazione effettuato sui cubetti a bocca di betoniera risulta negativo evidenziando per il calcestruzzo un valore caratteristico inferiore a quello prescritto. Il valore medio della resistenza cubica in opera, inoltre, risulta inferiore all' 85% del valore medio effettivo del calcestruzzo fornito.** In questo contesto entrambi gli attori (fornitore di conglomerato e impresa) hanno operato in difformità a quanto richiesto dalla progettazione e dalle norme. Il produttore, infatti, ha fornito un calcestruzzo non conforme e l'impresa lo ha messo in opera in maniera erranea. Le responsabilità del mancato possesso dei livelli di sicurezza stabiliti dal progettista che dovessero emergere dalla verifica strutturale sono da imputare ad entrambi i soggetti coinvolti.

Casistiche possibili nei controlli di accettazione del conglomerato al momento della fornitura e dalle strutture in servizio.

Caso	$R_{ck}$ di progetto nominale	$R_m$ $R_{1s}$ $R_{ckeffett}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Controllo su provini cubici a bocca di betoniera	$R_{m,opera}$ (controllo in opera su carote con $h/d=1$ )	Implicazioni strutturali (verifica livello di sicurezza)	Implicazioni legali (verifica delle responsabilità)
1	30	37.5 26.5 5 30	POSITIVO	>32.3 N/mm <sup>2</sup> (pari all'85% del valore medio di progetto)  POSITIVO	NON OCCORRE effettuare nes- suna ulteriore verifica dei livel- li di sicurezza della struttura. Valgono, cioè, le verifiche già effettuate dal cal- colatore in fase progettuale.	Entrambi gli attori hanno rispettato le prescrizioni. Il calcestruzzo forn- ito dal produttore è conforme alle specifiche del pro- gettista. L'impresa ha realizzato una corretta messa in opera dell'impas- to.
2	30	37.5 26.5 5 30	POSITIVO	<32.3 N/mm <sup>2</sup> (pari all'85% del valore medio di progetto)  NEGATIVO	OCCORRE procedere ad una verifica dei livel- li di sicurezza delle strutture sulla base del valore ridotto della resistenza a compressione.	Il produttore ha fornito calce- struzzo conforme al valore prescrit- to. L'impresa ha realizzato una scadente posa in opera dell'impas- to. <b>Le responsa- bilità sono esclu- sive dell'impresa.</b>
3	30	32.5 22.5 5 25	NEGATIVO	>28 N/mm <sup>2</sup> (cioè dell'85% del valore medio effettivo del calcestruzzo fornito)  POSITIVO	OCCORRE procedere ad una verifica dei livel- li di sicurezza delle strutture sulla base del valore ridotto della resistenza a compressione.	Il produttore ha fornito calcestruz- zo non conforme. Per contro l'impre- sa ha eseguito una corretta posa in opera del con- glomerato. <b>Le responsabilità sono esclusive del produttore.</b>
4	30	32.5 22.5 5 25	NEGATIVO	<28 N/mm <sup>2</sup> (cioè dell'85% del valore medio effettivo del cal- cestruzzo fornito)  NEGATIVO	OCCORRE procedere ad una verifica dei livel- li di sicurezza delle strutture sulla base del valore ridotto della resistenza a compressione.	Calcestruzzo non c o n f o r m e . L'impresa ha ese- guito una scaden- te posa in opera del conglomerato. <b>Le responsabilità sono sia del pro- duttore che del- l'impresa.</b>

Come abbiamo potuto notare dall'analisi dei casi precedenti è sempre possibile risalire alle responsabilità di eventuali non conformità quando la Direzione Lavori correttamente realizza i controlli di accettazione al momento della consegna del calcestruzzo in cantiere procedendo al confezionamento, alla conservazione e alla maturazione dei provini in accordo alle norme sopramenzionate e successivamente decida di effettuare anche il controllo della resistenza in opera mediante il prelievo delle carote. La situazione, invece, diventa più complicata in quei contesti in cui una disattenta Direzione Lavori omette di effettuare i controlli di accettazione, contravvenendo già ad un obbligo di legge, e successivamente decida di valutare la resistenza del calcestruzzo dalle strutture in opera: le casistiche possibili in questa evenienza sono riassunte nella Tabella che segue.

Casistiche possibili in cantiere dove erroneamente non sono stati effettuati i controlli di accettazione del conglomerato.

Caso	$R_{ck}$ di progetto nominale	$R_m$ $R_1$ s $R_{ckeffet}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Controllo su provini cubici a bocca di betoniera	$R_{m\ opera}$ (controllo in opera su carote con $h/d=1$ )	Implicazioni strutturali (verifica livello di sicurezza)	Implicazioni legali (verifica delle responsabilità)
5	30	Prelievi non eseguiti	Controllo non effettuato	>32.3 N/mm <sup>2</sup> (cioè maggiore dell'85% del valore medio di progetto)  <b>POSITIVO</b>	<b>NON OCCORRE effettuare nes- suna ulteriore verifica dei livel- li di sicurezza</b> della struttura. Valgono, cioè, le verifiche già effettuate dal cal- colatore in fase progettuale.	Entrambi gli attori hanno rispettato le prescrizioni. Il calcestruzzo fornito dal produttore è conforme alle specifiche del pro- gettista. L'impresa ha realizzato una corretta messa in opera dell'impasto.
6	30	Prelievi non eseguiti	Controllo non effettuato  Impossibile stabi- lire eventuali non conformità del calcestruzzo forn- ito. La responsa- bilità di questa incertezza deve essere attribuita alla D.L.	<32.3 N/mm <sup>2</sup> (cioè < dell'85% del valore medio di progetto)  <b>NEGATIVO</b>	<b>OCCORRE procedere ad una verifica dei livel- li di sicurezza</b> delle strutture sulla base del valore ridotto della resistenza a compressione.	Per la mancata esecuzione dei prelievi valori non conformi (inferiori dell'85% del valo- re prescritto) ricadono esclusiva- mente a carico dell'impresa. Quest'ultima infatti è la sola responsabile della qualità del con- glomerato al momento del pas- saggio di conse- gne dello stesso durante lo scarico in cantiere.

**CASO 5 - Il controllo di accettazione sui cubetti a bocca di betoniera non è stato effettuato. Il valore medio della resistenza cubica in opera, invece, è maggiore dell'85% del valore medio di progetto prescritto dal progettista.** In questo caso, la direzione lavori non deve eseguire nessuna verifica dei livelli di sicurezza delle strutture. Non ci sono, infatti, non conformità. Questo caso è assimilabile a quello 1 descritto in precedenza. Esiste comunque la possibilità, anche se impossibile da dimostrare, che il calcestruzzo fornito potesse essere di resistenza caratteristica maggiore di quella prescritta e che questo abbia mascherato una erronea posa in opera dell'impresa. Questa situazione è comunque di scarso interesse dal punto di vista pratico.

**CASO 6 - Il controllo di accettazione sui cubetti a bocca di betoniera non è stato effettuato. Il valore medio della resistenza cubica in opera, inoltre, è inferiore all'85% del valore medio di progetto prescritto dal progettista.** Questa purtroppo è la situazione più intricata da risolvere. Dal punto di vista della sicurezza strutturale è innegabile che si



Gruppo Cementirosi S.p.A.

debba procedere ad una verifica dei livelli di sicurezza dell'opera. I costi conseguenti ai provvedimenti che occorre intraprendere per eliminare eventuali non conformità emerse dalla verifica debbono essere sostenuti dall'impresa esecutrice delle opere. Questo assunto discende dal fatto la responsabilità del produttore di calcestruzzo si annulla al momento della consegna del calcestruzzo in cantiere. Infatti, l'obiettivo del controllo di accettazione del calcestruzzo effettuato con i prelievi a bocca di betoniera è proprio finalizzato a valutare la qualità del conglomerato al momento del passaggio di consegna fornitore/impresa. Nel CASO 6 esiste comunque la possibilità che alla non conformità della resistenza in opera possa aver contribuito anche la scadente qualità del calcestruzzo fornito, ma purtroppo, per la mancata esecuzione dei controlli di accettazione, questo non è più univocamente dimostrabile. E' questo il motivo per il quale l'impresa dovrebbe esigere che la direzione lavori effettuasse i controlli di qualità anche a garanzia del proprio operato durante la messa in opera del calcestruzzo. In presenza di una Direzione Lavori che opera in difformità alle Norme Tecniche, contravvenendo, quindi, ad un obbligo stabilito dalla Legge, l'impresa deve formalizzare alla D.L. questa sua inadempienza in forma scritta e procedere, a tutela del suo operato, a controllare la qualità del calcestruzzo mediante prelievi effettuati da un Laboratorio Autorizzato in presenza del fornitore.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

---

<sup>38)</sup> L'indice di rimbalzo è affetto, ad esempio, dalla rigidità, dalla dimensione massima e dal volume di aggregato grosso che, invece, hanno scarsa influenza sulla resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo. L'indice di rimbalzo, inoltre, può essere significativamente influenzato dal grado di carbonatazione e dal contenuto di umidità degli strati più superficiali di calcestruzzo che, per contro, non modificano i valori di resistenza meccanica a compressione del conglomerato. In definitiva, le correlazioni fornite generalmente sugli sclerometri tra resistenza a compressione e indice di rimbalzo non possono ritenersi valide per qualsiasi tipo di calcestruzzo.

24

## PRESCRIZIONE PER IL VALORE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE IN OPERA

**L** Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 14.01.2008 hanno introdotto una significativa variazione relativamente alla resistenza in opera richiesta ai fini della collaudabilità delle strutture rispetto a quanto riportato nel precedente D.M. del 14.09.2005. In accordo con il D.M. del 14.09.2005, infatti, veniva ritenuto accettabile un valore medio della resistenza a compressione media cubica in opera (identificata come resistenza attuale) pari all'85% del valore caratteristico della resistenza a compressione di progetto. E' da segnalare, inoltre, come i due criteri di collaudabilità suggeriti dalle Norme Tecniche italiane siano diversi rispetto a quello suggerito dalla norma europea EN 13791 la quale stabilisce in merito che la resistenza caratteristica del calcestruzzo in opera deve risultare almeno pari all'85% del valore caratteristico della resistenza a compressione di progetto. Il criterio di collaudabilità stabilito sia dalla norma europea EN 13791 che dalle Norme Tecniche per le Costruzioni nella versione 14.01.2008 si basa sulla comparazione di grandezze omogenee: i valori caratteristici della resistenza a compressione (per la norma europea) e quelli medi per le Norme Tecniche (D.M. 14.01.2008). Per contro le Norme Tecniche del settembre 2005 effettuano una comparazione tra grandezze non omogenee mettendo a confronto il valore medio della resistenza a compressione in opera con quello caratteristico di progetto che ha come risultato quello di ritenere accettabili valori della resistenza in opera troppo bassi e non affidabili dal punto di vista della sicurezza strutturale delle costruzioni.

Per meglio chiarire quest'aspetto riferiamoci all'esempio della Tabella che segue. Nella ipotesi che (CASO A) il calcestruzzo previsto dal progettista debba possedere una  $R_{ck}$  di 30 N/mm<sup>2</sup> e che venga prescritto un controllo di accettazione di tipo B, si supponga di avvalersi di un eccellente produttore di conglomerato cementizio che effettua specifici controlli in produzione sull'umidità degli aggregati, sull'acqua di impasto, sulle pesate dei singoli ingredienti oltre a possedere un sistema di premiscelazione del calcestruzzo prima dello scarico in autobetoniera. In questa situazione è ragionevole attendersi che nelle prove di schiacciamento effettuate sui provini confezionati a bocca di betoniera emerga un valore dello scarto quadratico medio ( $s_n$ ) di circa 5 N/mm<sup>2</sup> e una resistenza media di 37.5 N/mm<sup>2</sup>. Il valore indicato per lo scarto quadratico è quello tipico di impianti di betonaggio italiani che effettuano controlli stringenti di produzione. Supponendo che l'impresa realizzi l'opera procedendo con estrema cura al getto del calcestruzzo e alla compattazione, è ragionevole ammettere che lo scarto risulti compreso in un intervallo 2-5 N/mm<sup>2</sup>. Allora consentire, come stabilito dalle Norme Tecniche del 14.09.2005, che il valore medio della resistenza in opera possa risultare l'85% del valore caratteristico misurato sui provini confezionati alla consegna del conglomerato in cantiere equivale a ritenere accettabile un valore medio della resistenza in opera pari a 25.5 N/mm<sup>2</sup> da cui si desume che il valore caratteristico del calcestruzzo in opera<sup>39</sup> ( $R_{c,attuale}$ ) può risultare pari a:  $R_{c,k,opera} = R_{m,opera} - 1.48 \cdot s_{n,opera} = 25.5 - 1.48 \cdot 2 = 22.5$  N/mm<sup>2</sup> oppure  $R_{c,k,opera} = 25.5 - 1.48 \cdot 5 = 18.1$  N/mm<sup>2</sup>. Questo equivale a ritenere accettabile una diminuzione del valore caratteristico del calcestruzzo in opera di circa il 25 - 40% rispetto a quello utilizzato dal progettista per la verifica dei livelli di sicurezza delle strutture. Francamente questa riduzione sembra decisamente troppo elevata se si tiene conto che la norma europea, invece, ritiene accettabile una riduzione del valore caratteristico per il conglomerato in opera non superiore al 15% di quello prescritto dal progettista. In sostanza, sembra che le Norme Tecniche del 14.09.2005 siano troppo permissive e blande a generale svantaggio della sicurezza delle strutture.

Alla luce di queste considerazioni è opportuno che nella stesura del capitolato il progettista e/o la Direzione Lavori specificino un limite più stringente per il valore della resistenza meccanica a compressione misurata in opera rispetto a quanto suggerito dalle Norme Tecniche del 14.09.2005. Adottando il criterio di maggior sicurezza fissato dalle Norme Tecniche del 14.01.2008 oppure dalla norma europea EN 13791 imponendo, quindi, che **rispettivamente che il valore medio della resistenza a compressione in opera risulti almeno pari all'85% del valore medio di progetto della resistenza a compressione (D.M. 14.01.2008) o il valore caratteristico della resistenza a compressione**



Gruppo Cementirosi S.p.A.

**misurato sulle carote con rapporto h/d=1 estratte dalle strutture in opera sia almeno pari all'85% del valore caratteristico prescritto dal progettista e valutato sui provini cubici di lato 150 mm** confezionati al momento della consegna del calcestruzzo in cantiere, conservati e maturati in accordo alle procedure previste dalle norme EN 12390-1 / 2 /3 e 4.



## 25 DURABILITÀ DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO E STATI LIMITE

La **durabilità** di una struttura in calcestruzzo armato o precompresso rappresenta la *capacità di resistere alle sollecitazioni aggressive prodotte dall'ambiente in cui la stessa è situata mantenendo inalterata la funzionalità per la quale è stata progettata per l'intera vita di servizio* prevista che rappresenta il tempo dall'ultimazione della costruzione in corrispondenza del quale la struttura non risponde più ai requisiti funzionali ed estetici per i quali è stata progettata e realizzata e, pertanto, necessita di un intervento di ripristino e manutenzione.

Si intuisce, quindi, come il requisito di durabilità sia squisitamente di tipo progettuale e, pertanto, deve essere affrontato introducendo le sollecitazioni aggressive ambientali tra i parametri che concorrono, unitamente ai carichi statici e dinamici agenti sulla struttura, al dimensionamento delle sezioni degli elementi strutturali, alla individuazione delle percentuali di armatura e alla loro disposizione e, in generale, alla definizione dei particolari costruttivi della costruzione.

In questi termini il problema della durabilità delle strutture deve essere risolto attraverso l'esame comparativo di due variabili: quella ( $S$ ) che rappresenta le sollecitazioni agenti (incluse quelle aggressive promosse dall'ambiente) e la variabile ( $R$ ) che, invece, individua la resistenza che un determinato elemento strutturale possiede nei confronti di suddette sollecitazioni.

Pertanto, il problema della durabilità di una struttura ed, in generale, della sicurezza, è riconducibile ad un'analisi di tipo probabilistico e ricondotto in termini di probabilità di collasso agli stati limite rappresentata da quella situazione in cui la probabilità che la resistenza ( $R$ ) dell'elemento strutturale risulti inferiore alle sollecitazioni ( $S$ ) agenti eguagli il livello di probabilità prefissato ( $p_{target}$ ) per lo stato limite prescelto.



Ponte sul fiume Po (Piacenza) - TAV

In generale, nell'approccio ai problemi di durabilità delle strutture si fa riferimento allo *stato limite di servizio* corrispondente al raggiungimento di una probabilità prefissata ( $p_{SLS}$ ) in corrispondenza della quale l'elemento strutturale presenta deficienze funzionali ed estetiche e, pertanto, necessita di un intervento di manutenzione, di ripristino oppure di parziale sostituzione.

In definitiva, dalle considerazioni effettuate in precedenza emerge come il problema della durabilità delle strutture risulti fondamentalmente di tipo economico e, pertanto, deve essere affrontato con l'obiettivo di minimizzare i costi globali dell'opera conteggiando sia quelli da sostenere in fase di costruzione che quelli da impegnare negli interventi di ripristino. Questo approccio impone la definizione della Vita Nominale (50 o 100 anni rispettivamente per le opere che ricadono in classe 1 o 2 in accordo alle Norme Tecniche) che si intende garantire in funzione della tipologia, della destinazione d'uso e dell'importanza strategica del manufatto.

La scarsa attenzione riservata in passato alle azioni aggressive ambientali è stata favorita dalla pratica assenza di strumenti normativi che attraverso dei requisiti semplici ed efficaci aiutassero il progettista nella scelta del conglomerato. Basti pensare che, relativamente alla durabilità del calcestruzzo fino al 1992 i vecchi D.M. esplicativi della legge n. 1086 suggerivano " *Al fine di garantire la durabilità del conglomerato in ambiente aggressivo così come in presenza di cicli di gelo-disgelo è necessario studiarne accuratamente la composizione (P.to 2.1.8 del D.M. 27 luglio 1985)*". Inutile sottolineare come questa "pseudo-

prescrizione” sia stata per lungo tempo disattesa per la reale mancanza di regole pratiche e di suggerimenti da adottare nel confezionamento del calcestruzzo in relazione al livello di aggressione esercitato dall’ambiente.

Sebbene le statistiche evidenzino che la scadente qualità del calcestruzzo sia la principale responsabile dei processi di dissesto/degrado delle strutture, tuttavia, occorre tener presente che il problema della durabilità deve essere affrontato con un approccio ingegneristico (**proattivo**) che tenga conto non solo dei meccanismi di deterioramento del materiale, ma prenda in esame anche le inevitabili implicazioni di carattere strutturale derivanti dalla tipologia dell’apparecchiatura costruttiva, le deviazioni tra modelli teorici e comportamenti reali dei manufatti, gli errori insiti nella difficoltà di realizzazione dei particolari costruttivi, le distorsioni prodotte dalle variazioni termo-igrometriche dell’ambiente.

26

## CAUSE DI DEGRADO DEL CALCESTRUZZO E DELLE ARMATURE

**I**l degrado del calcestruzzo e delle armature può essere ricondotto sostanzialmente a due cause principali:

**A) chimiche ed elettro-chimiche** che implicano, cioè, reazioni chimiche e processi elettrochimici tra i fluidi aggressivi provenienti dall'ambiente esterno e, rispettivamente, gli ingredienti o i prodotti di idratazione del cemento e le barre di armatura;

**B) fisiche**, determinate dalle variazioni di temperatura del calcestruzzo e/o dell'ambiente esterno, dai gradienti di umidità relativa oppure derivanti dai carichi statici e dinamici agenti sulla struttura, dai carichi impulsivi, da quelli ciclici e dalle azioni abrasive.

**Sia le cause chimiche che quelle fisiche di degrado possono essere distinte in:**

- **endogene**, determinate cioè dalla presenza di almeno uno fattori scatenanti il processo di degrado all'interno della struttura in calcestruzzo;

- **esogene**, caratterizzate da meccanismi di degrado promossi fondamentalmente da fattori di tipo ambientale.

La Tabella riassume i principali processi di degrado del calcestruzzo e delle armature suddivise in accordo alla classificazione sopramenzionata.

Cause endogene ed esogene di degrado di tipo chimico, elettrochimico e fisico del calcestruzzo e delle armature.

DEGRADO DEL CALCESTRUZZO E DELLE ARMATURE			
CAUSE CHIMICHE - ELETTROCHIMICHE		CAUSE FISICHE	
ENDOGENE	ESOGENE	ENDOGENE	ESOGENE
Solfati	Carbonatazione	Delta T int.	Delta T est
Silice-Alcali	Dilavamento		Incendio
Carbonato-Alcali	Cloruri		Ritiro
Cloruri	Solfati		Urti
	Solfuri		Sali disgelanti
	- Acido Carbonico - Sostanze di provenienza industriale		- Erosione - Abrasione - Cavitazione - Fatica

Le cause esogene di natura chimica ed elettrochimica che promuovono il degrado dei materiali strutturali sono da ascrivere a reazioni chimiche e a processi elettrochimici che coinvolgono i *fluidi aggressivi* presenti nell'ambiente in cui la struttura è situata e i prodotti di idratazione del cemento e/o le barre di armatura. I fluidi aggressivi più importanti in relazione alle tipologie di degrado sono rappresentati segnatamente dall'*ossigeno*, dall'*anidride carbonica* (presenti entrambi in forma gassosa nell'atmosfera), dall'*acqua* e dalle *sostanze in essa disciolte in forma ionica* (ad esempio, acido carbonico, solfati, cloruri o sostanze chimiche di provenienza industriale). Tuttavia, perché i processi acquistino rilevanza dal punto di vista ingegneristico non è sufficiente che i fluidi aggressivi lambiscano la superficie esterna della struttura, ma è, invece, necessario che essi la penetrino interessando spessori centimetrici di calcestruzzo. Si intuisce, quindi, che qualsiasi processo di degrado, indipendentemente dalla natura degli aggressivi e dai materiali strutturali coinvolti, dipende fortemente dalla capacità dei fluidi di penetrare nella matrice cementizia.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Sono sostanzialmente tre i meccanismi che determinano la penetrazione dei fluidi aggressivi nel calcestruzzo ed ognuno è associato ad una diversa "forza motrice":

- la **permeazione** è il meccanismo per il quale la penetrazione del fluido aggressivo è determinato da un gradiente di pressione;
- la **diffusione** in cui l'ingresso nel mezzo poroso è governato da un gradiente di concentrazione;
- l'**assorbimento** o **suzione capillare** generato dalle forze di adesione superficiale per affinità di un liquido, e dell'acqua in particolare, con le superfici di un solido (del calcestruzzo per i nostri scopi).

Nelle strutture reali i processi di trasporto sopramenzionati non intervengono mai singolarmente e l'ingresso dei fluidi aggressivi nella matrice cementizia è generalmente da ascrivere a più processi agenti simultaneamente.

27

## IL CALCESTRUZZO IMPERMEABILE PER LE STRUTTURE A TENUTA IDRAULICA

La richiesta del requisito di “impermeabilità” riguarda quelle strutture che debbono garantire una “tenuta idraulica”, dove quindi una perdita di acqua determina seri inconvenienti per la funzionalità della stessa o degli ambienti ad essa adiacenti. E’ il caso, ad esempio, delle fondazioni e dei muri perimetrali in una struttura interrata (vani cantinati, parcheggi interrati, etc.) dove una eccessiva permeabilità del calcestruzzo potrebbe favorire l’ingresso dell’ acqua presente nel terreno nei vani cantinati. Il problema riguarda anche le piscine natatorie ed, in generale, le vasche che contengono acqua potabile (acquedotti) o acque reflue.



Ponte sul fiume Brenta.  
Quadruplicamento tratta funzionale  
Padova-Venezia Mestre

Per queste tipologie di opere si può conseguire il requisito di impermeabilità senza necessariamente dover ricorrere all’impiego di rivestimenti protettivi impermeabili a base di membrane bituminose o di malte cementizie modificate con lattici purchè si osservino le seguenti prescrizioni:

- **impiego di calcestruzzi con rapporto a/c inferiori**, a seconda del tipo di struttura, a **0.55 o 0.50** che evidenzino una penetrazione di acqua determinata con la procedura stabilita dalla norma EN 12390-8 non superiore rispettivamente a 20 mm e 10 mm;
- **utilizzo di calcestruzzi con ridotta tendenza alla segregazione e al bleeding.** Questa prescrizione ha come obiettivo quello di migliorare la qualità dell’interfaccia pasta-aggregato per conseguire minori permeabilità;
- **posa in opera del conglomerato e compattazione dei getti eseguita con perfetta cura per evitare che si manifestino fenomeni di segregazione esterna** (con formazione di vespai e nidi di ghiaia) e che rimangano percentuali eccessive di aria intrappolata nell’impasto;
- **maturazione umida dei getti per almeno 7 giorni.** Questa prescrizione equivale a mantenere le strutture casserate o a proteggerle subito dopo la rimozione dei casseri con teli impermeabili o geotessili bagnati giornalmente;
- **accurata esecuzione delle riprese di getto** in corrispondenza dell’attacco fondazione/muri perimetrali. In questi punti singolari, infatti, è elevato il rischio che si formi una soluzione di continuità (“giunto freddo”) che costituisce una via preferenziale di fuga per l’acqua. Nella pratica il problema si risolve fissando, mediante chiodi, vitioppure con un adesivo, sull’estradosso della superficie della fondazione, un profilo di materiale espansivo. Il profilo (individuato anche con il termine commerciale “water-stop”) ha capacità di espandersi in presenza di acqua. Pertanto, a seguito del contatto con l’acqua del calcestruzzo per la realizzazione del muro questo potenziale aumento di volume del profilo contrastato dal peso proprio del conglomerato garantisce una perfetta aderenza tra le due strutture (quella di fondazione e il muro) e, quindi, costituisce una barriera fisica al passaggio dell’acqua in corrispondenza della ripresa di getto.



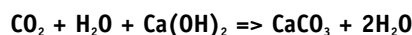
Gruppo Cementirosi S.p.A.

28

## LE STRUTTURE AEREE (FUORI TERRA) IN CLIMA TEMPERATO: CORROSIONE DEI FERRI INDOTTA ALL'ANIDRIDE CARBONICA

L'aria è costituita prevalentemente da ossigeno ed anidride carbonica. La concentrazione media di CO<sub>2</sub> è compresa tra 350 e 380 ppm.

L'interazione più importante della CO<sub>2</sub> con i costituenti della pasta di cemento è quella che coinvolge l'idrossido di calcio proveniente dall'idratazione dei silicati del clinker di cemento Portland:



La reazione detta di **carbonatazione o di neutralizzazione** (in quanto neutralizza l'effetto basico dell'idrossido di calcio) ha come conseguenza da una parte un miglioramento delle prestazioni meccaniche e una diminuzione della permeabilità del calcestruzzo e, dall'altra, un aumento del ritiro della struttura. Tuttavia, il fenomeno più interessante, dal punto di vista della durabilità, connesso con l'ingresso della CO<sub>2</sub> nel calcestruzzo, è legato alla diminuzione del pH della soluzione acquosa presente nei pori capillari della matrice cementizia. In assenza di CO<sub>2</sub>, la fase acquosa nei pori capillari è assimilabile ad una soluzione satura di calce con pH compresi tra 12.7 e 13.5 circa. A seguito della diffusione della CO<sub>2</sub> nella matrice cementizia, e della conseguente neutralizzazione della calce, il pH della fase acquosa si abbassa inizialmente al di sotto di 11.5 e, successivamente, può raggiungere valori intorno a 8.3.



Canale Enel - Lazise

La conseguenza pratica nelle strutture reali di questo abbassamento del pH consiste nel fatto che esso crea le premesse per la corrosione delle barre di armatura purché in prossimità dell'interfaccia acciaio-calcestruzzo ci sia sufficiente ossigeno ed acqua per alimentare il processo.

In assenza di macrodifetti e in assenza di CO<sub>2</sub> l'acciaio d'armatura nelle strutture aeree è caratterizzato da **condizioni di passività** contraddistinte da velocità di corrosione (< 0.1 μm/anno) che dal punto di vista ingegneristico possono ritenersi praticamente nulle. In queste condizioni di passività l'acciaio è ricoperto da un film di ossido protettivo di spessore nanometrico (< 2nm) che si forma rapidamente durante le fasi iniziali di idratazione del cemento. La stabilità del film è temporanea e può essere compromessa nelle strutture aeree proprio dalla riduzione dell'alcalinità della matrice cementizia determinata dall'ingresso dell'anidride carbonica la cui velocità di penetrazione diminuisce all'aumentare della resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo, grazie alla riduzione del volume e della dimensione dei pori capillari conseguente alla diminuzione del rapporto acqua/cemento. A parità di resistenza meccanica a compressione il processo di carbonatazione procede con maggiore velocità nelle strutture esposte ad umidità relativa moderata (come avviene negli ambienti interni) e più lentamente nelle strutture all'esterno direttamente esposte all'azione dell'acqua piovana per l'arresto momentaneo che il processo di diffusione della CO<sub>2</sub> subisce durante i periodi di pioggia quando i pori capillari della matrice cementizia si saturano di acqua.

La velocità di avanzamento del fronte di carbonatazione, inoltre, è fortemente dipendente nelle strutture reali anche dal processo di maturazione a cui le stesse sono sottoposte subito dopo il getto del conglomerato. La stagionatura umida, infatti, garantendo un maggior grado di idratazione delle strutture proprio nelle zone "cortecciali" direttamente interessate dal processo di diffusione ed una conseguente riduzione della porosità, consente di diminuire a parità di tutte le altre condizioni la velocità di diffusione della CO<sub>2</sub> rispetto a quella di un ele-



Gruppo Cementirosi S.p.A.

mento in calcestruzzo che viene invece lasciato all'aria senza alcuna protezione umida.

È evidente l'importanza pratica di quanto sopraesposto. Allo scopo, nell'ipotesi di realizzare, ad esempio, una pensilina in calcestruzzo il fronte di carbonatazione dopo 30 anni di esposizione varia grandemente in funzione sia della qualità ( $R_{ck}$ ) del conglomerato che del tempo di maturazione umida della struttura.

Come si può notare, si può conseguire una decisiva riduzione del fronte di avanzamento della  $CO_2$  prolungando opportunamente la durata della maturazione umida delle strutture.

*Spessore di calcestruzzo carbonatato in una struttura esposta all'esterno non protetta dalla pioggia per 30 anni in funzione alla  $R_{ck}$  e della durata della maturazione umida (1,7 o 28 giorni).*

$R_{ck}$	1 giorno x (mm)	1 giorno $K_{CO_2}$ (mm/anno <sup>1/2</sup> )	7 giorni x (mm)	7 giorni $K_{CO_2}$ (mm/anno <sup>1/2</sup> )	28 giorni x (mm)	28 giorni $K_{CO_2}$ (mm/anno <sup>1/2</sup> )
20	33.6	6.14	19.8	3.61	14.8	2.70
30	20.3	3.71	12.7	2.32	10.2	1.86
40	7.9	1.44	5.6	1.03	4.8	0.88

Quando il fronte di carbonatazione raggiunge le armature il film di passività diventa instabile e può essere parzialmente distrutto; in questa situazione ed in presenza di acqua ed ossigeno il ferro d'armatura può corrodersi con velocità ingegneristicamente significative e tali da determinare una drastica riduzione della vita di servizio delle strutture.

La **corrosione è un processo di tipo elettrochimico** che necessita perché si manifesti che esistano le seguenti condizioni:

**A) presenza di una zona anodica** ove avviene il processo di ossidazione del metallo ( $Fe = Fe^{2+} + 2e^-$ ) con conseguente produzione di elettroni e di acidità ( $Fe^{2+} + 2H_2O = Fe(OH)_2 + 2H^+$ );

**B) presenza di una zona catodica** dove in presenza di acqua si ha il processo di riduzione dell'ossigeno che consuma gli elettroni messi a disposizione nella zona anodica dal processo di ossidazione del metallo ( $O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$ );

**C e D)** perché i processi anodici e catodici possano manifestarsi è necessario che ci sia una **circolazione della corrente tra il sito anodico e quello catodico**. Questa circolazione di corrente avviene sia attraverso la barra di armatura (C), ove gli elettroni prodotti dalla reazione anodica vengono resi disponibili nella zona catodica, che attraverso il calcestruzzo (D) ove la circolazione di corrente per la chiusura del circuito è affidata prevalentemente agli ioni disciolti nella fase acquosa dei pori capillari.

In una struttura aerea in assenza di  $CO_2$  il processo è controllato dalla passività delle armature cui corrisponde una velocità di corrosione di qualche decimo di micron all'anno (si parla di **controllo cinetico di passività**). Allo stesso modo, la velocità di corrosione risulta non significativa in una struttura idraulica permanentemente immersa o interrata in quanto, a causa dell'elevato grado di saturazione dei pori capillari, il processo di diffusione della  $CO_2$  e dell'ossigeno vengono fortemente rallentati. In un calcestruzzo asciutto non esposto alla pioggia o ad atmosfere sature di umidità la resistività elettrica può risultare maggiore di 60  $\Omega m$  e, conseguentemente, ridurre drasticamente la circolazione di corrente. Il processo di corrosione in queste situazioni è a **controllo di tipo ohmico** e la densità di corrente di corrosione, sebbene superiore a quella che individua le condizioni di passività, è all'incirca di 1 mA/m<sup>2</sup> e, quindi, ingegneristicamente non significativa.

Perché il processo di corrosione diventi apprezzabile, quindi, è necessario che il film di passività diventi instabile o venga distrutto dall'abbassamento di alcalinità prodotto dalla



Gruppo Cementirosi S.p.A.

carbonatazione, in modo che si possa produrre un processo anodico di dissoluzione del metallo con apprezzabile velocità, ma nel contempo debbono sussistere condizioni che favoriscono l'apporto di ossigeno nelle regioni catodiche e l'intero processo di corrosione venga favorito dalla circolazione di corrente dai siti catodici a quelli anodici da un calcestruzzo che, grazie all'elevato grado di saturazione, sia caratterizzato da basse resistività elettriche. Nelle strutture reali queste condizioni sussistono soltanto in quegli elementi strutturali direttamente esposti all'azione dell'acqua piovana o interessati dal ruscellamento dell'acqua per errori nel suo smaltimento (dove quindi la resistività elettrica del calcestruzzo è bassa) e che sono realizzati con calcestruzzi scadenti, di elevata porosità o che presentano difetti per errori di compattazione o fessure e, quindi, laddove il fronte di avanzamento della carbonatazione può raggiungere le armature.

### **Prescrizioni di capitolato per opere durevoli esposte al rischio di corrosione promossa dalla CO<sub>2</sub>.**

Per prevenire la corrosione dei ferri promossa dall'anidride carbonica occorre adottare provvedimenti commisurati al grado di aggressione dell'ambiente in cui la struttura è situata. Relativamente a questo aspetto la norma EN 206-1 suddivide gli ambienti in cui esiste il rischio di corrosione in quattro sub-classi.

*Le sottoclassi di esposizione per le strutture esposte al rischio di corrosione promossa dalla CO<sub>2</sub>.*

CLASSE DI ESPOSIZIONE	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA E DELL'AMBIENTE
XC1	Strutture in ambienti interni asciutti con U.R.<70%
XC2	Strutture idrauliche o di fondazione permanentemente bagnate
XC3	Strutture esterne protette dalla pioggia
XC4	Strutture esterne esposte alla pioggia e parti di strutture idrauliche che alternano periodi di immersione e di emersione

Per ognuna delle quattro sub-classi potranno essere adottati ai fini della prevenzione del degrado i requisiti compositivi (rapporto a/c massimo e dosaggio di cemento minimo), prestazionali (resistenza caratteristica minima) e di progetto (spessore nominale del copriferro) riportati nella Tabella che segue in accordo alle norme nazionali ed europee vigenti.

*Requisiti compositivi, prestazionali e di progetto per le classi di esposizione XC in accordo alla norma UNI 11104 e EN-1992 (tra parentesi quadrata quelli in accordo alla norma europea EN 206-1).*

CLASSE DI ESPOSIZIONE	RAPPORTO a/c max	CLASSE DI RESISTENZA MIN	DOSAGGIO DI CEMENTO MIN (Kg/m <sup>3</sup> )	COPRIFERRO NOMINALE* (mm)
XC1	0.60 [0.65]	C25/30 [C20/25]	300 [260]	25/35
XC2	0.60 [0.60]	C25/30 [C25/30]	300 [280]	35/45
XC3	0.55 [0.55]	C28/35 [C30/37]	320 [280]	35/45
XC4	0.50 [0.50]	C32/40 [C30/37]	340 [300]	40/50

\* Per elementi strutturali in classe S4 e tolleranza pari a 10 mm.



## LE STRUTTURE AEREE FUORI TERRA IN CLIMI FREDDI: DEGRADO PROMOSSO DAI CICLI DI GELO-DISGELO

**I**l degrado delle strutture in servizio può essere esaltato dalle oscillazione cicliche della temperatura intorno a 0°C<sup>40</sup> a seguito dell'incremento della pressione dell'acqua presente nei pori capillari del calcestruzzo capace di provocare tensioni distruttive sia nei confronti della matrice cementizia che degli aggregati. Se nei pori capillari il volume di acqua liquida occupa quasi completamente quello del poro, per effetto della formazione dei primi germi di ghiaccio l'acqua non congelata viene espulsa generando la nascita di una **pressione idraulica** determinata dalla resistenza opposta al flusso di acqua.

La pressione ( $H$ ) generata da questi fenomeni può essere definita mediante l'equazione di Darcy:

$$H = dq/dt \cdot l/A \cdot 1/K \cdot l$$

dove:  $dq/dt$  è il *flusso di acqua*, cioè il volume di acqua liquida espulso dal poro nell'unità di tempo. Maggiore è la velocità di abbassamento della temperatura, maggiore sarà il volume di ghiaccio formatosi nell'unità di tempo e, quindi, più elevato risulterà il flusso di acqua espulso dal poro. Il grado di saturazione influenza il valore della pressione dell'acqua non congelata. Se il grado di saturazione<sup>41</sup> fosse inferiore al 91.7%, infatti, anche nella ipotesi di completo congelamento dell'acqua liquida presente nel poro il volume di ghiaccio formatosi non sarebbe sufficiente a riempirlo completamente e, conseguentemente, non ci sarebbe acqua in eccesso che viene espulsa;

$A$  è la sezione del poro attraverso il quale l'acqua viene espulsa e  $K$  il coefficiente di permeabilità della matrice cementizia. La pressione idraulica risulterà, pertanto, tanto più elevata quanto minore è la dimensione dei pori e quanto minore il grado di interconnessione tra gli stessi (cioè quanto minore è il coefficiente di permeabilità);

$l$  è la distanza che l'acqua liquida in pressione deve percorrere per raggiungere un poro che possa ospitarla.

Il grado di saturazione può essere ridotto attraverso l'adozione di calcestruzzi caratterizzati da una bassa porosità. Tuttavia, questo provvedimento non risulta sufficiente ad impedire che la matrice cementizia si degradi per effetto dei cicli di gelo-disgelo. Infatti, se da una parte l'impiego di un calcestruzzo con basso rapporto  $a/c$  attenua la pressione indotta dalla formazione di ghiaccio per effetto del minor grado di saturazione dall'altra la diminuzione del coefficiente di permeabilità (diminuisce  $K$ ), della dimensione media dei pori capillari (diminuisce  $A$ ) e dell'interconnessione tra gli stessi (aumenta  $l$ ) determina un aumento della pressione capillare che nei casi reali supera la resistenza del calcestruzzo degradandolo. In definitiva, **nelle strutture esposte a climi rigidi la diminuzione del rapporto  $a/c$  non rappresenta una soluzione efficace alla risoluzione dei problemi** connessi con l'incremento di pressione dell'acqua liquida presente nelle porosità del conglomerato.

La soluzione al problema della gelività del calcestruzzo è rappresentata dall'impiego nel confezionamento del conglomerato di additivi aeranti capaci, attraverso una stabilizzazione dell'aria presente nell'impasto, di garantire nella matrice cementizia la formazione di un sistema di microbolle omogeneamente disperso in cui la pressione dell'acqua liquida generata dalla formazione del ghiaccio nei pori capillari possa scaricarsi prima di attingere valori superiori alla resistenza del materiale. L'aria stabilizzata in un calcestruzzo in presenza di un additivo aerante viene individuata dal termine "inglobata" (o "aggiunta" secondo la UNI-EN 206/1 2001) per distinguerla da quella "intrappolata" di un conglomerato confezionato in assenza del tensioattivo.

Modulando opportunamente il dosaggio di additivo aerante si può conseguire un valore della distanza tra le bolle (*spacing*) che consenta di limitare la pressione dell'acqua impedendo che la stessa superi la resistenza della matrice cementizia. In sostanza, quindi, la resistenza al gelo del calcestruzzo conseguente all'aggiunta dell'additivo aerante deriva dalla riduzione del cammino ( $l$  nell'equazione) che l'acqua non congelata deve percorrere per trovare una microbolla vuota in cui poter scaricare la sua pressione. Le prove sperimentali indicano che questo risultato si consegue quando la distanza tra le bolle risulta inferiore a 200 - 250  $\mu\text{m}$ .

La misura dello *spacing* tra le microbolle, peraltro abbastanza complicata, si può effettuare solo sul calcestruzzo indurito. Pertanto, eventuali errori in difetto nel dosaggio dell'additivo aerante verrebbero messi in evidenza quando ormai la struttura è stata già realizzata costringendo ad intervenire sul manufatto con complicati, se non impossibili, interventi di impermeabilizzazione tesi alla riduzione del grado di saturazione che compensino il deficit di aria inglobata ed il conseguente elevato valore della distanza tra le microbolle. **Per questo motivo nelle prescrizioni di capitolato relative a calcestruzzi resistenti al gelo si preferisce indicare anche il volume di aria inglobata.** Lo *spacing*, infatti, è direttamente correlato con il volume totale di aria nell'impasto. **Il valore prescritto dell'aria inglobata, inoltre, è di facile determinazione sul calcestruzzo fresco mediante il porosimetro.** Conseguentemente, se al momento della consegna del calcestruzzo in cantiere questo dovesse evidenziare un volume di aria inferiore a quello prescritto sarà possibile rigettare l'impasto evitando di realizzare la struttura con un conglomerato potenzialmente gelivo. Nella Tabella che segue vengono riportati i valori consigliati per l'aria inglobata in funzione del diametro massimo dell'aggregato.



Impianto di betonaggio - sede di Piacenza

Valori consigliati del volume di aria inglobata (in percentuale sul volume del calcestruzzo) in funzione del diametro massimo dell'aggregato, valori dell'aria intrappolata per calcestruzzi completamente compattati ed extra-aria.

$D_{\text{max}}$ (mm)	8	12	16	20	32
Intrappolata: $a'$ (%)	3.5 +/-1	2.5 +/-1	2.0 +/-1	1.5 +/-0.5	1.0 +/-0.5
Inglobata: $a'_{\text{in}}$ (%)	7.5 +/-1	6.5 +/-1	6.0 +/-1	5.5 +/-0.5	5.0 +/-0.5
Extra-aria: ( $a' - a'_{\text{in}}$ ) (%)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Dall'esame dei dati riportati in Tabella emerge come l'impiego degli additivi aeranti per rendere i calcestruzzi resistenti al gelo determini un volume di *extra-aria* mediamente pari al 4% rispetto al volume di aria naturalmente intrappolata in un impasto perfettamente compattato e conseguentemente una penalizzazione della resistenza di circa il 15-20% di cui si deve tener conto nella progettazione dell'impasto ed, in particolare, nella scelta del rapporto *a/c*.

### **Prescrizioni di capitolato per strutture fuori terra esposte al rischio di degrado per cicli di gelo-disgelo.**

In base alle considerazioni esposte si possono a questo punto esplicitare le prescrizioni di capitolato per i calcestruzzi destinati a strutture esposte ai cicli di gelo disgelo. In linea di massima nel nostro Paese queste prescrizioni debbono essere attuate per tutte le strutture aeree<sup>42</sup> che vengono realizzate lungo la fascia alpina anche ad altitudini relativamente basse (600-800 m s.l.m.) e quelle situate lungo la dorsale appenninica a quote superiori ai 1000 m s.l.m.

*Prescrizioni di capitolato in accordo alla UNI 11104 per strutture aeree esposte ai cicli di gelo-disgelo in assenza di sali disgelanti (tra parentesi quadrata i valori suggeriti dalla norma europea. Per l'aria si riportano anche i valori suggeriti tra parentesi graffe).*

PRESCRIZIONE DI CAPITOLATO	XF1	XF3
$(a/c)_{\max}$	0.50 [0.55]	0.50 [0.50]
Classe di resistenza minima	C32/40 [C30/37]	C25/30 [C30/37]
Aria inglobata	-	3%; {5-7.5%} ; [4%]
Spacing	-	< 200 - 250 $\mu\text{m}$
Aggregati (UNI 12620)	F <sub>4</sub> MS <sub>35</sub>	F <sub>2</sub> MS <sub>25</sub>
Dosaggio minimo di cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	320 [300]	340 [320]

### **Relativamente alle suddette prescrizioni si possono fare le seguenti ulteriori considerazioni:**

- A)** il controllo dell'aria inglobata sul calcestruzzo fresco dovrà essere esercitato con la stessa frequenza dei controlli di accettazione per la  $R_{ck}$  mediante il porosimetro su un campione di calcestruzzo compattato con le stesse modalità che verranno impiegate nel costipamento dei getti reali;
- B)** è opportuno specificare nelle prescrizioni di capitolato anche il valore massimo dello *spacing* tra le microbolle da determinare eventualmente su carote di calcestruzzo indurito prelevate direttamente dalle strutture in opera;
- C)** richiedere al produttore del conglomerato una specifica documentazione che attesti la resistenza al gelo dell'aggregato in accordo alla UNI-EN 12620 valutata mediante la metodologia di prova UNI 1367 parte 1 o 2;

Le **prescrizioni** sopra riportate costituiscono la condizione necessaria per realizzare opere durevoli in climi rigidi, ma possono risultare non sufficienti se non **accompagnate da una corretta progettazione dei particolari costruttivi**. Nelle strutture orizzontali (terrazze, coperture piane, pensiline, etc.) occorre, ad esempio, garantire le pendenze necessarie per un corretto deflusso delle acque. Le stesse, inoltre, devono essere correttamente raccolte e smaltite evitando che vengano in contatto con le superfici verticali degli elementi in calcestruzzo sottostanti. Ovviamente, ove non è possibile evitare il contatto con l'acqua al fine di ridurre il grado di saturazione si potrà far ricorso alla realizzazione di protezioni impermeabili impiegando vernici acriliche in dispersione acquosa, guaine e vernici bituminose oppure malte cementizie modificate con polimeri acrilici.

Nelle pavimentazioni poggianti su terreno, inoltre, è indispensabile, oltre a garantire una adeguata pendenza per un corretto smaltimento delle acque, evitare la risalita capillare dal terreno mediante l'utilizzo di opportune barriere vapore<sup>43</sup> o vespai drenanti onde impedire che il calcestruzzo subisca per l'elevato grado di saturazione presenti degni distruttivi e precoci nelle zone corticali della lastra.



---

<sup>40)</sup> L'abbassamento della temperatura al di sotto di 0°C rappresenta un serio inconveniente, non solo ad opera ultimata quando la struttura è già in servizio, ma anche durante l'esecuzione dei getti. Infatti, se nel momento in cui la temperatura scende al di sotto di 0°C il calcestruzzo non ha sufficiente resistenza può completamente disintegrarsi per effetto del congelamento dell'acqua contenuta al suo interno. Il rischio che questa situazione si verifichi nella pratica di cantiere è particolarmente alto perché lo sviluppo delle resistenze meccaniche del calcestruzzo risulta fortemente rallentato dalla bassa temperatura. Il problema viene superato con specifici accorgimenti che consistono nel riscaldamento degli ingredienti, e dell'acqua in particolare, nell'adozione di cementi a rapido indurimento (di classe 42.5R), di acceleranti dell'indurimento e nella protezione delle strutture con fogli di materiale coibente che, evitando la dissipazione del calore prodotto dall'idratazione del cemento, consentono al getto di raggiungere in breve tempo prestazioni meccaniche idonee a resistere alla formazione del ghiaccio anche se le temperature ambientali sono particolarmente basse.

<sup>41)</sup> Tenendo presente che la formazione del ghiaccio avviene con un aumento di volume rispetto a quello dell'acqua liquida pari a circa il 9%, il volume occupato dall'acqua liquida all'interno del poro rispetto al volume totale dello stesso (x) affinché a seguito del congelamento il ghiaccio riempia totalmente lo spazio disponibile risulta pari al 91.7%:

$$x + 0.09x = 100 ; x = 100/1.09 = 91.7\%$$

<sup>42)</sup> Per le strutture interrato il problema dell'abbassamento della temperatura ambientale al di sotto di 0°C è poco significativo in quanto pur potendo gelare il terreno possiede sufficiente inerzia termica e, pertanto, la velocità di raffreddamento/riscaldamento risulta così esigua da non determinare la nascita di pressioni idrauliche tali da compromettere l'integrità del calcestruzzo. Per ragioni analoghe il gelo-disgelo non costituisce motivo di preoccupazione nelle strutture in calcestruzzo (idrauliche) che si trovano permanentemente immerse.

<sup>43)</sup> Barriere vapore: fogli di polietilene stesi sulla "massicciata" costituita dal terreno naturale e da eventuali strati (realizzati per migliorarne le caratteristiche geomeccaniche) di materiale lapideo sciolto (misto granulare) o legato con cemento (misto cementato) prima del getto della pavimentazione in calcestruzzo. Vespai drenante: strato spesso 30-40 cm costituito da ghiaia o pietrisco monogranulare di grossa pezzatura (40-60 mm di diametro) privo di frazioni limo-argillose realizzato sulla massicciata mediante stesura e successiva compattazione a rullo del materiale lapideo.



## LE STRUTTURE SOTTOPOSTE A TRATTAMENTI CON SALI DISGELANTI

I sali disgelanti più comunemente impiegati per la rimozione del ghiaccio o per prevenirne la formazione nel settore stradale ed autostradale, e nelle pavimentazioni esterne sono costituiti generalmente da cloruro di calcio oppure da miscele di questo sale con cloruro di sodio eventualmente mescolati con pietrisco di frantumazione per aumentare l'aderenza dei pneumatici al fondo stradale.

Il degrado in climi rigidi è ulteriormente esaltato in presenza di sali disgelanti e si esplica a seguito di diversi processi (chimici, fisici ed elettrochimici) che si manifestano simultaneamente nelle strutture reali.

*Meccanismi di degrado connessi con l'utilizzo dei sali disgelanti nelle strutture in calcestruzzo armato.*

TIPO DI SALE DISGELANTE	AZIONE DEGRADANTE DI TIPO:		
	Chimico	Fisico	Elettrochimico
CaCl <sub>2</sub>	Si	Si	Si
NaCl	No*	Si	Si

\* In presenza di aggregati alcali-reattivi il cloruro di sodio utilizzato come sale disgelante può contribuire al processo di degrado per reazione alcali-aggregato.

Il meccanismo fisico di degrado è di gran lunga prevalente nelle strutture orizzontali in conglomerato cementizio che vengono a diretto contatto con i sali disgelanti come accade nelle strade in calcestruzzo (prive del manto in conglomerato bituminoso), nelle pavimentazioni esterne, nelle rampe esterne di accesso a garage e parcheggi. Negli elementi strutturali sottoposti agli schizzi contenenti sali disgelanti prodotti dalle ruote degli autoveicoli (cunette in calcestruzzo, cordoli, zone basse di muri di sostegno vicini al ciglio della strada, barriere New Jersey, etc.) ed in quelli che vengono in contatto con soluzioni liquide di sali disgelanti a base di cloruro, il meccanismo di degrado include sia l'azione fisica che il processo elettrochimico di corrosione delle barre di armatura. Questi ultimi meccanismi, inoltre, diventano predominanti nelle zone sottostanti gli impalcati da ponte in corrispondenza di quelle porzioni degli elementi strutturali ove per difetti nella raccolta delle acque provenienti dall'estradosso della struttura si ha il ristagno delle soluzioni contenenti cloruro. E' il caso, ad esempio, delle zone verticali della soletta dell'impalcato, delle travi di riva più sporgenti, delle zone dei pulvini dove sono localizzati gli apparecchi di appoggio delle travi (baggioli) ed in generale delle porzioni degli elementi strutturali sottostanti i giunti dell'impalcato.

### Prescrizioni di capitolato per le strutture esposte ai sali disgelanti

A causa del sommarsi di diversi effetti il degrado in presenza di sali disgelanti è molto più marcato di quello che si registra per il solo effetto dell'esposizione ai cicli di gelo-disgelo, conseguentemente anche i provvedimenti da adottare (Tabella seguente) relativamente alla composizione del calcestruzzo risultano molto più restrittivi.



Gruppo Cementirossi S.p.A.

*Prescrizioni di capitolato per strutture aeree esposte ai cicli di gelo-disgelo in presenza di sali disgelanti (tra parentesi quadrata i valori suggeriti dalla norma europea. Per l'aria si riportano anche i valori suggeriti tra parentesi graffe).*

PRESCRIZIONE DI CAPITOLATO	XF2	XF4
$(a/c)_{\max}$	0.50 [0.55]	0.45 [0.45]
Classe di resistenza minima	C25/30	C28/35 [C30/37]
Aria inglobata	3%; {5-7.5%} ; [4%]	3%; {5-7.5%} ; [4%]
Spacing	< 200 $\mu\text{m}$	< 200 $\mu\text{m}$
Aggregati (UNI 12620)	F <sub>2</sub> /MS <sub>25</sub>	F <sub>1</sub> /MS <sub>18</sub>
Dosaggio di cemento minimo (Kg/m <sup>3</sup> )	340 [300]	360 [340]

**Nelle strutture orizzontali inoltre congiuntamente alle prescrizioni riportate in Tabella può risultare importante adottare le seguenti precauzioni:**

- evitare di procedere ad una fratazzatura spinta di tipo meccanico onde ridurre il volume di aria che viene espulso durante questa operazione.
- inglobare nell'impasto un volume di aria superiore di 1-2%, rispetto a quello previsto per strutture a sviluppo verticale da gettare all'interno di casseri, per tener conto che parte di questa viene espulsa durante la fratazzatura;
- garantire una corretta protezione umida delle superfici per almeno 7 giorni;
- realizzare le strutture con almeno due mesi di anticipo rispetto al momento in cui esse verranno sottoposte al primo trattamento con i sali disgelanti;
- garantire un corretto smaltimento delle acque realizzando pendenze tese a garantire un rapido deflusso delle stesse;
- nei pavimenti poggianti su terreno predisporre sulla massicciata prima del getto del conglomerato dei fogli di politene di sufficiente grammatura per evitare risalita capillare di acqua dal terreno.

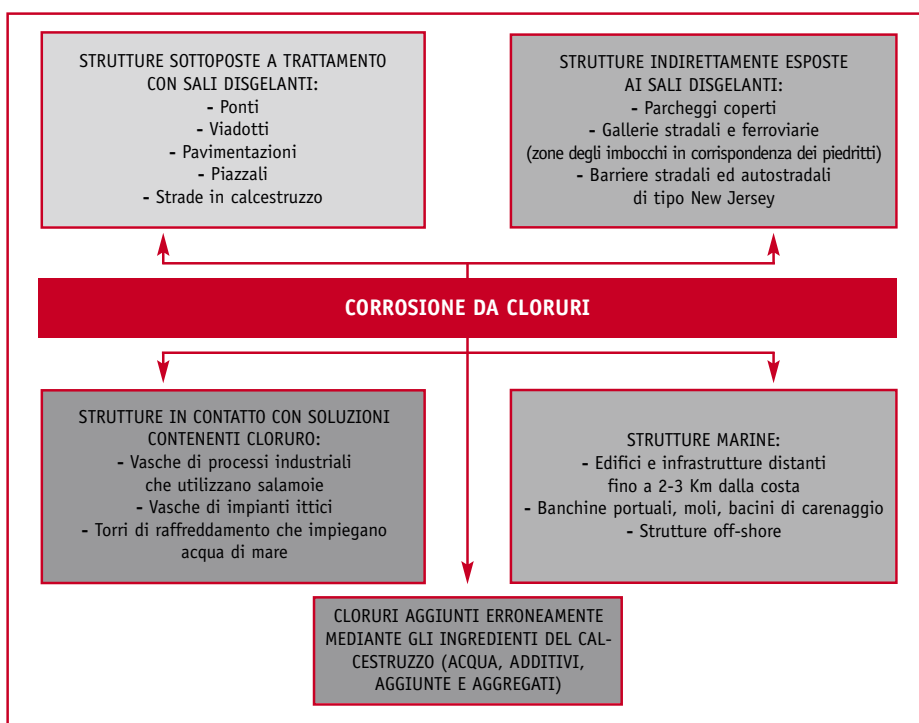
31

## CORROSIONE DELLE ARMATURE NELLE STRUTTURE ESPOSTE ALL'AZIONE DEI CLORURI

Nelle strutture aeree esposte ai sali disgelanti il degrado viene esaltato dalla corrosione promossa dal cloruro nei confronti delle barre di armatura che possono determinare un degrado precoce ed intenso delle strutture riducendone drasticamente la vita di servizio. Oltre alle strutture orizzontali e verticali direttamente interessate dai trattamenti con sali disgelanti anche gli elementi in calcestruzzo armato e precompresso dei parcheggi per autoveicoli in climi freddi sono interessati da questa problematica. Infatti, i sali vengono trascinati a contatto con le strutture in calcestruzzo dai veicoli che durante la fase di sosta lasciano percolare sulle solette orizzontali le soluzioni saline raccolte durante la marcia sulle strade interessate dal trattamento con le soluzioni disgelanti. Allo stesso modo, i rivestimenti in calcestruzzo delle gallerie, sia stradali che ferroviarie, soprattutto nelle zone degli imbocchi ed in corrispondenza dei piedritti, possono essere interessati dagli schizzi sollevati dalle ruote contenenti i sali raccolte durante la marcia dei veicoli all'esterno dei tunnel. Sono interessate dalla corrosione anche le strutture idrauliche di contenimento di acque contenenti cloruro - come avviene, ad esempio, negli impianti di raffreddamento che utilizzano acqua di mare - ed in generale tutte le strutture marine, sia quelle aeree che si trovano ad una distanza compresa tra 2 e 3 Km dalla costa raggiunte dal cloruro trasportato per effetto eolico, che quelle direttamente a contatto con l'acqua di mare, come avviene, ad esempio, per le banchine portuali, per i moli di attracco delle navi, per i bacini di carenaggio ed, infine, per le strutture off-shore per l'estrazione dei combustibili naturali. Infine, sono interessati dal processo di corrosione anche quegli elementi strutturali in cui il cloruro erroneamente è stato aggiunto attraverso gli ingredienti (l'acqua, gli aggregati e/o gli additivi) per il confezionamento del calcestruzzo.



Ponte sul fiume Po (Piacenza) - TAV



Gruppo Cementirossi S.p.A.



A4 Highway France

La stabilità del film di ossido protettivo presente sulla superficie delle armature responsabile di velocità di corrosione ingegneristicamente nulle può essere compromessa se in prossimità delle barre di acciaio si realizzano concentrazioni critiche di cloruro sufficienti ad innescare il processo di corrosione. In presenza di cloruri (e in assenza di carbonatazione) l'acciaio subisce una corrosione localizzata che si manifesta sotto forma di crateri (*pit*) di dimensioni comprese tra 0.1 e 2 mm a causa della formazione di una microcella di corrosione in cui le zone ove lo strato di ossido è stato rimosso funzionano da anodo e quelle circostanti (ancora passive) da catodo ove ha luogo la riduzione dell'ossigeno.

#### **Il contenuto limite di cloruri aggiunti tramite gli ingredienti: prescrizioni di capitolato**

Durante l'idratazione del cemento il  $C_3A$  reagisce con i cloruri se questi non eccedono lo 0.15% sulla massa del calcestruzzo (corrispondente all'incirca allo 0.3-0.4% sulla massa del cemento). Quando il cloruro è presente in concentrazioni maggiori, invece, si forma un composto che può decomporsi rilasciando cloruri liberi nella fase acquosa dei pori capillari disponibili per innescare il processo di corrosione. Al fine di evitare che ciò avvenga la norma europea EN 206-1 ammette che nel confezionamento del calcestruzzo destinato alla realizzazione di strutture ad armatura lenta un contenuto totale di cloruri<sup>44</sup> compreso tra 0.2 e 0.4 % rispetto alla massa del cemento e di eventuali aggiunte minerali di tipo II quali ceneri volanti e fumi di silice.

*Contenuto massimo di cloruri nel calcestruzzo aggiunti tramite gli ingredienti.*

CALCESTRUZZO DESTINATO A:	CLASSE DI CONTENUTO IN CLORURI	PERCENTUALE MAX DI CLORURI RISPETTO ALLA MASSA DEL CEMENTO E DELLE AGGIUNTE DI TIPO II
Strutture non armate	Cl 1.00	1%
Strutture in c.a.	Cl 0.40	0.40%
Strutture in c.a.	Cl 0.20	0.20%
Strutture in c.a.p.	Cl 0.20	0.20%
Strutture in c.a.p.	Cl 0.10	0.10%

Come si può notare la percentuale massima di cloruri nelle strutture in calcestruzzo armato precompresso è pari alla metà di quella ammessa per le strutture ad armatura lenta in quanto la corrosione per questa tipologia di armature viene esaltata dall'elevato tasso di sforzo a cui è sottoposto l'acciaio.

### **Strutture esposte in servizio ad ambienti contenenti cloruri**

La passività dell'acciaio nel calcestruzzo può essere preservata prescrivendo che nel confezionamento del calcestruzzo vengano impiegati ingredienti il cui contenuto totale di cloruro non superi i valori massimi stabiliti dalla norma UNI-EN 206. Tuttavia, anche per conglomerati correttamente confezionati, la corrosione delle armature può essere promossa dai cloruri presenti nell'ambiente che circonda la struttura in calcestruzzo armato. Il calcestruzzo, infatti, in contatto con soluzioni contenenti cloruro nel tempo tende ad arricchirsi in questi ioni.

La penetrazione del cloruro nel calcestruzzo è rappresentato da un profilo di concentrazione decrescente dalla superficie a contatto con l'ambiente aggressivo verso l'interno della struttura. Dopo un certo tempo  $t$  e per una data distanza  $x$  dalla superficie la concentrazione del cloruro nel calcestruzzo risulterà tanto più elevata quanto maggiore è la concentrazione del cloruro della soluzione a contatto con la superficie del calcestruzzo. Inoltre, la concentrazione di cloruro risulterà tanto più elevata quanto maggiore è il coefficiente di diffusione apparente del conglomerato. Quest'ultimo risulta essere strettamente dipendente sia dai fattori che influenzano la porosità capillare della matrice cementizia e, quindi, dal rapporto  $a/c$  e dal grado di idratazione dell'impasto al momento dell'esposizione al cloruro, che dai fattori che influenzano la capacità dei prodotti di idratazione di legare il cloruro durante il processo di diffusione e, quindi, dalla natura del cemento e dell'eventuali aggiunte minerali introdotte nel confezionamento degli impasti.

### **Le prescrizioni di capitolato per strutture durevoli esposte al rischio di corrosione promossa dal cloruro**

Di seguito vengono riassunte le condizioni di maggior rischio per la corrosione promossa dai cloruri nelle strutture reali.

- A) Il rischio di corrosione risulta molto basso o praticamente assente nelle strutture permanentemente immerse in soluzioni contenenti cloruri** in quanto il processo elettrochimico è fortemente inibito dallo scarso apporto di ossigeno che perviene in prossimità delle armature a causa della completa saturazione dei pori capillari.
- B) Nelle strutture interrato la situazione dal punto di vista della corrosione da cloruri è molto simile a quella che si realizza nelle opere permanentemente immerse.**
- C) Nelle strutture che alternano periodi di asciutto/bagnato, ovvero di immersione/emersione in soluzioni che contengono cloruro il rischio di corrosione è molto alto in quanto durante le fasi di immersione il cloruro può penetrare raggiungendo le armature e nella fase di emersione l'ossigeno può pervenire in prossimità delle barre alimentando il fenomeno di corrosione per pitting grazie anche alla bassa resistività elettrica del conglomerato ricco di ioni  $Cl^-$ .**

Il rischio di corrosione viene tenuto in conto dalle norme nel definire le prescrizioni di capitolato per le strutture esposte all'azione aggressiva del cloruro. La norma europea e quella italiana forniscono prescrizioni distinte per le strutture esposte al cloruro non di origine marina e per le opere che vengono in contatto con l'acqua di mare.

Per le strutture a contatto con cloruro non proveniente dall'acqua di mare le norme EN 206-1 e UNI 11104 individuano tre livelli di aggressione attraverso tre distinte sub-classi di espo-



sizione ambientale per ognuna delle quali vengono definiti i requisiti compositivi, prestazionali e di progetto da rispettare.

*Prescrizioni di capitolato previste dalla UNI 11104 per strutture esposte al cloruro non di origine marina (tra parentesi quadrata i requisiti richiesti dalla norma europea EN 206).*

CLASSE DI ESPOSIZIONE	DESCRIZIONE	(a/c) <sup>max</sup>	CLASSE DI RESISTENZA MIN	DOSAGGIO DI CEMENTO MIN (Kg/m <sup>3</sup> )	COPRIFERRO NOMINALE* (mm)
<b>XD1</b>	Strutture esposte a spruzzi di acque contenenti cloruri	0.55 [0.55]	C28/35 [C30/37]	320 [300]	45/55
<b>XD2</b>	Strutture totalmente immerse in acque anche industriali contenenti cloruro	0.50 [0.55]	C32/40 [C30/37]	340 [300]	50/60
<b>XD3</b>	Strutture soggette ai sali disgelanti ed elementi esposti in parte ai cloruri ed in parte all'aria. Parcheggi, pavimentazioni e strade in calcestruzzo. Rivestimenti di gallerie agli imbocchi in zone con climi rigidi.	0.45 [0.45]	C35/45 [C35/45]	360 [320]	55/65

\* Per elementi strutturali in classe S4 a tolleranza 10 mm.

<sup>44</sup>) Il contenuto di cloruri nel calcestruzzo viene ottenuto sommando quello apportato da tutti gli ingredienti utilizzati per il confezionamento (acqua di impasto, cemento, aggregati, aggiunte e additivi). Sebbene vengano fissati dei limiti al contenuto di cloruri negli ingredienti (ad esempio di 500 mg/l e 1000 mg/l per per l'acqua di impasto destinata al confezionamento di calcestruzzi rispettivamente per strutture in c.a e c.a.p; 0.03% in massa è il limite fissato per il cloruro contenuto negli aggregati), tuttavia, essendo questi sali prontamente solubili, è importante rispettare il limite del contenuto totale nell'impasto piuttosto che quello relativo al singolo ingrediente.

## 32 LE STRUTTURE MARINE

La norma europea EN 206-1 e quella italiana UNI 11104 distinguono le strutture esposte all'aggressione del cloruro di origine marina da quelle a contatto con soluzioni di cloruri di origine industriale o derivanti dai trattamenti con sali disgelanti. Questa distinzione discende dal fatto che le opere marittime presentano delle peculiarità rispetto alle altre strutture: alla corrosione del cloruro, infatti, si sommano gli effetti meccanici derivanti dall'azione delle onde e delle maree, l'azione abrasiva ad opera dei solidi sospesi e quella chimica imputabile alle sostanze disciolte nell'acqua di mare. La Tabella che segue indica i provvedimenti da adottare per la prevenzione del degrado delle strutture situate in ambiente marino.

Prescrizioni di capitolato previste dalla UNI 11104 per strutture marine (tra parentesi quadrata i requisiti richiesti dalla norma europea EN 206).

CLASSE DI ESPOSIZIONE	DESCRIZIONE	(a/c) <sub>max</sub>	CLASSE DI RESISTENZA MIN	DOSAGGIO DI CEMENTO MIN (Kg/m <sup>3</sup> )	COPRIFERRO NOMINALE* (mm)
XS1	Strutture esposte alla salsedine marina ma non in contatto con l'acqua di mare	0.50 [0.50]	C32/40 [C30/37]	340 [300]	45/55
XS2	Strutture totalmente immerse	0.45 [0.45]	C35/45 [C35/45]	360 [320]	50/60
XS3	Strutture esposte agli spruzzi, alle maree e alle onde	0.45 [0.45]	C35/45 [C35/45]	360 [340]	55/65

\* Per elementi strutturali in classe S4 a tolleranza 10 mm.

Per le strutture aeree non a diretto contatto con l'acqua di mare che si trovano ad una distanza dalla costa fino a 2-3 Km, la norma prevede l'adozione di provvedimenti relativamente stringenti in quanto esposte al solo rischio di corrosione promosso dall'aerosol marino e dalla salsedine. Sono particolarmente interessati dalla corrosione gli elementi in calcestruzzo delle facciate quali fasce marcapiano, parapetti di balconi e terrazze, pilastri e travi esterni.

Molto più severa è l'azione aggressiva dell'acqua di mare nei confronti delle porzioni di struttura che si trovano nella zona degli spruzzi, delle onde e delle maree. Infatti, le opere marittime situate in queste zone vengono sottoposte all'azione simultanea di più fattori che possono concorrere ad un severissimo e rapido degrado delle strutture se non ben progettate e realizzate. Il meccanismo di degrado in queste aree può essere così riassunto:

- A)** durante i periodi di bagnatura i sali presenti nell'acqua di mare penetrano nel calcestruzzo per suzione capillare e successivamente per diffusione raggiungono le zone più interne fino ad interessare i ferri di armatura promuovendone la corrosione. Il processo di diffusione nel calcestruzzo è accelerato dal fatto che durante i periodi di asciugamento i sali presenti, per effetto dell'aumento di volume conseguente al fenomeno della cristallizzazione salina, possono generare sforzi di trazione superiori alla resistenza del conglomerato fessurandolo;
- B)** le fessure, inizialmente di modesta ampiezza possono allargarsi e propagarsi per effetto del moto ondoso;
- C)** il cloruro e l'ossigeno in queste condizioni pervengono con estrema facilità in prossimità delle armature promuovendone una intensa corrosione;
- D)** il degrado del calcestruzzo viene ulteriormente esaltato accentuando i fenomeni di espulsione di parti del copriferro dall'azione abrasiva prodotta dai solidi sospesi nell'acqua di mare.

# 33

## IL DEGRADO DI TIPO CHIMICO

**A**lcune sostanze presenti naturalmente o per effetto delle attività antropiche nei terreni e nelle acque possono determinare il degrado del calcestruzzo nelle strutture idrauliche ed in quelle parzialmente o completamente interrato a causa di reazioni chimiche che esse stabiliscono con i costituenti della matrice cementizia.

Tipo di sostanza aggressiva e manifestazione del degrado delle strutture in calcestruzzo.

SOSTANZA CHIMICA	EFFETTO SUL CALCESTRUZZO
<b>Basi deboli</b>	Nessun degrado
<b>Basi forti</b>	Nessun degrado
<b>Acidi deboli</b>	Dilavamento ed asportazione della pasta di cemento
<b>Acidi forti</b>	Forte dilavamento e disgregazione della matrice legante
<b>Acque dolci</b>	Dilavamento con asportazione superficiale della pasta di cemento
<b>Oli e grassi</b>	Disgregazione della matrice cementizia
<b>Solfati</b>	Espansioni, disallineamenti, fessurazioni, espulsioni di porzioni del copriferro e disgregazione della matrice cementizia

A causa della pratica impossibilità di elencare in un'unica lista tutte le possibili sostanze chimiche aggressive, la normativa europea EN 206 si limita a fornire le prescrizioni di capitolato per il confezionamento del calcestruzzo soltanto per quelle sostanze chimiche che con maggiore frequenza si incontrano nei terreni e nelle acque naturali.

Requisiti minimi per la classe di esposizione XA (tra parentesi quadrata i valori previsti dalla norma europea EN 206-1).

CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE*							MAX. a/c	VALORE MINIMO DI R <sub>ck</sub> <sup>#</sup>	DOS. MINIMO DI CEMENTO
	TERRENO		ACQUA							
	Acidità Bauman Gully**	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/Kg <sup>⊕</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	pH	CO <sub>2</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	Mg <sup>++</sup> (mg/l)			
<b>XA1</b>	>200	≥ 2000 ≤ 3000	≥ 200 ≤ 600	≤ 6.5 ≥ 5.5	≥ 15 ≤ 40	≥ 15 ≤ 30	≥ 300 ≤ 1000	0.55 [0.55]	C28/35 [C30/37]	320 [300]
<b>XA2</b>	-	> 3000 ≤ 12000	> 600 ≤ 3000	< 5.5 ≥ 4.5	> 40 ≤ 100	> 30 ≤ 60	> 1000 ≤ 3000	0.50 [0.50]	C32/40 [C30/37]	340 [320]
<b>XA3</b>	-	>12000 ≤ 24000	> 3000 ≤ 6000	< 4.5 ≥ 4.0	> 100	> 60 ≤ 100	> 3000	0.45 [0.45]	C35/45 [C35/45]	360 [360]

\* Quando due o più agenti conducono a classi di esposizione diverse, l'ambiente deve essere classificato nella classe con il grado di aggressione maggiore.

\*\* L'acidità del terreno viene valutata con il metodo DIN 4030-2.

⊕ Terreni rocciosi o argillosi con permeabilità inferiore a 10<sup>-5</sup> m/s debbono essere classificati nella classe di esposizione immediatamente inferiore.

# Valore in N/mm<sup>2</sup> misurato su provini cubici di cls confezionato con cementi di classe 32.5.

**L'ammonio** è generalmente presente in quelle acque che permeano terreni agricoli sottoposti a trattamenti di concimazione che utilizzano come fertilizzanti il cloruro ed il solfato di ammonio. A contatto con il calcestruzzo le acque contenenti ammonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) sono capaci di trasformare l'idrossido di calcio presente nella pasta di cemento in prodotti fortemente solubili.

**Il magnesio** presenta la peculiarità di poter reagire chimicamente sia con l'idrossido di calcio che con il C-S-H che per effetto di questa interazione perde gradualmente ioni calcio

i quali vengono sostituiti proprio dal magnesio generando un silicato idrato di magnesio responsabile della perdita parziale delle prestazioni meccaniche del conglomerato.

L'azione aggressiva nei confronti del calcestruzzo viene esaltata dalla presenza di **anidride carbonica libera** presente nelle acque in forma di acido carbonico ( $H_2CO_3$ ). Infatti, la  $CO_2$  libera (cioè non combinata in forma di carbonati o bicarbonato) reagisce inizialmente con l'idrossido di calcio della pasta di cemento formando carbonato di calcio e successivamente quest'ultimo può ulteriormente reagire con l'acido carbonico dando luogo alla formazione di bicarbonato di calcio che per la sua elevata solubilità viene asportato dalla pasta di cemento con conseguente degrado delle strutture. In effetti il processo è reversibile nel senso che esso può procedere sia verso la formazione del bicarbonato, che dando origine al calcare. Questo significa che esiste nelle acque una concentrazione di  $CO_2$  libera che è in grado di garantire l'equilibrio. L'**anidride carbonica aggressiva** rappresenta l'eccesso di anidride carbonica libera nelle acque oltre il valore che connota l'equilibrio.

A contatto con acque aggressive calcestruzzi di elevata porosità subiscono un deciso dilavamento per effetto dell'asportazione dell'idrossido di calcio che preferenzialmente si manifesta in zone della struttura che presentano difetti di posa in opera (vespai e nidi di ghiaia), di realizzazione (riprese di getto) o fessurazioni per mancata protezione umida dei getti.

Per prevenire il degrado promosso dall'anidride carbonica aggressiva la norma EN 206 impone l'adozione di provvedimenti sempre più stringenti all'aumentare del tenore di  $CO_2$  aggressiva a partire da valori superiori a 15 mg/l. Sebbene, non espressamente menzionato dalla norma una ulteriore protezione nei confronti dell'azione aggressiva è rappresentata dall'impiego di cementi pozzolanici e d'altoforno o dall'impiego di fumo di silice in combinazione con cementi Portland o Portland compositi.

La realizzazione di strutture durevoli all'azione delle acque contenenti  $CO_2$  aggressiva si persegue, infine, attraverso una accurata progettazione del calcestruzzo in termini di rapporto  $a/c$ , tipo di cemento e di aggiunte minerali cui occorre affiancare una corretta realizzazione dell'opera che abbia come obiettivo quello di eliminare i punti di debolezza delle strutture che possono contribuire all'esaltazione del dilavamento ad opera dell'anidride carbonica. In particolare, nelle strutture ad elevato sviluppo lineare quali, ad esempio, le sponde dei fiumi o i muri perimetrali dei canali occorrerà prevedere un adeguato numero di giunti per evitare la comparsa di lesioni passanti ad andamento prevalentemente verticale che finirebbero per esaltare l'effetto dilavante della  $CO_2$  aggressiva.

### **L'azione aggressiva del solfato**

Il degrado delle strutture in calcestruzzo può manifestarsi se esse sono in contatto con acque e terreni che contengono solfati. Questi possono essere di origine naturale, biologica oppure derivanti dall'inquinamento prodotto dalle attività antropiche sia di tipo domestico che industriale.

Il solfato è presente naturalmente nei terreni in quanto nel corso delle diverse ere geologiche l'evaporazione dell'acqua dai mari interni ha determinato l'accumulo di sedimenti, soprattutto gessosi, che affiorano attualmente sulla superficie terrestre. Il solfato, inoltre, può provenire dalla decomposizione biologica in condizioni aerobiche di sostanze organiche contenenti zolfo, come avviene ad esempio, per le piante o per i concimi. I terreni alluvionali e quelli coerenti possono contenere pirite (solfuro di ferro) che per effetto delle cicliche oscillazioni delle acque di falda possono determinare, grazie alla presenza dell'ossigeno, l'ossidazione con formazione di acido solforico. Le acque sotterranee e quelle che permeano terreni contenenti solfato possono arricchirsi di questi ioni. I solfati, infine, sono presenti nei liquami domestici e, pertanto, essi sono presenti sia negli impianti fognari che in quelli di depurazione ove le acque reflue confluiscono per essere sottoposte a trattamenti biofisici che hanno come obiettivo l'eliminazione dei composti di natura organica.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Il degrado del calcestruzzo promosso dall'attacco solfatico si manifesta in forma di espansione e disallineamenti delle strutture cui consegue la nascita di quadri fessurativi e di espulsioni di parti della struttura. In particolari condizioni di temperatura, inoltre, l'attacco può presentare i caratteri tipici dell'aggressione acida con una vera e propria distruzione della matrice legante che all'aspetto si presenta come una terra incoerente.

Sebbene le reazioni chimiche prodotte dall'aggressione del solfato siano strettamente dipendenti dal tipo di catione ad esso associato, il processo degradante può essere ricondotto ad una prima reazione che consiste nella trasformazione del CH della matrice cementizia in gesso. La seconda reazione può coinvolgere i residui di  $C_3A$  ancora anidro o più frequentemente i prodotti di idratazione dell'alluminato tricalcico (C-A-H). Il prodotto di questa seconda reazione chimica è, quindi, costituito dall'ettringite indipendentemente che il solfato interagisca con il  $C_3A$  anidro. **L'ettringite generata dalla reazione solfatica viene definita secondaria (o ritardata)** per distinguerla da quella *primaria* formatasi durante l'idratazione del cemento per reazione dell'alluminato tricalcico con l'acqua in presenza del gesso aggiunto per la regolazione della presa risulta particolarmente deleteria per le strutture in calcestruzzo in quanto l'espansione connessa con la sua formazione interessa solo gli strati più esterni della struttura in calcestruzzo a contatto con l'ambiente solfatici. L'aumento di volume di questi strati impedito dal calcestruzzo più interno, non interessato dall'aggressione, genera la nascita di stati tensionali superiori alla resistenza del materiale generando fessurazioni e distacchi di porzioni di conglomerato.

### Le prescrizioni di capitolato per prevenire l'attacco solfatico

Per prevenire il degrado del calcestruzzo promosso dall'attacco solfatico occorre:

- A)** valutare il grado di aggressione dell'ambiente solfatico a contatto con le strutture;
- B)** confezionare un calcestruzzo, mediante una accurata scelta delle materie prime ed un opportuno proporzionamento, capace di resistere chimicamente all'aggressione.

Per quanto riguarda la valutazione del grado di aggressione dell'ambiente la normativa europea EN 206-1 impone di determinare preventivamente la concentrazione di solfato nelle acque o nei terreni e confrontarle con quelle riportate nella Tabella seguente dove vengono anche indicate le corrispondenti prescrizioni di capitolato per il calcestruzzo chimicamente resistente alla aggressione.

*Classi di esposizione ambientale, concentrazione di solfato nelle acque e nei terreni e prescrizioni di capitolato per calcestruzzi durevoli all'aggressione solfatica (tra parentesi quadrata i valori suggeriti dalla EN 206). Il cemento deve essere SR (Resistente ai solfati) in accordo a quanto riportato nella norma UNI EN 197-1:2011.*

CLASSE DI ESPOSIZIONE	Concentrazione $SO_4^{2-}$ nelle acque (mg/l)	Concentrazione $SO_4^{2-}$ nel terreno (mg/Kg)	(a/c) <sub>max</sub>	C(x/y) <sub>min</sub>	Tipo di cemento (UNI EN 197-1)	c (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>XA1</b>	200 - 600	2000 - 3000	0.55	C28/35 [C30/37]	SR	320 [300]
<b>XA2</b>	600 - 3000	3000 - 12000	0.50	C32/40 [C30/37]	SR	340 [320]
<b>XA3</b>	3000 - 6000	12000 - 24000	0.45	C38/45 [C35/45]	SR	360 [360]

34

## LA POSA IN OPERA, LA COMPATTAZIONE E LA MATURAZIONE DEI GETTI

**P**er realizzare strutture ed infrastrutture durevoli, che posseggano i livelli di sicurezza prestabiliti occorre associare ad un'attenta progettazione strutturale delle sezioni e delle opere, la definizione degli spessori di copriferro e dei particolari costruttivi finalizzati all'ottenimento di un'eccellente funzionalità delle strutture, prescrivere correttamente il calcestruzzo in relazione alle esigenze strutturali e di durabilità della struttura cui è destinata. A questi provvedimenti occorrerà affiancare in fase di direzione lavori uno stringente controllo durante l'esecuzione dell'opera al fine di trasformare tutte le prescrizioni definite dal progettista "a tavolino" da potenziali a effettive. In particolare, perché il conglomerato cementizio in opera posseda realmente le caratteristiche elasto-meccaniche e di durabilità previste dal progetto è vitale che le stesse non vengano compromesse durante le operazioni di posa in opera, di compattazione e di maturazione dei getti effettuati dall'impresa esecutrice.



Getto plinto - Cantiere a Piacenza

Le operazioni di posa e compattazione del conglomerato, sebbene di esclusiva responsabilità dell'impresa, sono fortemente influenzate dalle proprietà del calcestruzzo allo stato fresco. Pertanto, il progettista e/o la direzione lavori nel capitolato relativo al calcestruzzo, accanto alle specifiche relative alla resistenza caratteristica e al dosaggio di cemento minimo, al rapporto acqua/cemento massimo, alla classe di contenuto di cloruri, dovrà associare quelle prescrizioni che attengono alle proprietà del conglomerato allo stato fresco che possono sensibilmente influenzare le prestazioni del calcestruzzo in opera. In sostanza, sebbene l'impresa esecutrice sia l'unica e sola responsabile delle operazioni di realizzazione dei getti, sarà, invece, di esclusiva pertinenza del progettista e/o della direzione lavori definire nelle specifiche di capitolato la lavorabilità del calcestruzzo allo stato fresco in modo da facilitare le operazioni di posa, rendere agevoli quelle di compattazione dei getti. Dovrà essere la stessa direzione lavori infine a prescrivere la corretta modalità e durata della protezione dei getti nei primi giorni che seguono la realizzazione delle strutture al fine di prevenire indesiderati fenomeni fessurativi e garantire l'ottenimento di un copriferro che per la modesta porosità sia in grado di resistere alle sollecitazioni aggressive ambientali.

Il progettista e la direzione lavori, in definitiva, dovranno indicare nella prescrizione di capitolato finalizzata al controllo delle operazioni di posa, compattazione e stagionatura:

- la lavorabilità del calcestruzzo al getto;
- le modalità e la durata minima della protezione dei getti;
- la resistenza caratteristica in opera valutata su carote  $h/d=1$ .

35

## COME PREVENIRE LA COMPARSA DEI DIFETTI DI COSTRUZIONE

**N**ella realizzazione delle opere in calcestruzzo armato sono molteplici le operazioni condotte in cantiere che possono influire sulla qualità, sulla durabilità e, in generale, sui livelli di sicurezza delle strutture tra le quali:

- una idonea preparazione dei casseri e da un loro corretto posizionamento;
- una adeguata preparazione delle superfici contro cui effettuare il getto;
- una corretta predisposizione della gabbia di armatura;
- una posa in opera che garantisca un riempimento omogeneo dei casseri evitando la separazione degli ingredienti che costituiscono il calcestruzzo;
- una efficace compattazione dei getti finalizzata all'eliminazione di vuoti e bolle d'aria e tesa ad ottenere per il calcestruzzo in opera la massima densità possibile compatibilmente con i sistemi di compattazione disponibili;
- una efficace protezione dei getti nelle ore e nei giorni successivi alla posa in opera finalizzata ad impedire una precoce evaporazione di acqua dal conglomerato verso l'ambiente esterno evitando la comparsa di dannosi quadri fessurativi;
- una maturazione adeguata a raggiungere le prestazioni elasto-meccaniche dell'elemento strutturale compatibilmente con le condizioni climatiche esistenti in cantiere al fine di procedere ad un disarmo ed una successiva messa in servizio delle strutture in totale sicurezza.



Bunker - Nuovo acceleratore lineare - Ospedale di Mantova



Bunker - Nuovo acceleratore lineare - Ospedale di Mantova



Getto plinto - Fondazione Pila in Alveo Viadotto sul fiume Po - TAV

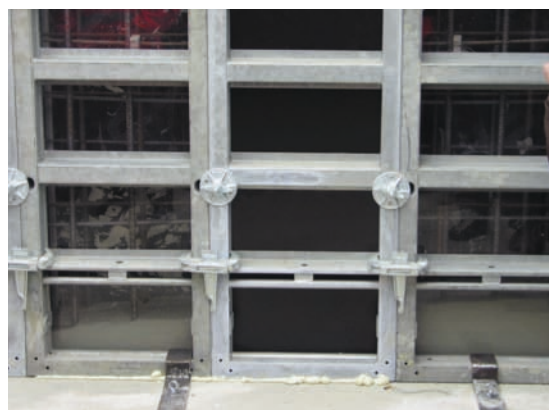
## 36 PREPARAZIONE DEI CASSERI

**Rigidità e tenuta.** Relativamente alla preparazione dei casseri si dovrà accertare che essi siano ben fissati e dotati di una rigidità sufficiente a sopportare la spinta del calcestruzzo durante la fase di posa in opera e di successiva compattazione dei getti senza subire deformazioni significative.

**La predisposizione dei casseri<sup>45</sup>.** Dovranno, inoltre, essere presi tutti gli accorgimenti per garantire una perfetta tenuta dei casseri per evitare che l'eccessiva fluidità del calcestruzzo possa determinare la perdita di pasta di cemento in corrispondenza delle giunzioni e conseguentemente la comparsa di difetti non solo estetici per la struttura in calcestruzzo.

**Estetica delle superfici.** Al fine di evitare che la qualità estetica del manufatto venga compromessa occorre evitare che la superficie del cassero sia inquinata da tracce di sporco, di terriccio o di ghiaccio. Un ulteriore accorgimento finalizzato a migliorare la qualità della superficie dei getti è quella di evitare di impiegare casseri di materiale diverso oppure, soprattutto nel caso di casseri di legno, di alternare tavole nuove con quelle già utilizzate.

**Disarmante.** Per evitare la comparsa di antiestetiche macchie sulla superficie del calcestruzzo è necessario applicare, soprattutto sui casseri poco assorbenti, quali i casseri di acciaio il quantitativo di disarmante appena sufficiente a garantire un omogeneo e completo ricoprimento della superficie del cassero. Infatti, un eccesso di disarmante, non potendo essere assorbito dal cassero, a causa del suo ridotto assorbimento, verrebbe ad essere trascinato sulla superficie del calcestruzzo con la conseguente comparsa di macchie.



Getto SCC - Piacenza



Getto SCC - Piacenza

<sup>45)</sup> Un quadro esaustivo delle tolleranze ammesse per le dimensioni di travi e colonne, per i copriferro e per le deviazioni rispetto all'orizzontalità e verticalità è riportato nella norma EN 13670-1 sull' "Esecuzione delle strutture".

## 37 RIPRESE DI GETTO

**F**atta eccezione per i giunti strutturali in tutti gli altri casi le opere in calcestruzzo prevedono collegamenti rigidi e monolitici. E' il caso del collegamento dei pilastri o dei muri alla fondazione, o quello degli impalcati orizzontali ai sostegni verticali dove la continuità strutturale viene garantita sia dalle armature di collegamento (ferri di ripresa), che, soprattutto, da una corretta esecuzione della ripresa di getto.

Il problema della ripresa di getto si pone non solo in questo contesto, ma anche allorché nella realizzazione di un determinato elemento strutturale, a causa delle sue dimensioni rilevanti, non è possibile ultimare l'opera con continuità ed occorre procedere a delle interruzioni (per il sopraggiungere della notte o del fine settimana) per un periodo di tempo superiore a quello di fine presa del calcestruzzo (dalle 6 alle 18 ore a seconda del tipo di calcestruzzo e della temperatura ambientale). E' il caso, ad esempio, delle fondazioni a platea di grande sviluppo superficiale o anche dei muri di grande altezza e di elevata estensione lineare.



Getto Pavimentazione - Ikea Deposito Centrale 2 - Piacenza. Realizzazione di una fondazione a platea di grande estensione superficiale. Si noti la porzione di struttura di calcestruzzo già indurito (quella ricoperta con foglio di polietilene) e quella in corso di realizzazione

Per una corretta ripresa di getto occorre che il substrato in calcestruzzo contro cui si effettua il getto:

- abbia una sufficiente resistenza a trazione superficiale;
- una adeguata rugosità superficiale per consentire una corretta ripartizione degli sforzi tangenziali grazie all'effetto meccanico di ancoraggio;
- sia priva di sostanze che impediscano, ostacolino o inficino l'adesione del calcestruzzo fresco a quello indurito;
- non sottragga acqua al calcestruzzo fresco.

**Scarifica e bagnatura.** Al fine di realizzare una superficie di ripresa di adeguata resistenza a trazione, dotata allo stesso tempo di sufficiente rugosità, diventa strettamente necessario rimuovere lo strato corticale di scadenti prestazioni determinato dalla risalita di acqua verso le superfici del getto (*bleeding*) mediante bocciardatrici, martelli pneumatici oppure con idropulitrici che consentano una facile asportazione del latte di cemento e garantiscano l'ottenimento di una superficie con asperità di almeno 5 mm. Dopo aver rimosso mediante aria compressa la polvere generata dalle operazioni di scarifica è necessario irrorare con acqua le superfici del substrato in calcestruzzo per evitare che questo sottragga acqua al conglomerato fresco. L'eventuale acqua in eccesso sulla superficie del substrato prima del getto dovrà essere eliminata mediante stracci umidi oppure con aria compressa.

**Giunti water-stop.** In alcuni contesti particolari le riprese di getto debbono anche garantire la tenuta idraulica. E' il caso dell'attacco platea di fondazione-muri nelle vasche di contenimento di acque e liquidi o dei muri di sostegno in terreni interessati dalla presenza di acqua di falda. Per queste strutture i provvedimenti sopra menzionati per una corretta ripresa di getto sono necessari, ma non sufficienti ad impedire il percolamento di acqua in corrispondenza della ripresa che, pertanto, deve essere presidiata (cioè impermeabilizzata) mediante l'utilizzo di profili espansivi *water-stop* di natura acrilica o a base di argille bentonitiche.

**Profili di ripresa.** Nelle strutture verticali che prevedono una ripresa di getto a causa dell'elevata estensione (sia in verticale che in orizzontale del manufatto) per via della pratica impossibilità di nascondere la superficie di ripresa è opportuno evidenziarla ricorrendo alla predisposizione di profili sulla superficie interna del cassero prima di procedere alla realizzazione del getto.



*Stadio Comunale - Torino*



Gruppo Cementirosi S.p.A.

## 38

## POSIZIONAMENTO DELLE ARMATURE

La corretta predisposizione delle armature nel cassero prima di procedere alla realizzazione del getto delle strutture è operazione fondamentale per garantire i prefissati livelli di sicurezza strutturali, di durabilità e di protezione al fuoco delle opere.

Gli errori più ricorrenti in quest'ambito sono rappresentati:

- nelle strutture a sviluppo prevalentemente orizzontale dal posizionamento della gabbia di armatura direttamente contro la superficie inferiore del cassero;
- nelle strutture verticali dal contatto della gabbia con una delle sponde verticali della cassaforma.

**Durabilità e resistenza al fuoco.** La riduzione o addirittura la totale mancanza di copriferro espone le armature al rischio precoce di corrosione per il breve tragitto che le sostanze aggressive (anidride carbonica, cloruro e ossigeno) debbono effettuare prima di raggiungere il ferro d'armo. La mancata protezione delle armature con un adeguato spessore di materiale pone anche un problema dal punto di vista della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale che può risultare gravemente compromessa.



Realizzazione linea Metropolitana - Torino

**Portanza.** Il posizionamento errato della gabbia di armatura determina anche una riduzione delle caratteristiche portanti degli elementi. Nelle strutture a sbalzo, inoltre, l'erroneo posizionamento della gabbia sulla sponda intradossale del cassero potrebbe determinare all'estradosso delle zone di incastro la comparsa di lesioni la cui ampiezza può essere scarsamente controllata dall'armatura a causa dell'eccessivo spessore del copriferro.

**Vibrazione dei getti.** Nella progettazione strutturale, infine, la scelta dei diametri delle armature e della loro disposizione non dovrebbe prescindere dalla possibilità che durante il getto si possa in qualsiasi zona inserire il vibratore ad immersione al fine di conseguire, come si dirà nel paragrafo che segue, una corretta compattazione dei getti in tutti i punti della struttura.

**Spinte a vuoto.** Nella disposizione delle armature, infine, si deve evitare che le stesse possano creare spinte a vuoto con il rischio conseguente di fessurazione ed espulsione del calcestruzzo in corrispondenza di brusche variazioni di sezione come avviene, ad esempio, all'intersezione di due rami di un cordolo o all'attacco tra le solette rampanti delle scale e il pianerottolo.

# 39

## LA POSA IN OPERA

**I**l calcestruzzo è un materiale eterogeneo che presenta, allorchando non viene correttamente manipolato, una naturale tendenza a “smiscelarsi” cioè a separarsi nei vari ingredienti (acqua, cemento e aggregati) che lo costituiscono. Questo difetto intrinseco del materiale viene identificato con il termine di **segregazione**.

Durante il trasporto il fenomeno della segregazione è fortemente limitato grazie all'agitazione della botte. Tuttavia, è buona norma che all'arrivo dell'autobetoniera in cantiere si provveda a miscelare il calcestruzzo alla massima velocità per almeno 2-5 minuti.

Dopo aver scaricato il conglomerato nelle benne è opportuno evitare che queste sostino per tempi lunghi e subiscano urti accidentali che possano favorire la segregazione dell'impasto. Un'ulteriore possibilità di segregazione è quella che può manifestarsi allorchando il calcestruzzo viene messo in opera mediante pompa per effetto della pressione esercitata dal pompaggio. Pertanto, la produzione di impasti di calcestruzzo pompabile richiede un dosaggio minimo di materiali fini di dimensioni inferiori a 0.125 mm pari a 400-450 Kg/m<sup>3</sup>.



La segregazione, tuttavia, può manifestarsi anche per un calcestruzzo che all'uscita del mezzo di trasporto (autobetoniera) o di convogliamento (canaletta, nastro trasportatore, benna o pompa) dovesse presentarsi omogeneo e coeso se la posa in opera all'interno dei casseri avviene in maniera errata. È il caso del getto del calcestruzzo per la realizzazione di elementi verticali di notevole altezza come accade principalmente per i muri di sostegno e i pali di fondazione di notevole profondità. La segregazione in questi casi è determinata principalmente dall'altezza di caduta libera del conglomerato per raggiungere il fondo del cassero e dall'urto del calcestruzzo contro i ferri di armatura. A seguito del rimbalzo del calcestruzzo contro la gabbia dei ferri, infatti, gli aggregati grossi tendono a separarsi dalla pasta e a causa della maggiore dimensione e della più elevata massa volumica - rispetto alla pasta di cemento - raggiungono il fondo del cassero prima degli altri ingredienti, accumulandosi e dando origine a zone particolarmente ricche di aggregato grosso che prendono il nome di **vespai** o **nidi di ghiaia**.

In generale questi problemi sono risolvibili predisponendo dei “convogliatori” che evitino il rimbalzo del conglomerato contro le pareti del cassero e la gabbia d'armatura e limitando l'altezza di caduta libera dell'impasto a 50-70 cm. Pertanto, la soluzione a questo problema è rappresentata dall'introduzione del tubo-getto fino sul fondo della cassaforma e nel suo sollevamento man mano che il conglomerato riempie la forma facendo comunque in modo che il tubo rimanga sempre annegato nel calcestruzzo per almeno 15-20 cm. Purtroppo, però, questa soluzione non è sempre praticabile in quanto negli elementi strutturali di modesta sezione non è possibile inserire il tubo getto. In questi casi la soluzione al problema è quella di dotare la parte terminale del tubo o del cassone di un manicotto di plastica deformabile (“la proboscide”) di sezione tale da poterlo inserire all'interno della cassaforma.



Getto in Alveo - Cantiere a Revere

40

## LAVORABILITÀ DEL CALCESTRUZZO AL MOMENTO DEL GETTO

**D**opo l'introduzione del calcestruzzo nei casseri, occorre curarne la stesura in modo da garantire il completo riempimento e realizzare una efficace compattazione con l'obiettivo di garantire un perfetto inglobamento delle barre d'armature (al fine di conseguire un eccellente trasferimento degli sforzi tra i due materiali ed una adeguata protezione dell'acciaio nei confronti dell'incendio) e di espellere tutta l'aria intrappolata accidentalmente nei getti. Perseguire quest'ultimo obiettivo equivale a garantire per il calcestruzzo in opera una resistenza prossima a quella che il conglomerato evidenzia nelle prove di schiacciamento effettuate sui provini cubici prelevati a bocca di betoniera che, per un determinato conglomerato, rappresenta il valore massimo raggiungibile. Questo obiettivo si può conseguire tanto più facilmente quanto maggiore è la **lavorabilità** del calcestruzzo cioè la sua capacità di deformarsi e scorrere nel cassero sotto l'effetto dei mezzi di compattazione disponibili in cantiere.



Prova di Slump

La misura più diffusa in Italia della lavorabilità del calcestruzzo è rappresentata dall'abbassamento al cono di Abrams determinata introducendo il conglomerato in un tronco di cono in acciaio (base inferiore 200 mm, base superiore 100 mm, altezza 300 mm) che, a riempimento avvenuto, viene sollevato. L'abbassamento della focaccia rispetto all'altezza iniziale prende il nome di *slump*. La norma EN 206-1 prevede cinque livelli di lavorabilità contraddistinti da abbassamenti crescenti da 10 mm fino a 220 mm contraddistinti dalla lettera S seguita da numeri variabili da 1 a 5.

Classi di consistenza in funzione dell'abbassamento al cono di Abrams.

CLASSE DI CONSISTENZA	ABBASSAMENTO AL CONO DI ABRAMS (SLUMP) in mm
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	> 210

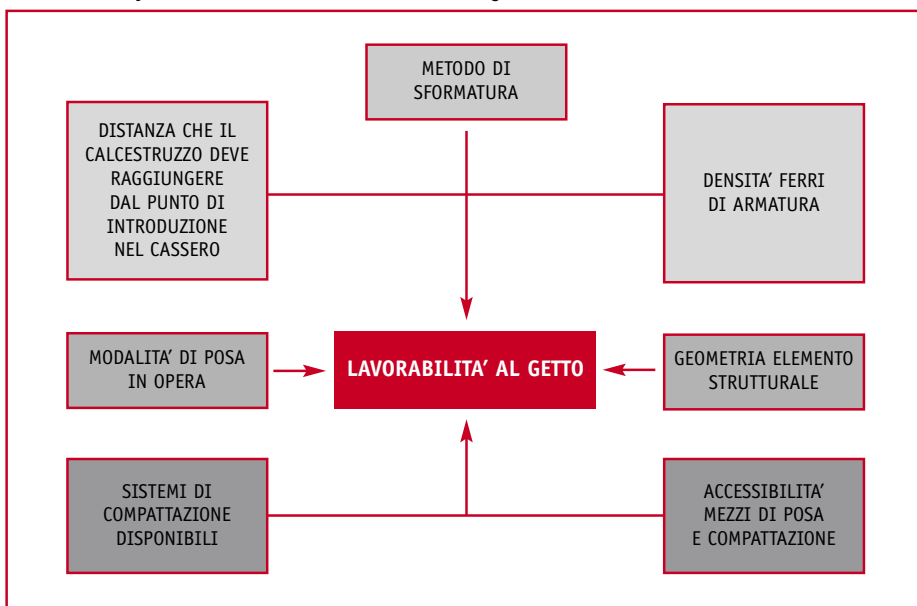
Il livello di lavorabilità ottimale del calcestruzzo non è unico, ma dipende strettamente dalla tipologia di struttura che si intende realizzare. Più esattamente la lavorabilità del conglomerato cementizio deve essere scelta in base:

- ai sistemi di posa in opera disponibili e alla loro accessibilità sul cantiere;
- ai sistemi di compattazione disponibili;
- ai sistemi di sformatura dei getti;
- alla possibilità di accedere con i sistemi di compattazione nel getto e sulle sole pareti dei casseri;
- alla massima distanza che il calcestruzzo deve raggiungere dal punto di introduzione nel cassero;
- alla geometria e alle dimensioni dell'elemento strutturale;
- alla densità dei ferri di armatura.



Getto pavimentazione - Ikea Deposito Centrale 2 - Piacenza

Parametri che influenzano la lavorabilità del calcestruzzo al getto.



**Lavorabilità e sistemi di posa.** Relativamente ai sistemi di posa in opera fatta eccezione per quei cantieri (molto rari) in cui è prevista una distribuzione del calcestruzzo mediante nastri trasportatori dove, generalmente, si richiedono consistenze asciutte o plastiche (S1-S2), nelle altre situazioni più ricorrenti che prevedono la messa in opera con benne, seccioni, a canaletta o a pompa la lavorabilità ottimale è quella compresa tra S3 ed S5.

**Lavorabilità e parametri progettuali.** Riguardo ai parametri di pertinenza del progettista e della direzione lavori che influenzano la scelta della lavorabilità si possono suggerire le seguenti regole di carattere generale. Il livello di lavorabilità dell'impasto:

- dovrà risultare tanto maggiore quanto maggiore è la distanza che il calcestruzzo deve percorrere per raggiungere le zone più lontane dal punto in cui il conglomerato viene introdotto nella cassaforma.

- dovrà risultare tanto maggiore quanto minore è la dimensione delle sezioni degli elementi strutturali.

- dovrà risultare tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale del ferro d'armatura e quanto minore risulta l'interferro.

- dovrà risultare tanto maggiore quanto minore è l'efficacia della vibrazione del calcestruzzo.

- dovrà risultare tanto minore quanto più si richiede che l'impasto abbia una elevata resistenza al "verde".

- dovrà essere modulata alla tipologia di realizzazione dell'elemento strutturale. È il caso dei pavimenti in calcestruzzo realizzati con macchinari "laser screed", oppure delle strutture a casseri rampanti per le quali, per la particolare tipologia della lavorazione, vengono impiegati conglomerati di consistenza fluida.



Ikea Cantiere Le Mose (PC)

Sulla base delle considerazioni sopramenzionate si possono fornire alcune indicazioni al progettista circa la lavorabilità da prescrivere al getto.

*Suggerimenti sulla lavorabilità minima del calcestruzzo al momento della realizzazione del getto per diverse tipologie ed elementi di strutture.*

TIPO DI STRUTTURA	LAVORABILITA' AL GETTO
Manufatti estrusi	V4
Pavimenti a casseri scorrevoli	V4 o S1
Strutture a casseri rampanti	S3
Pavimentazioni realizzate con tecnica "laser screed"	S3
Fondazioni a plinto, trave rovescia o a platea	S4
Muri di vani interrati	S4
Pali di fondazione	S5
Pilastrì	S4
Travi emergenti e a spessore di solaio	S5
Travi inclinate di tetti a falde	S3 - S4
Solette rampanti di scale	S3 - S4
Solette	S4 - S5
Pareti di taglio e nuclei ascensore	S4 - S5
Pavimentazione con stesa manuale e lisciatura a staggia vibrante	S5

**La lavorabilità al momento del getto, quindi, rappresenta uno dei requisiti fondamentali che il progettista deve indicare nella prescrizione di capitolato che riguarda il conglomerato cementizio.** La scelta di questa importante proprietà non può essere demandata dal progettista (o dalla direzione lavori) ad altra figura perché in tale evenienza il rischio che tale scelta venga effettuata non sulla base dei parametri discussi in precedenza (progettuali ed esecutivi), ma su mere considerazioni di costo del calcestruzzo è molto elevato.

A causa della scelta di lavorabilità inferiori a quella realmente necessaria, è alto il rischio che al ricevimento del calcestruzzo in cantiere, le maestranze, accortesi della pratica impossibilità sia di poter procedere ad un efficace riempimento delle casseforme che di vibrare, procedano ad una richiesta di riaggiunta di acqua in autobetoniera che, per il conseguente aumento del rapporto  $a/c$ , determinerà un generale scadimento delle prestazioni del calcestruzzo sia allo stato fresco, peggiorandone la tendenza alla segregazione, che allo stato indurito per l'aumento della porosità e, quindi, per la diminuzione della resistenza meccanica a compressione e della durabilità del conglomerato.

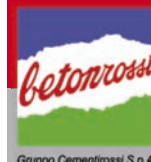
Si tenga presente che, ovviamente, la penalizzazione di resistenza è tanto maggiore quanto più elevata è l'aggiunta di acqua che a sua volta è tanto più elevata quanto minore è la consistenza del calcestruzzo all'arrivo in cantiere. In ogni caso queste aggiunte producono, a causa dell'aumento del rapporto acqua/cemento dell'impasto, una penalizzazione generalizzata delle prestazioni meccaniche stimabile in circa il 6-8 % per ogni 10 Kg di acqua riaggiunta per metro cubo di impasto.

*Riaggiunta d'acqua lavorabilità finale conseguita e riduzione della resistenza a compressione in funzione della classe di consistenza iniziale del conglomerato.*

SLUMP INIZIALE	RIAGGIUNTA DI ACQUA (Kg/m <sup>3</sup> )	SLUMP FINALE	RIDUZIONE DI RESISTENZA MECCANICA (%)
S2	15 - 20	S3	9 - 16
S2	25 - 30	S4	15 - 25
S3	8 - 10	S4	7 - 9
S3	13 - 18	S5	7 - 14
S4	7 - 10	S5	5 - 7

Le dannose raggunte di acqua possono essere effettuate anche quando la lavorabilità del calcestruzzo richiesta al momento del getto è stata correttamente specificata dal progettista. E' il caso, ad esempio, di quei cantieri dove per una scarsa organizzazione si costringe le autobetoniere ad una **lunga attesa prima di poter scaricare il conglomerato**. Al fine di evitare questi inconvenienti è necessario che il cantiere venga organizzato per ridurre **i tempi di attesa entro intervalli compatibili con una regolare messa in opera del calcestruzzo e che non dovrebbero oltrepassare mai i 60 minuti dall'arrivo dell'automezzo in cantiere**. Quest'ultima considerazione spinge ancor più a optare nella definizione delle specifiche di capitolato per conglomerati di consistenza fluida o superfluida quanto maggiore è il tempo di posa in opera del calcestruzzo soprattutto per lavorazioni da eseguirsi durante il periodo estivo allorquando, per la temperatura più elevata, aumenta sia il quantitativo di acqua che può evaporare dall'impasto che la cinetica di idratazione del cemento con conseguente maggiore perdita di lavorabilità del conglomerato.

In definitiva, quindi, per il getto delle strutture reali **l'impiego di conglomerati che al getto presentino una lavorabilità elevata (S4 o superiore) rende meno dipendente la qualità del calcestruzzo in opera dalle condizioni esistenti in cantiere in termini di logistica, di tempi di scarico del conglomerato e di temperatura ambientale**. Inoltre, classi di consistenza fluide o superfluide possono, come verrà meglio specificato nel seguito, rendere più agevoli e rapide le operazioni di posa in opera e di compattazione dei getti finalizzate all'espulsione dell'aria in eccesso presente nel conglomerato.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

## 41 COMPATTAZIONE DEI GETTI

**N**ella moderna tecnologia del calcestruzzo compattare significa assoggettare il conglomerato ad una forza vibrante che consenta di effettuare un completo riempimento delle casseforme espellendo nel contempo l'aria contenuta nell'impasto<sup>66</sup>. Diversi sono i sistemi di vibrazione, ma il più diffuso sul cantiere è quello cosiddetto a immersione (o ad ago) basato su una testa vibrante di forma cilindrica che viene annegata nel conglomerato. Altri sistemi di compattazione includono i vibratori disposti sulla superficie esterna delle casseforme: la vibrazione, conseguente, dei casseri viene trasmessa alla massa del conglomerato favorendo l'espulsione dell'aria in eccesso verso l'esterno del getto.

L'obiettivo ultimo del processo di compattazione è quello di eliminare tutta l'aria presente in eccesso nell'impasto in modo da conseguire la massima densità possibile per il conglomerato. Per raggiungere questo obiettivo occorre effettuare correttamente una serie di operazioni di seguito elencate:

**A) Evitare di stendere il conglomerato con la testa dell'ago.** Questa operazione, infatti, favorisce la segregazione del calcestruzzo ed, in particolare, l'accumulo di acqua di *bleeding* superficiale. La stesa del conglomerato, invece, deve essere eseguita con un idoneo movimento del punto di introduzione del calcestruzzo nella cassaforma procedendo al riempimento per strati non più spessi di 30 cm.

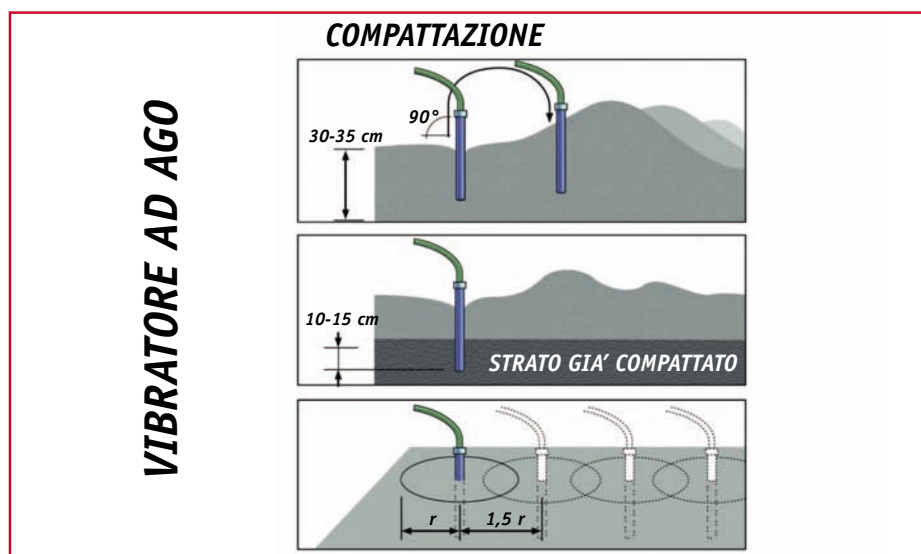
**B) Per strutture di notevole spessore (> 50 cm) la compattazione deve essere realizzata ogni 50 cm al massimo di conglomerato posato.**

**C) Il vibratore deve essere mantenuto in posizione perfettamente verticale** evitando di porlo in contatto con il cassero o con i ferri di armatura

**D) La vibrazione deve interessare sia lo strato di calcestruzzo posato che quello che già è compattato.**

**E) La vibrazione deve interessare l'intera massa del conglomerato gettato imponendo che la distanza tra due punti contigui di introduzione del vibratore nel calcestruzzo risulti non maggiore di circa 15 volte il raggio dell'ago.**

**F) La durata della vibrazione è strettamente legata alla lavorabilità del conglomerato al momento del getto: minore è la consistenza del conglomerato più prolungato deve essere il tempo di permanenza dell'ago nella massa del calcestruzzo.**



*Durata minima del tempo di vibrazione in funzione della classe di consistenza del conglomerato.*

CLASSE DI CONSISTENZA	TEMPO MINIMO DI PERMANENZA DELL'AGO NEL GETTO
V4	30 - 50 s
S1	25 - 30 s
S2	20 - 25 s
S3	15 - 20 s
S4	10 - 15 s
S5	5 - 10 s
F6	0 - 5 s

**Riducendo la durata della vibrazione** della massa del calcestruzzo al di sotto dei tempi minimi suggeriti (o anche diradando i punti di introduzione dell'ago nella massa del conglomerato) risulterà minore la massa volumica del conglomerato rispetto a quella massima attesa a causa di un **eccesso di aria intrappolata non espulsa durante la compattezza dei getti**. Per effetto del maggior volume di aria intrappolata rispetto al valore minimo fisiologico, la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo in opera risulterà inferiore rispetto al valore massimo potenziale atteso sulla base del rapporto  $a/c$  e del tipo/classe di cemento impiegato nel confezionamento dell'impasto.

Risulta evidente, quindi, che la qualità del calcestruzzo in opera risulterà tanto più dipendente dall'efficacia della compattazione quanto più bassa è la lavorabilità del conglomerato al momento del getto. In sostanza, quindi, **l'adozione di lavorabilità elevate rende la qualità della struttura meno dipendente sia dal tempo di permanenza dell'ago nella massa del getto che dalla corretta disposizione dello stesso nella massa**. Questo è **uno dei principali motivi che dovrebbe indurre il progettista e la direzione lavori ad optare per l'impiego di conglomerati superfluidi con classi di consistenza non inferiori alla S4**. L'adozione di calcestruzzi con classi di consistenza *fluide, super-fluide o iperfluide*, inoltre, rappresenta un vantaggio anche per le imprese per la maggiore velocità di posa in opera (ma anche per la minore richiesta di manodopera durante le operazioni di betonaggio) rispetto ad un calcestruzzo di minore consistenza.



<sup>46)</sup> Per conglomerati a consistenza fluida la frequenza di vibrazione ottimale si attesta intorno ai 200 Hz. Calcestruzzi superfluidi e/o confezionati con aggregati di pezzatura massima inferiore a 22 mm contenenti discrete quantità di materiali fini richiesti per la posa in opera mediante pompa possono richiedere sistemi di vibrazione con frequenza maggiore (circa 300 Hz).



## LA PROTEZIONE DELLE STRUTTURE NELLE PRIME ORE SUCCESSIVE AL GETTO

**D**opo la messa in opera all'interno delle casseforme il calcestruzzo rimane nello stato plastico per qualche ora prima che inizi la presa. Durante questo periodo si manifesta un fenomeno che porta, da una parte, alla sedimentazione delle particelle solide sul fondo e, dall'altra, all'accumulo di acqua sulla superficie del manufatto (**acqua essudata o di bleeding**). In particolare, sono gli aggregati di pezzatura maggiore a depositarsi più velocemente sul fondo a causa sia delle maggiori dimensioni che della massa volumica più elevata, mentre l'acqua tende a rifluire verso le parti alte del getto.

La sedimentazione degli aggregati grossi e la conseguente comparsa dell'acqua di *bleeding* sulla superficie dei getti sono fonte di una serie di inconvenienti più o meno gravi per le strutture. Ad esempio, nei massetti il *bleeding* produce la formazione di una superficie pulverulenta che ostacola l'adesione dei collanti a base cementizia per la posa delle piastrelle ceramiche. Nelle pavimentazioni industriali, il *bleeding* può accentuare il fenomeno di imbarcamento delle lastre dovuto al ritiro differenziale per la maggiore contrazione dimensionale degli strati corticali derivante dal maggior rapporto acqua/cemento determinato dal *bleeding*.

Nelle pavimentazioni, inoltre, il *bleeding* porta ad un generale scadimento della resistenza all'abrasione con il risultato che la funzionalità della pavimentazione può essere irrimediabilmente compromessa già dopo pochi mesi dall'apertura al traffico.

La risalita dell'acqua di *bleeding* verso le superfici estradossali del getto può essere ostacolata anche dalla presenza dei ferri di armatura al di sotto dei quali l'acqua può raccogliersi in forma di piccole sacche.

Il flusso dell'acqua di *bleeding* può essere ostacolato dalla presenza dei granuli degli aggregati grossi. Per effetto dell'accumulo di acqua all'interfaccia pasta-aggregato (*zona di transizione*) la matrice cementizia presenta una maggiore porosità rispetto a quella che la stessa possiede nelle zone lontano dall'aggregato.

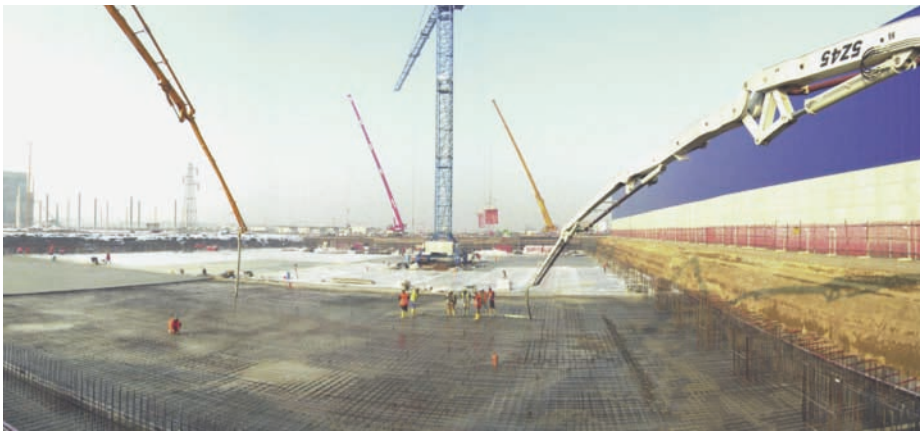
Il *bleeding* interno e l'accumulo di acqua al di sotto dei granuli dell'aggregato grosso sono responsabili del comportamento anisotropo a trazione del conglomerato cementizio nelle strutture reali per le quali numerose indagini sperimentali hanno evidenziato come la resistenza a trazione nella direzione in cui avviene il getto ( $R_{||}$ ) è minore di quella misurata in direzione perpendicolare ( $R_{\perp}$ ). Per effetto del *bleeding* interno, inoltre, le prestazioni meccaniche del calcestruzzo nelle porzioni sommitali delle strutture verticali (pilastri, muri, colonne, etc.) sono inferiori rispetto a quelle basali. Ad esempio, la riduzione della resistenza a trazione in direzione parallela al getto tra testa e piede di una colonna è stimabile all'incirca tra il 7 e il 12%. Un'altra importante proprietà che risulta influenzata dal *bleeding* è l'aderenza acciaio-calcestruzzo: maggiore è la contrazione di volume conseguente al *bleeding* è più elevata è la dispersione dei risultati delle tensioni di aderenza acciaio-matrice cementizia. Come conseguenza di questo fenomeno è consigliabile, come peraltro suggerito dagli Eurocodici, una riduzione delle tensioni di aderenza di progetto per le barre orizzontali disposte perpendicolarmente alla direzione di getto che si trovano nelle porzioni sommitali della struttura.

In casi particolarmente gravi, il fenomeno del *bleeding* può essere accompagnato da perdita di planarità delle superfici del getto e comparsa di lesioni con andamento parallelo al disegno dei ferri di armatura (**assestamento plastico**). È il caso di calcestruzzi che, a causa dei quantitativi rilevanti di acqua essudata, tendono ad assestarsi, ma in questo movimento verso il basso sono contrastati dalla presenza dei ferri di armatura. Per effetto dell'impedimento esercitato dai ferri, quindi, sono le sole le porzioni di conglomerato distanti dalle armature a poter sedimentare, mentre quelle immediatamente al di sopra dei ferri, per l'insorgere di stati tensionali di trazione, si fessurano. La perdita di planarità per eccesso di *bleeding*, invece, è caratteristica di strutture a sviluppo orizzontale quali, ad



esempio, le platee di fondazione. Nei pilastri il fenomeno dell'assestamento plastico può manifestarsi in forma di fessurazioni con andamento ad arco localizzate nella porzione superiore delle strutture.

Al fine di prevenire i dissesti e le fessurazioni connesse con il fenomeno dell'assestamento plastico risulta di vitale importanza impiegare impasti caratterizzati da bleeding inferiori all'1% confezionati con ridotti quantitativi di acqua, additivi superfluidificanti e con quantitativi di materiale fine non inferiore a 380-420 Kg/m<sup>3</sup>. Un ulteriore beneficio è rappresentato dal ridurre la velocità di riempimento del cassero accompagnata da una intensa ed efficace vibrazione. Quest'ultima operazione può essere ripetuta una seconda volta (rivibrazione) sulle porzioni superficiali del getto ovviamente prima che lo stesso abbia iniziato la presa. In questo modo, si possono eliminare i vuoti creatisi al di sotto dei ferri di armatura e dei granuli degli aggregati grossi riducendo l'assestamento totale dell'impasto e il conseguente quadro fessurativo.



*Platea di fondazione armato del silo meccanizzato - Ikea Deposito Centrale 2 - Piacenza*



Gruppo Cementirosi S.p.A.

## 43 LA MATURAZIONE DEI GETTI

La realizzazione di strutture in calcestruzzo armato eccellenti dal punto di vista della durabilità, delle capacità portanti e dei livelli di sicurezza generali dell'opera si concretizza attraverso:

- A) una corretta prescrizione di capitolato per il conglomerato cementizio;
- B) il confezionamento di un calcestruzzo prodotto con in processo industrializzato certificato da un terzo organismo che consenta preliminarmente di accertare che le prestazioni specificate dal progettista siano realmente conseguibili riducendo al minimo le oscillazioni prestazionali rispetto ai valori attesi;
- C) una idonea posa in opera che eviti la segregazione dell'impasto e consenta di conseguire per il calcestruzzo in opera valori della massa volumica prossimi a quelli massimi caratteristici di un impasto compattato "a rifiuto";
- D) garantendo una adeguata maturazione del calcestruzzo nel periodo immediatamente successivo alla posa in opera del conglomerato nei casseri.



L'ingranaggio virtuoso per il raggiungimento dei livelli di sicurezza prefissati per l'opera.

La maturazione dei getti persegue obiettivi distinti in relazione alla fase plastica e di indurimento del calcestruzzo.

### A) FASE PLASTICA (entro 12 -24 ore dalla posa)

Limitare o impedire l'evaporazione di acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente esterno al fine di prevenire la comparsa di cavillature e lesioni per effetto delle tensioni indotte dalle contrazioni impedito del calcestruzzo in fase plastica (**ritiro plastico**);

### B) FASE DI INDURIMENTO (dopo 24 ore dalla posa fino a 7-10 giorni)

Limitare o impedire l'evaporazione di acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente esterno al fine di garantire una corretta evoluzione del processo di idratazione del cemento finalizzato

al raggiungimento di una porosità capillare congruente con i livelli di durabilità e con le prestazioni elasto-meccaniche attese per il calcestruzzo.

### **La maturazione del calcestruzzo entro le 12-24 ore immediatamente successive alla posa in opera (protezione dei getti in fase plastica)**

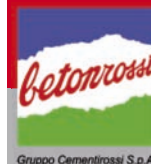
Quando il calcestruzzo è esposto ad un ambiente insaturo di vapore parte dell'acqua di impasto presente nella matrice cementizia tende ad evaporare verso l'esterno. Pertanto, fatta eccezione per i getti effettuati sott'acqua, immediatamente dopo la posa in opera, le strutture che presentano superfici non casserate sono esposte al rischio di forte evaporazione di acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente esterno. Le strutture gettate entro cassero, invece, sono protette dall'evaporazione di acqua dalle sponde purché queste siano realizzate in materiali impermeabili quali acciaio, cartone con membrana interna di politene, pvc, polistirolo oppure in compensato di legno trattato con resina<sup>47</sup>. Ovviamente, questa protezione cessa nel momento in cui si procede alla rimozione delle sponde e la superficie del getto si presenta direttamente esposta all'ambiente esterno.

Il quantitativo di acqua che può evaporare verso l'ambiente esterno diventa rilevante per quelle strutture che presentano una notevole estensione superficiale. In queste strutture, se la velocità di evaporazione, per le particolari condizioni climatiche esistenti in cantiere (bassa umidità relativa e discreta ventilazione), supera quella dell'acqua che perviene sulla superficie per effetto del *bleeding*, tra le particelle solide del conglomerato cementizio si formano dei menischi responsabili di una generale contrazione degli strati di calcestruzzo più superficiali. Nella realtà la contrazione (definita *ritiro plastico*) non può manifestarsi liberamente in quanto ostacolata sia dalla presenza delle armature che dagli strati di conglomerato più interni che, invece, sono sostanzialmente stabili. L'impedimento alla libera contrazione degli strati superficiali di conglomerato genera stati tensionali di trazione che, sebbene fortemente mitigati dalla rilevante deformazione viscosa che contraddistingue il materiale in questa fase plastica, risultano sempre superiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo (anch'essa già modesta sia per le caratteristiche intrinseche del materiale che per la giovane età). Il risultato di queste coazioni indotte dal ritiro plastico in strutture non casserate esposte all'evaporazione di acqua in ambienti asciutti e ventilati, quindi, è rappresentato da una fessurazione diffusa che può presentarsi con andamento geometrico regolare a seguire il disegno dei ferri di armatura oppure, in quelle strutture debolmente armate o non armate (pavimenti in calcestruzzo o intonaci) in forma di fessure caotiche a mo' di carta geografica (*map-cracking*), di piccola ampiezza da risultare almeno inizialmente poco visibili ad occhio nudo<sup>48</sup>.

Indipendentemente dalla tipologia fessurativa, le soluzioni di continuità determinate dal ritiro plastico rappresentano un grave inconveniente per le strutture in calcestruzzo non solo dal punto di vista estetico, ma soprattutto dal punto di vista della durabilità, della funzionalità e anche della statica dei manufatti. Queste soluzioni di continuità, infatti, rappresentano dei canali preferenziali di accesso per le sostanze aggressive nel calcestruzzo e, quindi, fonte primaria del degrado del conglomerato e delle armature in tempi più rapidi rispetto alla vita utile prefissata per l'opera. Ad esempio, nelle pavimentazioni industriali fessurate da ritiro plastico il passaggio dei carrelli elevatori può favorire lo sbriciamento dei cigli fessurativi. Infine, ma non meno importante, la fessurazione degli strati esterni rappresenta un problema anche per la statica degli elementi strutturali perché fessurazioni molto ampie e diffuse possono compromettere la corretta trasmissione degli sforzi acciaio-calcestruzzo.

### **La protezione delle superfici dei getti nel periodo successivo alla fase plastica (dopo le 12-24 ore)**

Al termine della fase plastica la mancata protezione delle superfici dalla evaporazione di acqua verso l'ambiente esterno determina negli strati corticali del conglomerato un minor grado di idratazione rispetto agli strati più interni che, invece, sono protetti dalla perdita di acqua proprio dagli strati di calcestruzzo più superficiali. Pertanto, gli strati più



Gruppo Cementirosi S.p.A.

esterni della struttura di spessore variabile tra 20 e 25 mm saranno caratterizzati da una porosità capillare maggiore rispetto a quella del calcestruzzo del cuore del getto. La diretta conseguenza di questa maggiore porosità è rappresentata da una più elevata penetrabilità proprio in quegli strati di calcestruzzo più esterni che dovrebbero, invece, costituire il presidio più efficace nei confronti dei processi di degrado promossi dall'acqua e dalle sostanze aggressive ambientali. Questo equivale a dire che a parità di spessore del copriferro, ad esempio, i tempi di innesco del processo corrosivo determinato dall'anidride carbonica dell'aria vengono fortemente anticipati riducendo la vita utile della struttura se la stessa viene esposta all'aria senza alcuna protezione che impedisca o limiti l'evaporazione di acqua verso l'esterno. Gli effetti deleteri di una mancata protezione umida sui tempi di innesco del processo corrosivo, inoltre, risultano, tanto più marcati quanto più scadente è la qualità del calcestruzzo impiegato.

### **I metodi per la protezione dei getti**

Appare chiaro che risulta di vitale importanza per il raggiungimento dei livelli di sicurezza prefissati per le strutture che occorre **proteggere le superfici dei getti** per evitare che le stesse possano essere sottoposte ad una precoce disidratazione mediante:

**A) una lunga permanenza del calcestruzzo nel cassero.**

**B) una bagnatura continua delle superfici.**

**C) una bagnatura intermittente delle superfici.**

**D) teli o fogli di plastica impermeabile.**

**E) con fogli di materiale geotessile (tessuto/non tessuto) o teli di iuta bagnati ad intermittenza.**

**F) l'applicazione a spruzzo di un agente stagionante (o di curing).** Questa tecnica ha come controindicazione il fatto che la presenza della patina cerosa dell'agente di curing può inficiare l'adesione di eventuali strati di finitura a base cementizia (ad esempio, una rasatura oppure un intonaco) da realizzare sulle superfici sottoposte al trattamento protettivo. Pertanto, in questa evenienza si rende necessaria la rimozione di questa pellicola superficiale mediante un trattamento di spazzolatura meccanica, di sabbiatura o di idropulizia.

Ai sistemi di protezione sopramenzionati si possono affiancare ulteriori provvedimenti quali, ad esempio, evitare di realizzare i getti durante il periodo estivo nelle ore più calde della giornata optando, invece, per le ore mattutine o ancor meglio per quelle serali.

Tra i sistemi di stagionatura sopramenzionati i più efficaci sono quelli che prevedono la bagnatura continua o il ricoprimento della superficie con acqua e quello basato sulla protezione di tessuti di iuta o drappi di materiale geotessile bagnati ad intermittenza.

### **La durata della protezione**

I sistemi di protezione sopraelencati debbono essere mantenuti sulle superfici delle strutture in calcestruzzo per un periodo di tempo sufficiente sia a prevenire la comparsa delle fessure da ritiro plastico e/o autogeno che per garantire una adeguata idratazione del calcestruzzo degli strati corticali finalizzata a conseguire le prestazioni meccaniche e di durabilità richieste per l'elemento strutturale. La durata del periodo di protezione dipende:

- sia dalle condizioni climatiche esistenti al momento della realizzazione dell'opera;
- dal rapporto acqua/cemento dell'impasto impiegato e, quindi, dalla resistenza carat-



Gruppo Cementirosi S.p.A.

teristica nominale del calcestruzzo;

- dalla cinetica del processo di idratazione del cemento e, conseguentemente, dal tipo e dalla classe del cemento impiegato nel confezionamento dell'impasto.

In linea di massima si possono fare le seguenti considerazioni:

- la durata della protezione umida deve essere tanto maggiore quanto più bassa è l'umidità relativa ambientale, quanto maggiore la ventilazione e l'insolazione sulle superfici del getto;

- a parità di tutte le condizioni ed, in particolare, per una data umidità relativa ambientale la durata della protezione deve essere tanto maggiore quanto più è bassa la temperatura del calcestruzzo. Per temperature inferiori a 5°C i sistemi di protezione

dall'evaporazione debbono essere integrati con quelli finalizzati a evitare la dispersione di calore verso l'ambiente al fine di consentire l'indurimento dell'impasto anche per temperature ambientali particolarmente fredde;

- più scadente è la qualità del calcestruzzo per l'elevato rapporto *a/c* e, conseguentemente per l'elevata porosità e la bassa resistenza meccanica, e maggiore dovrà risultare il periodo di protezione;

- minore è la classe di resistenza del cemento e maggiore dovrà essere la durata del periodo di protezione;

- a parità di classe di resistenza del cemento la durata della protezione deve essere prolungata impiegando in sequenza cementi di classe V, III, IV, II e I.

In base a quanto sopra esposto è evidente che una esatta definizione della durata della protezione che volesse tener conto di tutti i parametri sopramenzionati si scontra con la realtà del cantiere dove la maggior parte delle grandezze sopraelencate non sono generalmente note né misurate (si pensi alla temperatura e all'umidità relativa alla difficoltà di stabilire l'intensità dell'insolazione o la velocità del vento etc.). Pertanto, alla luce delle perplessità circa la definizione della durata della protezione umida utilizzando i parametri

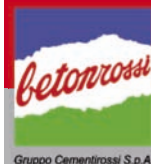
*Suggerimento sulla durata minima (in giorni) della protezione umida da attuare in cantiere.*

CLASSE DI RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO	≤ C25/30		> C25/30	
	INTERNO	ESTERNO	INTERNO	ESTERNO
Esposizione della struttura				
Periodo di esecuzione dei getti: APRILE - SETTEMBRE	3gg	7gg	3gg	5gg
Periodo di esecuzione dei getti: OTTOBRE - MARZO	7gg	10gg	5gg	7gg

sopra individuati (come peraltro richiamato sia dalla norma EN 206-1 che dalla EN 13670-**A**) si può fare riferimento nella definizione delle specifiche di capitolato ai dati della Tabella che segue.

Come si può notare, la Tabella fa riferimento a situazioni più immediatamente identificabili in cantiere quali il periodo di esecuzione dei getti, se gli stessi vengono eseguiti all'esterno o all'interno ed, infine, tiene conto della resistenza a compressione del calcestruzzo utilizzato.

In definitiva, quindi, per l'ottenimento di strutture in calcestruzzo eccellenti il progettista (e in mancanza di indicazioni da parte di quest'ultimo la direzione lavori) dovrà pre-



Gruppo Cementirosi S.p.A.

scrivere un periodo di protezione delle superfici dei getti da realizzarsi con una delle metodologie sopradescritte in accordo con la durata minima riportata in Tabella. Per rendere realmente efficace la prescrizione, tuttavia, il progettista dovrà esigere nel capitolato delle opere una voce dell'Elenco Prezzi relativa alla protezione delle superfici degli elementi strutturali svincolata dalle altre operazioni che attengono alla realizzazione delle strutture. In questo modo l'impresa esecutrice potrà quantificare correttamente l'onere per effettuare questa operazione. Solo a fronte di un compenso economico per una operazione che comunque comporta dei costi per l'impresa la stessa procederà realmente ad effettuare le operazioni di protezione richieste per le superfici delle strutture in calcestruzzo. In assenza di questa voce di capitolato specifica, il rischio che l'impresa, come prassi vuole, trascuri di quantificare il costo degli oneri derivanti dalla protezione umida e in fase di esecuzione delle strutture faccia di tutto per disattendere questa operazione rimane molto alto.



---

<sup>47)</sup> Le strutture gettate in casseri di legno costituite da materiale molto assorbente, soprattutto se le tavole sono nuove o sono state utilizzate solo per pochi getti, l'acqua, pur non potendo evaporare verso l'esterno, potrebbe essere sottratta dal cassero. Pertanto, al fine di evitare che questo accada è opportuno che le sponde vengano irrorate dall'esterno con acqua.

<sup>48)</sup> Nelle pavimentazioni in calcestruzzo con strati di usura, la maggior parte delle fessure che in forma caotica si palesano sulla superficie del calcestruzzo a seguito del ritiro plastico vengono fortunatamente richiuse durante le operazioni di fratazzatura.

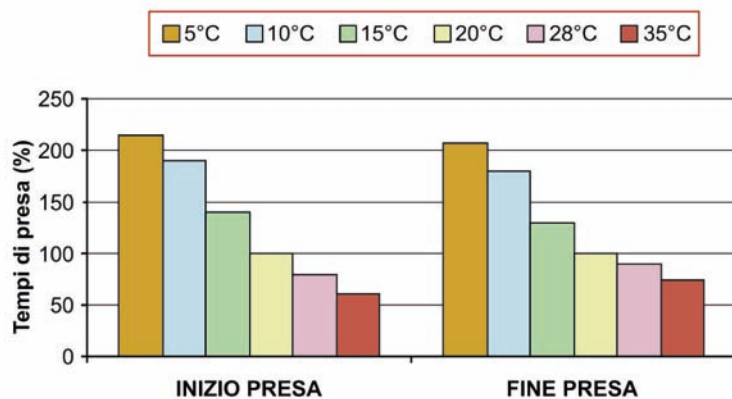
## 44 IL GETTO DEL CALCESTRUZZO IN CLIMA CALDO O FREDDO

Il confezionamento, la posa in opera e la maturazione del calcestruzzo avvengono a temperature che possono oscillare, almeno nei nostri climi, nel periodo invernale tra 10 e -5°C e, nel periodo estivo, tra 25 e 40 °C. A queste temperature le proprietà del calcestruzzo, sia allo stato fresco che indurito, risultano sensibilmente modificate rispetto a quelle che il conglomerato possiede alla temperatura canonica di riferimento di 20°C in quanto varia la cinetica del processo di idratazione del cemento (temperature elevate accelerano le reazioni chimiche di tutti i costituenti mineralogici del clinker con l'acqua mentre le basse temperature le rallentano). Pertanto, la temperatura ambientale riveste un ruolo significativo durante le fasi di lavorazione del conglomerato in clima caldo e freddo influenzando:

- la scelta degli ingredienti;
- la composizione del calcestruzzo;
- e modalità di lavorazione;
- la tipologia di cassero;
- le procedure di maturazione e protezione umida dei getti nelle fasi che seguono immediatamente l'ultimazione delle operazioni di posa.

Una prima conseguenza pratica è rappresentata dalla modifica della perdita di lavorabilità durante il trasporto del calcestruzzo dalla centrale di betonaggio al cantiere. La perdita di lavorabilità, infatti, aumenta con le alte temperature comportando una rapida perdita di plasticità e un accorciamento dei tempi di presa, mentre si attenua fortemente durante le stagioni particolarmente fredde (vedi figura).

Tempi di inizio e fine presa del calcestruzzo (CE II/B-LL 32.5;  $\alpha/c=0.62$ ;  $c=290 \text{ kg/m}^3$ ) in funzione della temperatura del conglomerato (I valori sono espressi in percentuale rispetto ai tempi di presa del calcestruzzo alla temperatura di 20°C posti pari a 100).

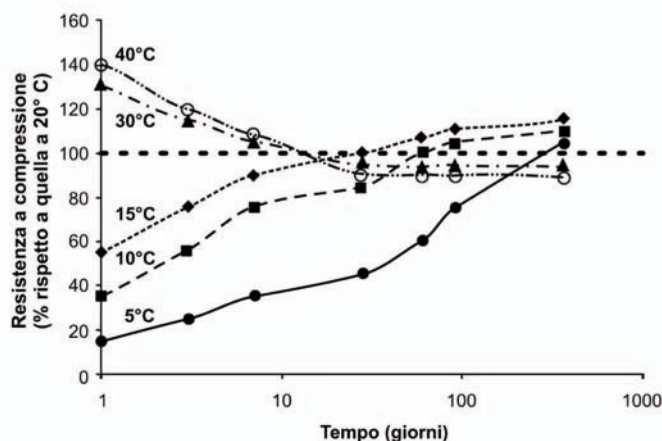


L'effetto di accelerazione dell'idratazione determina un anticipo sui tempi di indurimento del calcestruzzo che alle brevi stagionature (nei primi 7-10 giorni) è caratterizzato da resistenze meccaniche a compressione più elevate di quelle che lo stesso impasto evidenzerebbe alle basse temperature. Alle stagionature più lunghe, per contro, la maturazione del calcestruzzo a temperature elevate penalizza la resistenza a compressione del conglomerato rispetto a quella di un analogo impasto maturato a temperature più basse.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo di calcestruzzi maturati a temperature variabili tra 5 e 40 °C (I valori della resistenza sono espressi in percentuale rispetto a quelli del conglomerato maturato a 20°C).



### La lavorazione del calcestruzzo in clima caldo

Le principali problematiche e i rispettivi inconvenienti che possono presentarsi quando le operazioni di betonaggio avvengono durante il periodo estivo sono sostanzialmente due:

**A)** una eccessiva perdita di lavorabilità durante il trasporto a cui solitamente nei cantieri si pone rimedio aggiungendo acqua in betoniera al momento della consegna per poter conseguire la lavorabilità necessaria per effettuare il getto, con conseguente aumento del rapporto a/c e diminuzione delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo in opera. Nei casi in cui invece non si aggiunga acqua, ma si procede alla messa in opera dell'impasto con una lavorabilità più bassa di quella richiesta rimane alta la possibilità che, soprattutto in strutture di piccolo spessore ed alta percentuale di armatura, il cassero non venga completamente riempito o la compattazione risulti difficile al punto da determinare un residuo di aria intrappolata maggiore di quello fisiologico con conseguente abbattimento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo;

**B)** un accorciamento dei tempi di inizio presa non compatibili con le operazioni di posa in opera e di compattazione dei getti. Particolarmente rischioso se si debbono realizzare strutture che richiedono elevati volumi di calcestruzzo in quanto sussiste la possibilità di creare giunti freddi in corrispondenza delle riprese di getto se tra l'arrivo di una betoniera e quella successiva dovesse intercorrere un tempo superiore a quello di inizio presa del conglomerato precedentemente gettato.

Per ovviare alla comparsa di questi inconvenienti è necessario impiegare:

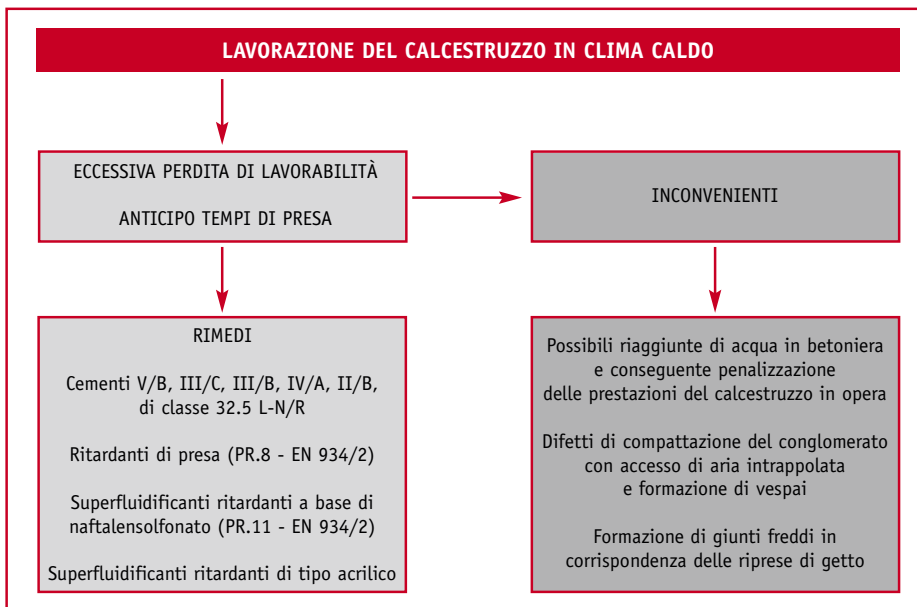
- cementi con una lenta cinetica di idratazione:

- a) cementi di classe 32.5 N - L (caratterizzati dalla minore perdita di lavorabilità);
- b) a parità di classe, i cementi poveri di clinker (cementi tipo III, V e IV) in quanto permettono di attenuare la perdita di lavorabilità.

- additivi ritardanti di presa o ai superfluidificanti ritardanti ed, in particolare, a quelli di tipo acrilico.

Resta, infine, da segnalare che durante il periodo caldo soprattutto nelle giornate ventose e asciutte, la velocità di evaporazione dell'acqua dalla superfici non casserate può superare quella che si accumula per effetto del bleeding con conseguente esasperazione dei fenomeni di ritiro ed assestamento plastico che possono produrre una intensa fessurazione del conglomerato.

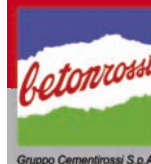
Principali inconvenienti che insorgono durante le lavorazioni in clima caldo e possibili provvedimenti da adottare per la loro eliminazione.



### La lavorazione del calcestruzzo in clima freddo

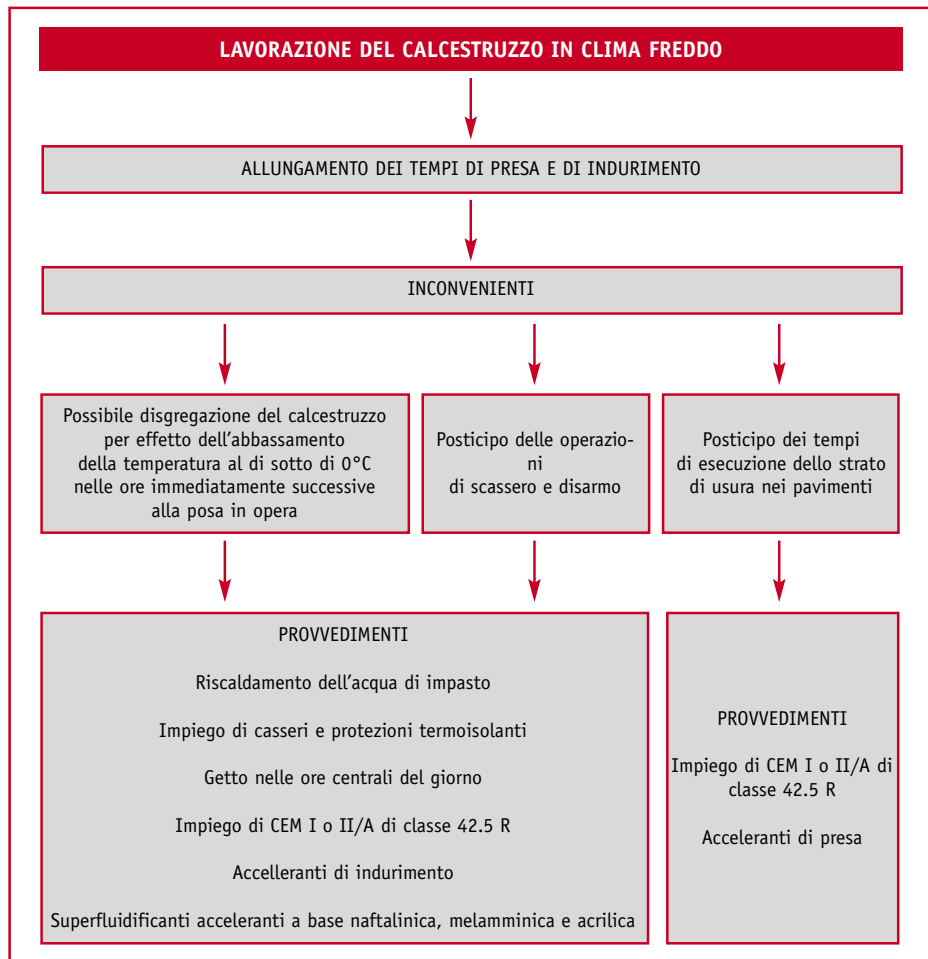
Alle basse temperature le principali problematiche insorgono non tanto durante il trasporto del conglomerato e nelle successive fasi di getto del conglomerato, quanto nelle fasi immediatamente successive alla posa in opera del calcestruzzo. Il rallentamento dei tempi di presa e di indurimento, infatti, può determinare una serie di inconvenienti quali:

- la completa disgregazione del calcestruzzo se la temperatura dovesse scendere al di sotto di 0°C nella notte immediatamente successiva alla posa in opera;
- un ritardo nell'esecuzione dello strato di usura nelle pavimentazioni che potrebbe addirittura dover essere posticipata di un giorno con inevitabili ripercussioni sul costo del manufatto;
- un ritardo nelle operazioni di scasso e disarmo degli elementi strutturali che finirebbero per incidere sull'organizzazione del cantiere e sulla prosecuzione dei lavori.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Principali inconvenienti che insorgono durante le lavorazioni in clima freddo e possibili provvedimenti da adottare per la loro eliminazione.

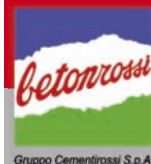
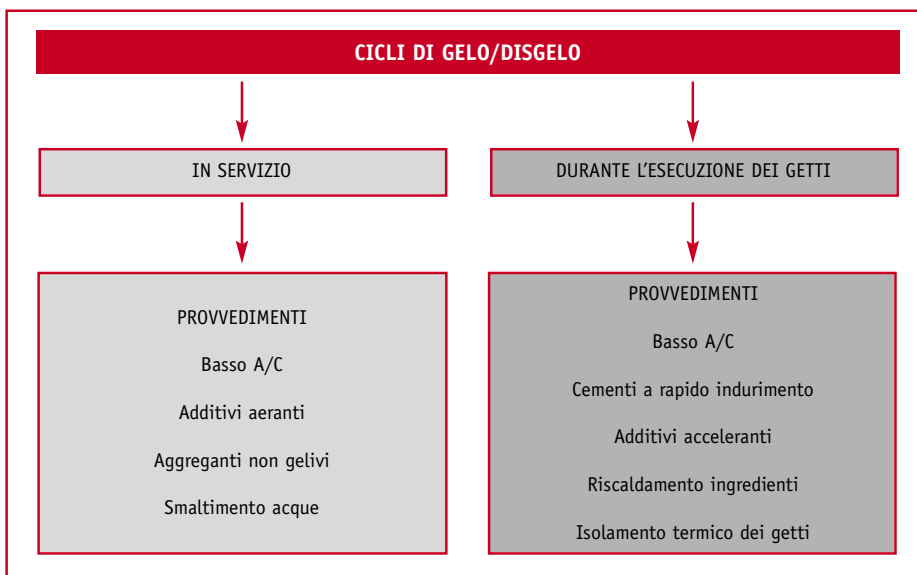


Tra gli inconvenienti menzionati, come si può facilmente intuire, l'abbassamento della temperatura al di sotto di 0°C nelle ore immediatamente successive al getto rappresenta sicuramente l'inconveniente più grave. Infatti, se nel momento in cui la temperatura scende al di sotto del punto di congelamento dell'acqua, il calcestruzzo non ha sufficiente resistenza può completamente disintegrarsi (scagliatura superficiale nelle superfici non casserate o intensa fessurazione nelle strutture di modesto spessore) per effetto delle tensioni che insorgono a seguito della trasformazione in ghiaccio dell'acqua contenuta all'interno della matrice cementizia e degli aggregati. Generalmente, a questi inconvenienti è difficile rimediare e nella maggior parte dei casi si deve procedere alla demolizione e ricostruzione ex novo dell'elemento dissestato.

Per prevenire i fenomeni di dissesto è sufficiente che il calcestruzzo posseda al momento in cui la temperatura si abbassa al di sotto di 0°C una resistenza a compressione di almeno 3.5 N/mm<sup>2</sup>, ottenibile impiegando cementi con classe di resistenza 42.5R a rapido indurimento caratterizzati da un elevato contenuto di clinker unitamente all'impiego di acceleranti di indurimento e adottando rapporti a/c relativamente bassi. In condizioni climatiche estreme con temperature molto basse (< -5°C) la soluzione al problema consiste nel ridurre la dissipazione del calore prodotto dall'idratazione del cemento verso l'ambiente esterno mediante l'utilizzo di casseri termo-isolanti e coprendo le superfici non casserate con materassini di polistirolo o di polistirene estruso per almeno 3-7 giorni.

È opportuno evidenziare come gli accorgimenti da adottare per i getti in clima freddo (temperatura < 5°C) sono completamente diversi da quelli necessari per rendere la struttura resistente ai cicli alternati di gelo-disgelo. In quest'ultima evenienza, infatti, la durabilità viene conseguita impiegando conglomerati cementizi con basso rapporto a/c, confezionati con additivi aeranti e aggregati resistenti al gelo e progettando le strutture in modo da consentire un facile smaltimento delle acque evitando punti di ristagno della stessa che possano favorire un aumento del grado di saturazione del calcestruzzo e, conseguentemente, il degrado delle opere.

*Cicli di gelo-disgelo durante l'esecuzione dell'opera e su strutture in servizio e relativi provvedimenti da adottare per prevenire il degrado.*



Gruppo Cementirosi S.p.A.



## ESEMPI DI PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO

### A) SOLETTA DI COPERTURA IN CALCESTRUZZO ARMATO DI UNA PENSILINA SITUATA IN UNA CITTA' DAL CLIMA CONTINENTALE RIGIDO

- 1) CLASSI DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE: XC4, XF3
- 2) RAPPORTO a/c MASSIMO: 0.50
- 3) CLASSE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE MINIMA: C25/30
- 4) CRITERIO CONTROLLO DI ACCETTAZIONE: TIPO A o B
- 5) ARIA INGLOBATA : 5 +/- 0.5%
- 6) LAVORABILITA' AL GETTO: S4
- 7) CONTENUTO MINIMO DI CEMENTO: 340 Kg/m<sup>3</sup>
- 8) TIPO/CLASSE DI CEMENTO: CE II/A-L 42.5R
- 9) CLASSE DI CONTENUTO DI CLORURI DEL CALCESTRUZZO: Cl0.4
- 10) DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO: 32 mm
- 11) CLASSE DI CONTENUTO DI SOLFATI DELL'AGGREGATO: AS0.2
- 12) CLASSE DI RESISTENZA AL GELO DELL'AGGREGATO: F<sub>2</sub> o MS<sub>25</sub>
- 13) ASSENZA DI MINERALI NOCIVI E DI POTENZIALE REATTIVITA' AGLI ALCALI (EN 12620 E UNI 8520/2)
- 14) COPRIFERRO NOMINALE: 40 mm (tolleranza 10 mm)
- 15) DURATA MINIMA DELLA MATURAZIONE UMIDA: 7 GIORNI
- 16) CONTROLLO DELL'ESECUZIONE DELL'OPERA: C(x/y)<sub>opera</sub> > 0.85 C(x/y)  
(La resistenza caratteristica cubica in opera in accordo alla EN 12504-1 deve risultare > 25.5 N/mm<sup>2</sup>)

### B) PAVIMENTAZIONE ESTERNA IN CALCESTRUZZO ARMATO SITUATA IN CLIMA RIGIDO E SOTTOPOSTA IN SERVIZIO A TRATTAMENTI CON SALI DISGELANTI

- 1) CLASSI DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE: XC4, XF4, XD3
- 2) RAPPORTO a/c MASSIMO: 0.45
- 3) CLASSE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE MINIMA: C28/35
- 4) CRITERIO CONTROLLO DI ACCETTAZIONE: TIPO A o B
- 5) ARIA INGLOBATA: 5 +/- 0.5%
- 6) LAVORABILITÀ AL GETTO: S5
- 7) CONTENUTO MINIMO DI CEMENTO: 360 Kg/m<sup>3</sup>
- 8) TIPO/CLASSE DI CEMENTO: CE III/A 42.5R
- 9) CLASSE DI CONTENUTO DI CLORURI DEL CALCESTRUZZO: Cl 0.2
- 10) DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO: 32 mm
- 11) CLASSE DI CONTENUTO DI SOLFATI DELL'AGGREGATO: AS 0.2
- 12) CLASSE DI RESISTENZA AL GELO DELL'AGGREGATO: F<sub>1</sub> o MS<sub>18</sub>
- 13) ASSENZA DI MINERALI NOCIVI E DI POTENZIALE REATTIVITA' AGLI ALCALI (EN 12620 E UNI 8520/2)
- 14) COPRIFERRO NOMINALE: 50 mm (tolleranza 10 mm)
- 15) DURATA MINIMA DELLA MATURAZIONE UMIDA: 7 GIORNI
- 16) CONTROLLO DELL'ESECUZIONE DELL'OPERA: C(x/y)<sub>opera</sub> > 0.85 C(x/y)  
(La resistenza caratteristica in opera in accordo alla EN 12504-1 deve risultare > 34 N/mm<sup>2</sup>).



Gruppo Cementirosi S.p.A.

## 46 IL MIX DESIGN DEL CALCESTRUZZO

**R**ecipite le prescrizioni di capitolato redatte dal Progettista/Direttore Lavori, esiste la necessità, da parte del produttore di calcestruzzo, di tradurre le specifiche prestazionali in una "ricetta" di conglomerato cementizio (in termini di quantitativi per metro cubo, dei vari ingredienti disponibili) che sia in grado di soddisfarle. Questa operazione di definizione della ricetta a partire dalle specifiche prestazionali reologiche, meccaniche e di durabilità, avviene attraverso un procedimento di *Conceptual Mix-Design*.

### **FASE 1: CALCOLO DELL'ACQUA DI IMPASTO**

Alla lavorabilità del calcestruzzo richiesta al momento del getto - necessaria per effettuare agevolmente la posa nei casseri senza ricorrere a dannose riaggiunte di acqua in cantiere - occorrerà sommare la perdita di lavorabilità subita durante il trasporto del calcestruzzo dalla centrale di betonaggio in cantiere. Il produttore, quindi, ha la necessità di produrre l'impasto con una consistenza maggiore di quella richiesta al getto per tener conto di questa inevitabile perdita di fluidità dell'impasto durante il trasporto. In sostanza, quindi, il fornitore del conglomerato dovrà confezionare l'impasto con una lavorabilità ( $L_m$ ) che ridotta per effetto della perdita durante il trasporto ( $\Delta L$ ) consenta di arrivare sul cantiere con il livello di consistenza richiesta per il getto ( $L_g$ ) e specificato dal progettista nel capitolato.

La perdita di lavorabilità risulta funzione di una serie di parametri, quali:

- **la temperatura:** temperature elevate determinano sia una maggiore evaporazione di acqua dall'impasto, che un'accelerazione del processo di idratazione del cemento e di conseguenza la perdita di lavorabilità del calcestruzzo sarà più rapida all'aumentare della temperatura ambientale;

- **il tempo che intercorre dal mescolamento del calcestruzzo al momento in cui lo stesso viene posto in opera:** più lungo è il tempo di trasporto e getto e maggiore, a pari temperatura del conglomerato, sarà la perdita di acqua per evaporazione e quella impegnata nella reazione di idratazione del cemento, conseguentemente maggiore sarà la perdita di lavorabilità;

- **dal tipo e dalla classe di cemento:** a pari temperatura e tempo che intercorre tra il mescolamento del calcestruzzo e il getto, la perdita di lavorabilità viene accentuata impiegando cementi di tipo Portland o Portland di miscela rispetto a quella evidenziata dagli impasti confezionati con cementi pozzolanici, d'altoforno o compositi;

- **dal tipo di additivo utilizzato** per il confezionamento dell'impasto: esistono sul mercato additivi superfluidificanti che, oltre al potere di riduzione dell'acqua di impasto a pari lavorabilità  $L_m$ , sono capaci di limitare fortemente la perdita di lavorabilità durante il trasporto. Relativamente a questo aspetto, gli additivi di natura acrilica consentono, soprattutto ad elevati dosaggi, di eliminare quasi completamente la perdita di fluidità per circa 60-90 minuti, senza penalizzare significativamente lo sviluppo delle resistenze alle brevi stagionature e, quindi, senza ritardare i tempi di scassero e disarmo dei getti.



In definitiva, quindi, il produttore di calcestruzzo, noto il tempo necessario per raggiungere il cantiere, la temperatura ambientale, il tipo e la classe di cemento, il tipo ed il dosaggio di additivo può stabilire con sufficiente precisione quale sarà la perdita di lavorabilità del calcestruzzo. Pertanto, partendo dalla lavorabilità specificata in capitolato per l'esecuzione del getto può definire la classe di consistenza del conglomerato al momento della miscelazione. Durante il periodo estivo, quando la perdita di lavorabilità è molto accentuata, il produttore potrà utilizzare i seguenti accorgimenti:

- impiegare un cemento povero in clinker caratterizzato da una minore perdita di slump;
- usare additivi con un maggior potere ritardante oppure aumentare il dosaggio di additivo;
- in casi eccezionali si può concordare con la Direzione Lavori una diminuzione della lavorabilità richiesta al getto;
- in climi particolarmente caldi e per tempi di trasporto relativamente lunghi si può prendere in esame la possibilità di sostituire parte dell'acqua di impasto con chips di ghiaccio per abbassare la temperatura del calcestruzzo.

Nota la lavorabilità al momento della miscelazione è possibile calcolare il quantitativo di acqua di impasto necessario per conseguirla. L'acqua di impasto risulta funzione della dimensione massima dell'aggregato: all'aumentare della pezzatura massima dell'aggregato diminuisce la superficie specifica da bagnare e, conseguentemente, minore sarà il quantitativo di acqua da impiegare. Ovviamente, il quantitativo di acqua di impasto, a pari dimensione massima dell'aggregato, aumenta quanto maggiore è il livello di lavorabilità richiesto per il calcestruzzo al termine della miscelazione. Inoltre, i valori dell'acqua di impasto debbono essere opportunamente corretti per tener conto dell'influenza esercitata dalla:

- **forma degli aggregati:** a parità di dimensione massima, aggregati tondeggianti, per il minor attrito esercitato durante il movimento dei granuli, ma anche per la minore superficie specifica rispetto ad uno proveniente da frantumazione, richiedono mediamente un contenuto di acqua minore di circa 20 Kg/m<sup>3</sup> rispetto agli aggregati frantumati;

- **tessitura degli aggregati:** a parità di dimensione massima e di forma il dosaggio d'acqua deve essere ridotto per tessiture lisce tipiche di un calcare di circa 10 Kg/m<sup>3</sup> rispetto a quella richiesta per aggregati a tessitura rugosa;

- **la percentuale di sabbia:** prevedendo di confezionare impasti in cui la miscela di aggregati possieda percentuali di sabbia maggiori (sovrassabbiati) o minori (sottosabbiati) i valori dell'acqua di impasto possono essere aumentati o ridotti rispettivamente di 5 Kg/m<sup>3</sup>;

- **la presenza di additivi aeranti:** il sistema di microbolle generato dall'impiego di un additivo aerante quando è necessario produrre calcestruzzi resistenti al gelo destinati ad opere che ricadono nelle classi di esposizione ambientale XF2, XF3 ed XF4, determina un miglioramento delle proprietà di flusso del calcestruzzo con il risultato che l'acqua di impasto necessaria per conseguire una determinata lavorabilità risulta all'incirca del 5% più bassa di quella per un calcestruzzo non aerato;

- **la natura e il dosaggio degli additivi riduttori e super-riduttori di acqua:** le riduzioni dell'acqua di impasto variano da un minimo del 5% tipiche di additivi fluidificanti ad un massimo del 35% circa impiegando superfluidificanti a base acrilica dosati all'1.8%.

#### DOSAGGIO ACQUA D'IMPASTO DIPENDE DA:

LAVORABILITÀ ALLA MISCELAZIONE

DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO

TESSITURA DEGLI AGGREGATI

FORMA DEGLI AGGREGATI

QUANTITATIVO DI SABBIA

PRESENZA DI ADDITIVI AERANTI

TIPO E DOSAGGIO DI ADDITIVO FLUIDIFICANTE/SUPERFLUIDIFICANTE



Gruppo Cementirosi S.p.A.

### **FASE 2: CALCOLO DEL DOSAGGIO DI CEMENTO**

In base alle informazioni sopra riportate il produttore è in grado di stabilire il quantitativo di acqua di impasto necessario per conseguire la lavorabilità desiderata. Stabilito il quantitativo di acqua di impasto e noto il rapporto acqua/cemento (fissato in base ai requisiti meccanici e di durabilità richiesti per il conglomerato), risulta automaticamente definito anche il dosaggio di cemento (c). Il dosaggio di cemento calcolato dovrà essere, quindi, confrontato con quello minimo imposto dalle norme UNI EN 206 e UNI 11104 per il rispetto dei requisiti di durabilità. Se esso dovesse risultare inferiore, occorrerà adottare un dosaggio di cemento pari a quello imposto dalle norme. In tal caso, esistono due possibilità:

- procedere al calcolo del rapporto a/c e riformulare tutte le specifiche di capitolato in termini di resistenza;
- ridurre il dosaggio di additivo fluidificante/superfluidificante e conseguentemente, a pari lavorabilità, aumentare l'acqua di impasto lasciando invariato il rapporto acqua/cemento.

### **FASE 3. CALCOLO DEL VOLUME DI AGGREGATI**

Noto il dosaggio di cemento, il quantitativo di acqua di impasto e la pezzatura massima dell'aggregato è possibile calcolare il volume di aggregati totali ( $V_{AGG}$ ) da utilizzare per il confezionamento dell'impasto sottraendo a 1000 litri di calcestruzzo il volume occupato da tutti gli altri ingredienti inclusa l'aria. La massa totale degli aggregati si otterrà moltiplicando il volume degli aggregati per la massa volumica media del granulo in condizioni s.s.a.. Ovviamente il produttore dovrà stabilire come ripartire il volume complessivo degli aggregati tra le varie pezzature disponibili. Questa ottimizzazione viene effettuata riproducendo al meglio la curva granulometrica ottimale prescelta in relazione al tipo di calcestruzzo da confezionare.



Gruppo Cementirossi S.p.A.

# 47

## I CALCESTRUZZI LEGGERI

**I calcestruzzi leggeri** hanno massa volumica inferiore a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , minore di quella dei calcestruzzi normali ( $\approx 2250\text{-}2400 \text{ Kg/m}^3$ ), per la presenza all'interno del conglomerato di un sistema di vuoti ottenuto:

- sostituendo in parte o in toto gli aggregati normali con aggregati leggeri caratterizzati da una struttura fortemente porosa e, quindi, da una massa volumica media del granulo inferiore rispetto a quella degli aggregati normali. Questi conglomerati vengono identificati con il termine di **calcestruzzi con aggregati leggeri** o semplicemente di calcestruzzi leggeri;

- realizzando all'interno della matrice cementizia un sistema di bolle di aria ricorrendo all'impiego di schiume, di additivi aeranti oppure di sostanze capaci di sviluppare gas in ambiente alcalino. Generalmente, questi impasti vengono realizzati con soli aggregati fini (sabbie) e vengono identificati con il termine di **calcestruzzi cellulari** (in realtà più correttamente si dovrebbe parlare di malte cellulari) in quanto la loro microstruttura è contraddistinta da vuoti di dimensione micronica non comunicanti.

Indipendentemente dalle modalità con cui viene conseguito il sistema di vuoti nel calcestruzzo leggero, in via del tutto generale si può affermare che:

**A)** i calcestruzzi leggeri presentano minori prestazioni meccaniche rispetto a quelle dei calcestruzzi normali. La resistenza meccanica a compressione (ma anche quella a trazione, l'aderenza acciaio/calcestruzzo, etc.) risulta, a pari rapporto a/c, tanto minore quanto più è bassa la massa volumica del conglomerato;

**B)** i calcestruzzi leggeri presentano un minor modulo di elasticità rispetto ai conglomerati normali che in elementi orizzontali soggetti a flessione e taglio, a parità di carico e luce, si concretizza in una maggiore deflessione. Tuttavia, è da evidenziare che la minore rigidità costituisce un vantaggio in quanto attenua gli stati coattivi generati da impedimenti alla contrazione da ritiro termo-igrometrico;

**C)** rispetto ai calcestruzzi di massa volumica normale quelli leggeri sono contraddistinti da un maggior ritiro idraulico e da una più elevata deformazione viscosa. Effetti di cui si deve tener conto nell'eventuale realizzazione di elementi in calcestruzzi leggero pre-compresso per la maggiore perdita di tiro nei cavi da precompressione;

**D)** l'alleggerimento della massa rispetto ai conglomerati normali rende i calcestruzzi leggeri particolarmente indicati in quei contesti laddove la riduzione dei pesi propri degli elementi strutturali è uno degli obiettivi predominanti da conseguire nella progettazione strutturale (strutture in zona sismica);

**E)** la struttura cellulare conferisce al materiale eccellenti proprietà di isolamento termico. Perciò, i conglomerati leggeri posseggono una maggiore resistenza al fuoco e vengono utilizzati per pareti tagliafuoco, come materiale di riempimento nei solai, nelle coperture o nelle intercapedini delle pareti oppure per la realizzazione di intonaci coibenti.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Principali proprietà del calcestruzzo leggero in raffronto con quelle del conglomerato di massa volumica normale.

PROPRIETÀ	RAFFRONTO CON CALCESTRUZZI NORMALI
LAVORABILITÀ	Maggiore perdita di lavorabilità durante il trasporto
POSA IN OPERA	Maggiore difficoltà nella messa in opera con pompa
SEGREGAZIONE	Tendenza al galleggiamento degli aggreganti leggeri
RESISTENZA A COMPRESIONE E TRAZIONE, ADERENZA ACCIAIO/CLS	Minore rispetto ai calcestruzzi normali (valori tanto più bassi al diminuire della massa volumica del calcestruzzo)
MODULO ELASTICO	Minore (maggiore deformabilità degli elementi ma minore sforzi di coazione)
RITIRO E DEFORMAZIONE VISCOSA	Maggiore (più elevata perdita di tiro nei cavi da precompressione)
MASSA VOLUMICA	Minore (riduzione dei pesi propri e delle forze orizzontali dovute al sisma)
RESISTIVITÀ TERMICA E RESISTENZA AL FUOCO	Maggiore (impiego nelle pareti tagliafuoco e come materiali di riempimento per maggiore isolamento)

### Calcestruzzi con aggregati leggeri

La massa volumica del calcestruzzo con aggregati leggeri oscilla in un intervallo molto ampio; in linea di massima, nei conglomerati per usi strutturali varia nell'intervallo 1700-1850 kg/m<sup>3</sup> e per usi non strutturali si attesta tra 1200-1600 kg/m<sup>3</sup>. I conglomerati confezionati con polistirolo, perlite o vermiculite posseggono masse volumiche inferiori a 1000 kg/m<sup>3</sup> con i valori più ricorrenti che si attestano tra 300 e 600 kg/m<sup>3</sup>.

Si ricordi che la resistenza a compressione di un conglomerato leggero è inversamente proporzionale alla sua massa volumica. Pertanto, i conglomerati leggeri ad uso strutturale per la maggiore massa volumica hanno maggiore resistenza caratteristica a compressione (20-40 N/mm<sup>2</sup>), per i calcestruzzi con aggregati leggeri per caldane e massetti la resistenza a compressione media diminuisce (10-25 N/mm<sup>2</sup>) fino a raggiungere i minimi valori negli impasti con perline di polistirolo, perlite o vermiculite (0.7-1.2 N/mm<sup>2</sup>) con masse volumiche di 300 kg/m<sup>3</sup>.

Relativamente alla resistenza a trazione il calcestruzzo leggero possiede valori inferiori di questa caratteristica rispetto a quelli di un conglomerato ordinario di pari resistenza a compressione. In linea di massima, la diminuzione della resistenza a trazione, almeno per i calcestruzzi leggeri strutturali, è dell'ordine del 20-30% rispetto al valore del calcestruzzo ordinario di pari resistenza a compressione.

Le tensioni di aderenza acciaio/calcestruzzo ( $\tau_{ad}$ ) risultano ridotte del 20% rispetto a quelle evidenziate da un conglomerato ordinario di pari resistenza a compressione e pertanto sarà necessario aumentare le lunghezze di ancoraggio delle barre e la sovrapposizione delle stesse per poter compensare la minore  $\tau_{ad}$ .

Il modulo elastico del conglomerato leggero, al pari della massa volumica e della resistenza a compressione, oscilla in un intervallo molto ampio in funzione della rigidità degli aggregati utilizzati e del volume che essi occupano nell'impasto. Per i calcestruzzi leggeri ad uso strutturale, confezionati con sabbie naturali e aggregato grosso leggero di argilla

espansa, il modulo elastico è compreso all'incirca tra  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  del modulo elastico di un conglomerato ordinario di pari resistenza a compressione. Ad esempio, il modulo elastico di un calcestruzzo ordinario con una resistenza caratteristica a compressione di 35 N/mm<sup>2</sup> vale all'incirca 33000 N/mm<sup>2</sup>. Il modulo elastico del calcestruzzo leggero di pari resistenza caratteristica e massa volumica di 1800 kg/m<sup>3</sup> si ottiene moltiplicando questo valore per  $(1800/2400)^2$  ottenendo per il modulo di Young un valore di circa 18600 N/mm<sup>2</sup>.

A pari rapporto a/c e i/c, il conglomerato leggero evidenzierà rispetto ad un conglomerato normale un ritiro tanto maggiore quanto meno rigido è l'aggregato e, quindi, sostanzialmente, quanto più bassa è la sua massa volumica. In linea di massima nei calcestruzzi leggeri ad uso strutturale si ammette che il ritiro idraulico sia all'incirca del 50% superiore rispetto a quello di un conglomerato ordinario di pari resistenza a compressione. Per la ridotta rigidità degli aggregati leggeri anche la deformazione viscosa dei calcestruzzi leggeri è maggiore di quella di un conglomerato ordinario di pari resistenza a compressione. In linea di massima per i calcestruzzi leggeri strutturali la deformazione viscosa per unità di sforzo può risultare da 2 a 3 volte maggiore di quella del conglomerato ordinario di pari resistenza a compressione.

I calcestruzzi leggeri presentano in genere proprietà di isolamento termico migliori rispetto ai calcestruzzi normali. I fattori che influiscono maggiormente sulla capacità isolante sono:

- volume di aria (porosità): all'aumentare del volume dei pori aumenta la capacità isolante in quanto l'aria è un ottimo isolante termico;
- grandezza e distribuzione dei pori: le proprietà di isolamento termico migliorano, se a parità di volume di pori, gli stessi sono di piccole dimensioni e distribuiti uniformemente nella massa del conglomerato;
- tenore di umidità del materiale: un materiale poroso asciutto possiede eccellenti proprietà di isolamento termico; per contro, lo stesso materiale con tutte le porosità sature di acqua perderebbe gran parte delle sue capacità isolanti;
- la caratteristica termoisolante dell'aggregato, funzione della composizione chimica e della struttura dello stesso, che può provocare una variazione della conducibilità termica, anche a parità di massa volumica.

I calcestruzzi leggeri possiedono inoltre maggiori capacità di isolamento termico, in quanto tale proprietà è funzione della sua massa volumica: minore è la massa volumica e più bassa risulta la conducibilità termica del materiale. A parità di massa volumica, interviene, anche la natura dell'aggregato leggero a definire le proprietà di isolamento termico del conglomerato. In Tabella sono riportati alcuni valori della conducibilità di un betoncino ( $D_{max}$  8 mm) leggeri di differente massa volumica confezionati con argille espanse e per confronto l'analoga prestazione per un betoncino ordinario contenente aggregati di natura calcarea. Come si può notare, la conducibilità termica dei betoncini leggeri diminuisce con la massa volumica. La Tabella che segue indica, inoltre, che il massetto realizzato con un betoncino ordinario per garantire stessa resistenza termica di un massetto in betoncino alleggerito ( $m_v=1400$  kg/m<sup>3</sup>) di spessore 47 mm deve possedere uno spessore di 133 mm.

*Massa volumica e conducibilità termica di betoncini leggeri e normali per caldane e spessore del massetto per ottenere stessa resistenza termica. Si riportano anche i valori indicativi della resistenza a compressione.*

AGGREGATO	MASSA VOLUMICA (kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENZA A COMPRESIONE (N/mm <sup>2</sup> )	CONDUCIBILITÀ TERMICA (W/(m°C))	SPESSORE PER OTTENERE STESSA RESISTENZA TERMICA (mm)
Ghiaia e sabbie calcaree	2200	30	1.20	133
Argilla espansa	1400	25	0.42	47
Argilla espansa	1600	35	0.54	60
Argilla espansa	1700	38	0.65	70

Confrontando la conducibilità termica di malte confezionate con aggregati di polistirolo, perlite o sughero rispetto a quella di una malta cellulare e di uno strato sciolto di perlite sfusa, dalla tabella che segue si può notare come essa sia di gran lunga inferiore rispetto a quella dei betoncini con argilla espansa. Pertanto, questi conglomerati si prestano per essere convenientemente utilizzati quale materiale di riempimento delle intercapedini delle pareti o nei solai di copertura per migliorare la coibenza termica dei fabbricati. È interessante, altresì, notare come una malta di polistirolo di massa volumica pari a 300 kg/m<sup>3</sup> possieda una proprietà di isolamento termico di gran lunga maggiore di quello della perlite sciolta. Perché quest'ultima garantisca la stessa resistenza termica di uno spessore di malta di polistirolo di 50 mm, infatti, è necessario che lo spessore dello strato di materiale sciolto risulti di 340 mm.

*Massa volumica e conducibilità termica di malte leggere confezionate con diversi tipi di aggregato per il riempimento di intercapedini e per strati di isolamento su coperture e solai. Per confronto sono riportati i dati di un riempimento realizzato con granuli di perlite sciolta. Si riportano anche i valori indicativi della resistenza a compressione.*

AGGREGATO	MASSA VOLUMICA (kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENZA A COMPRESIONE (N/mm <sup>2</sup> )	CONDUCIBILITÀ TERMICA (W/(m°C))	SPESSORE PER OTTENERE STESSA RESISTENZA TERMICA (mm)
Polistirolo	300	1.0	0.080	50
Polistirolo	600	1.2	0.130	80
Cellulare con schiuma	400	1.0	0.355	220
Perlite	400 - 650	0.7 - 0.2	0.130 - 0.121	78
Perlite sfusa	120	-	0.549	340
Sughero	500	3.0	0.085	53

I calcestruzzi leggeri presentano una migliore capacità, rispetto a quelli ordinari, di abbattere i rumori grazie alla struttura cellulare che li contraddistingue. Sono in particolare i conglomerati prodotti con aggregati leggeri a cellule chiuse (perline di polistirolo) a possedere le migliori capacità fonoassorbenti e per ciò impiegati per la realizzazione di strati fono-isolanti per gli elementi di partizione orizzontale. L'isolamento acustico dei solai può ulteriormente essere incrementato se dopo la realizzazione del riempimento con malte contenenti polistirolo si realizzano le caldane (massetti) ricorrendo all'utilizzo di aggregati leggeri a base di argille espanse.

Grazie alla minore conducibilità termica, i calcestruzzi leggeri prodotti con aggregati non organici sono molto resistenti al fuoco. La maggiore resistenza alle alte temperature

discende anche dalla maggiore stabilità dell'aggregato leggero che durante la produzione è stato assoggettato ad elevate temperature di cottura. Anche questa proprietà è influenzata dalla massa volumica del calcestruzzo: la resistenza al fuoco cresce al diminuire della massa volumica del conglomerato. In linea di massima nei calcestruzzi prodotti con argilla espansa il tempo necessario a raggiungere una temperatura prefissata sulla parete opposta a quella di un elemento di un certo spessore (ad esempio 100 mm), per effetto dell'applicazione di un fonte di calore sulla parete opposta, raddoppia se in luogo di un conglomerato ordinario viene impiegato calcestruzzo leggero di massa volumica pari a 1700 kg/m<sup>3</sup> circa.

La capacità del calcestruzzo leggero di resistere alle azioni aggressive promosse dall'ambiente dipende dagli stessi parametri che influenzano la durabilità dei conglomerati tradizionali. Pertanto, per realizzare strutture in calcestruzzo leggero durevoli valgono gli stessi accorgimenti da adottare per quelle in calcestruzzo ordinario (adozione di rapporti a/c relativamente bassi, sufficiente spessore del copriferro e maturazione umida dei getti per almeno 7 giorni).

### **Calcestruzzi aerati o cellulari**

Con questo nome vengono designati quei calcestruzzi che nella loro massa presentano una quantità di piccole bolle d'aria non comunicanti tra loro: la massa assume cioè una struttura cellulare simile a quella di una spugna. L'introduzione di aria può essere ottenuta con due sistemi sostanzialmente diversi:

**A)** sviluppo di gas mediante reazione chimica nella pasta o malta, mentre questa si trova allo stato liquido o plastico. Questo sistema si realizza in stabilimento, congiuntamente alla maturazione artificiale in autoclave con vapore ad alta pressione per ottenere manufatti vari, come blocchi per murature isolanti;

**B)** introduzione di aria dall'esterno, mediante aggiunta alla miscela di una schiuma preformata o aggiunta di un additivo aerante. Questo sistema si presta all'esecuzione di calcestruzzi cellulari la cui maturazione avviene solitamente all'aria; gli impieghi più comuni sono i sottofondi isolanti per pavimenti, le pendenze di terrazze e tutti i casi nei quali è necessario ottenere un forte effetto isolante.

Massa volumica e resistenza a compressione sono variabili secondo il tipo di miscela: all'aumentare della massa volumica aumenta la resistenza a compressione. La massa volumica varia nell'intervallo 200 - 300 kg/m<sup>3</sup> per miscele senza aggregati naturali, sino a valori compresi generalmente fra 500 e 1000 kg/m<sup>3</sup> per miscele con l'aggiunta di sabbia di massa volumica normale. La resistenza a compressione di appena 1 N/mm<sup>2</sup> per le miscele senza sabbia maturate all'aria, può raggiungere valori di 30-50 N/mm<sup>2</sup> per gli impasti sottoposti al trattamento a vapore in autoclave.

I calcestruzzi cellulari sono soggetti a ritiro idraulico e deformazione viscosa superiori a quelle dei calcestruzzi normali di pari resistenza, causa la preponderante presenza della pasta di cemento, principale responsabile dei fenomeni lenti. La stagionatura in autoclave può ridurre le deformazioni a valori simili a quelli dei calcestruzzi normali, circostanza molto importante perché limita i pericoli di fessurazione dei manufatti.

Sia le proprietà di isolamento termico che la resistenza al fuoco dei calcestruzzi cellulari sono eccellenti e variano in rapporto alla massa volumica. In linea di massima, la conducibilità termica varia nell'intervallo 0.080-0.20 W/(m°C) per masse volumiche comprese tra 300 e 800 kg/m<sup>3</sup>. Grazie alla ridotta massa volumica e alla struttura cellulare i calcestruzzi aerati posseggono eccellenti capacità di resistenza al fuoco superiore a quella dei conglomerati leggeri con argilla espansa.

L'impiego più comune del calcestruzzo cellulare è come strato isolante termico e come barriera al fuoco. Come isolante nei pavimenti, solai ed elementi di copertura: gli strati

devono essere protetti in superficie con una pellicola impermeabile, ad esempio asfalto, e bisogna evitare che si formino fessurazioni.

Con i calcestruzzi cellulari autoclavati si ottengono manufatti vari, in particolare blocchi da muratura per pareti. I blocchi allo stato asciutto possono essere murati con malta normale o leggera, oppure con prodotti collanti; le pareti devono essere intonacate o comunque protette contro la penetrazione della pioggia o dell'umidità in genere. I giunti, che possono costituire ponti termici, devono essere realizzati con malta isolante, oppure con collante a strato sottile. Gli elementi possono essere più grandi, perché più leggeri, e sono facilmente tagliati e chiodati; è possibile anche realizzare pannelli o lastre. Se si impiega armatura metallica, questa deve essere protetta contro la corrosione perché il ricoprimento di calcestruzzo non è efficace nell'impedire la penetrazione dell'anidride carbonica e il conseguente fenomeno di ossidazione delle barre.



Gruppo Cementirosi S.p.A.



## I CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Con il termine di **calcestruzzi fibrorinforzati** (o fibrosi) si identificano quei conglomerati prodotti impiegando oltre alle tradizionali materie prime un rinforzo discreto costituito di fibre di diversa natura la cui lunghezza è generalmente compresa fra 10 e 80 mm e il cui diametro varia da una decina di micrometri a circa 1 mm. Alla fine degli anni '40 fecero la loro comparsa (Stati Uniti) le fibre di acciaio, successivamente, anni '60, apparirono le fibre di vetro e poi quelle organiche provenienti da trattamenti di sintesi. Recentemente sono state utilizzate nella produzione del calcestruzzo anche fibre di ghisa, di ottone, poliolefiniche, etc., tuttavia, ad oggi si fa ricorso principalmente alle fibre di acciaio, di vetro, in polipropilene e in poliacrilonitrile.

Le **fibre di acciaio**, sono disponibili in forma di aghi di diversa conformazione geometrica: a sezione circolare o rettangolare, ad estremità piegate, dentate, etc. con diametro equivalente<sup>49</sup> compreso fra 0.4 e 1.2 mm e lunghezza variabile tra 25 e 80 mm. Esse, a seconda delle prestazioni da conseguire, vengono aggiunte in misura variabile da 25 fino a 150 kg/m<sup>3</sup> di calcestruzzo. Le principali applicazioni dei calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio riguardano:

- la realizzazione di pavimentazioni industriali in calcestruzzo dove le fibre vengono convenientemente impiegate in sostituzione della tradizionale armatura in forma di rete elettrosaldata;
- la realizzazione di conci prefabbricati per i rivestimenti definitivi delle gallerie;
- per i rivestimenti sia provvisori che definitivi realizzati con calcestruzzi spruzzati (shotcrete).

Le **fibre di vetro e quelle di natura organica** (prevalentemente poliacrilonitrile, poliestere e polipropilene) attualmente impiegate si distinguono in:

- **fibre non metalliche strutturali** di lunghezza variabile tra 20 e 60 mm e diametro equivalente di 0.8-1.3 mm aggiunte in quantità comprese fra 2.5 e 6.0 Kg/m<sup>3</sup> per la produzione di conglomerati destinati alle stesse applicazioni di quelli prodotti con le fibre di acciaio;
- **fibre non metalliche non strutturali** di lunghezza variabile da 10 a 30 mm e diametro di 0.01-0.02 mm aggiunte in misura di 0.8-1.2 kg/m<sup>3</sup> per la realizzazione di calcestruzzi destinati prevalentemente a solette e pavimenti di piccolo spessore per attenuare il rischio fessurativo derivante dal ritiro plastico del conglomerato.

Le proprietà del calcestruzzo a seguito dell'aggiunta di fibre si valutano, in accordo alla norma UNI EN 14651, sottoponendo dei travetti intagliati ad una prova di flessione a tre punti rilevando i carichi applicati e la corrispondente apertura dell'intaglio praticato nella mezzera della trave.

Dimensioni provini e modalità di prova in accordo alla norma UNI EN 14651 per la determinazione delle tensioni residue di calcestruzzi fibrinforzati

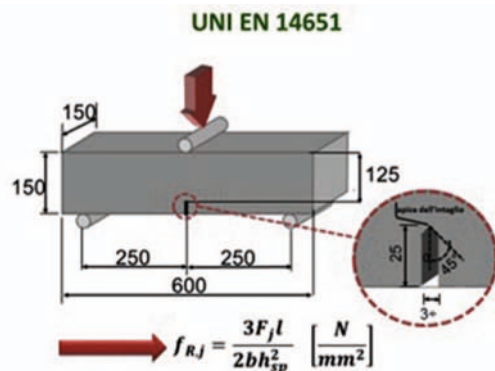
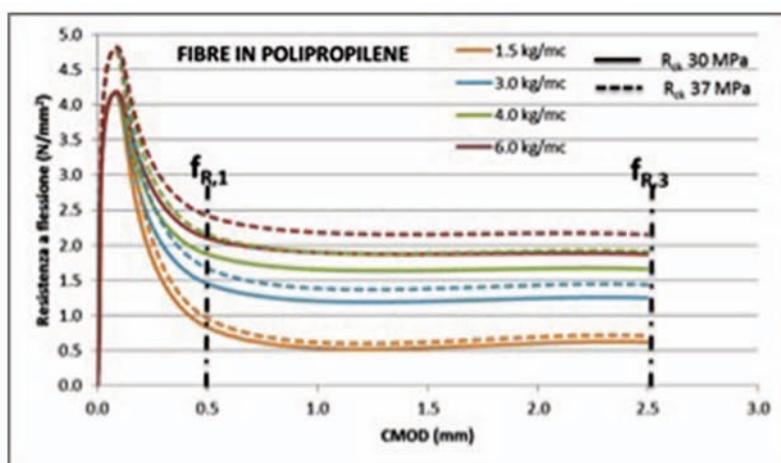


Diagramma carico ( $F$ ) vs apertura dell'intaglio (CMOD) ottenuto su travetti in calcestruzzi con diversa resistenza e rinforzato con fibre in polipropilene a vari dosaggi, in accordo alla norma UNI EN 14651



Indipendentemente dal dosaggio di fibre utilizzato a parità di resistenza del calcestruzzo, il ramo ascendente della curva nel tratto che precede la fessurazione del conglomerato è sostanzialmente identico a quello del calcestruzzo tal quale senza fibre pertanto l'aggiunta delle fibre non modifica le proprietà del calcestruzzo prima della fessurazione. L'andamento della curva, invece, nella fase post-fessurativa dei calcestruzzi fibrinforzati varia rispetto ad un normale calcestruzzo e dipende:

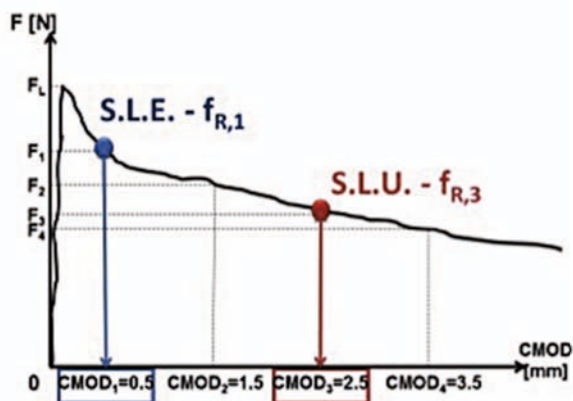
- dalla natura della fibra;
- dalla sua conformazione geometrica;
- dal rapporto di forma o di aspetto (rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente);
- dal dosaggio di fibre nell'impasto.

In particolare, rispetto al calcestruzzo tal quale che evidenzia un comportamento spiccatamente fragile in quanto dopo la comparsa della fessurazione volge immediatamente al collasso, il calcestruzzo fibrinforzato è capace, grazie all'azione di cucitura dei cigli fessurativi, esercitata proprio dalla presenza delle fibre, di sopportare ancora livelli di carico più o meno elevati a seconda del tipo, del dosaggio della conformazione della fibra. In sostanza, l'aggiunta di fibre alla matrice consente di incrementare la duttilità del calcestruzzo e di far sì che essa abbia capacità resistenti anche dopo la fessurazione. Sebbene, il reale andamento della curva nella fase post-fessurativa dipenda, come sopra evidenziato, da una serie di fattori a volte tra loro strettamente collegati da non poterlo generalizzare, tuttavia, si possono riportare alcune considerazioni derivanti dall'introduzione delle fibre nell'impasto sul legame costitutivo del materiale:

- a parità di natura della fibra e di dosaggio la capacità di sopportare livelli di sforzo nella fase post-fessurativa aumenta con il rapporto di forma. Per contro, bisogna ricordare che fibre caratterizzate da elevati rapporti di forma possono determinare drastiche perdite di lavorabilità che costringono a ridurre il dosaggio di rinforzo nella matrice. Questo è il motivo, al di là di aspetti legati al costo, per il quale le fibre non strutturali non metalliche, caratterizzate da un rapporto di forma superiore a quello delle fibre di acciaio o a quello delle stesse fibre strutturali non metalliche, vengono impiegate in misura di 0.8-1.2 kg/m<sup>3</sup> non modificando il comportamento del calcestruzzo nella fase post-fessurativa, che rimane sostanzialmente di tipo fragile. Pertanto, l'aggiunta di fibre non metalliche non strutturali è finalizzato esclusivamente all'eliminazione dei quadri fessurativi dovuti alla precoce perdita di acqua durante la fase plastica soprattutto nelle strutture, quali pavimentazioni e solette, ad elevato sviluppo superficiale;

- a parità di dosaggio e di rapporto di forma della fibra, l'efficienza del rinforzo fibroso dipende dalla conformazione geometrica della fibra stessa ed, in particolare, dalla sua capacità di sfilarsi per valori elevati dello sforzo applicato. Da questo punto di vista le fibre uncinato (quelle cioè che presentano le estremità tipo ferri piegati) si comportano meglio delle fibre dritte. Il miglior comportamento della fibra può essere quantificato, nelle prove di flessione su travetto, in termini di resistenza residua a trazione ( $f_{R,i}$ ). In particolare, per il calcolo progettuale di elementi in calcestruzzo fibrorinforzato si considera la tensione residua  $f_{R,1m}$  (valore medio della resistenza residua a trazione valutata per  $CMOD_1 = 0.5$  mm) per gli SLE ed il valore di  $f_{R,3m}$  (valore medio della resistenza residua a trazione valutata per  $CMOD_3 = 2.5$  mm) per gli SLU.

Diagramma carico (F) vs apertura dell'intaglio (CMOD) ottenuto su travetti in calcestruzzo fibrorinforzato in accordo alla norma UNI EN 14651



- per applicazioni di tipo strutturale è necessario garantire la presenza delle fibre in tutto il volume della struttura, imponendo un valore minimo di tenacità al materiale. Più precisamente, i requisiti minimi per impieghi strutturali del calcestruzzo fibrorinforzato (fib-MC 2010) sono:

$$f_{R,1k} / f_{Lk} < 0.40$$

$$f_{R,3k} / f_{R,1k} < 0.50$$

Resta inteso che le prestazioni minime sopra menzionate non riguardano il calcestruzzo fibrorinforzato impiegato esclusivamente per il controllo della fessurazione da ritiro.

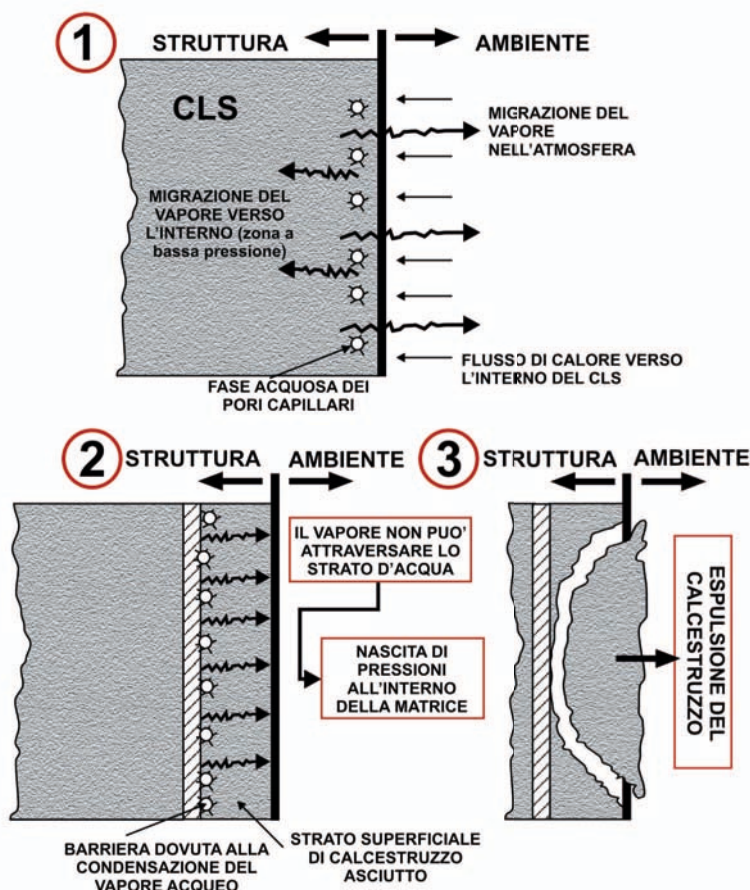
Rispetto ai conglomerati tradizionali la produzione di calcestruzzi fibrorinforzati impone un aumento del volume di pasta di cemento per favorire la dispersione delle fibre nell'impasto riducendo la dimensione massima dell'aggregato lapideo, ad esempio, limitandola a 20 mm e ricorrendo all'aggiunta di ceneri volanti e filler calcarei per aumentare la frazione di pasta in cui le fibre possano disperdersi omogeneamente.

Resta, infine, da segnalare come l'aggiunta di fibre non produca variazioni significative della resistenza a compressione del calcestruzzo che rimane sostanzialmente immutata rispetto a quella di un conglomerato non fibrorinforzato. Allo stesso modo, non subiscono per effetto dell'aggiunta delle fibre variazioni apprezzabili, il modulo elastico, il ritiro idraulico e la deformazione viscosa.

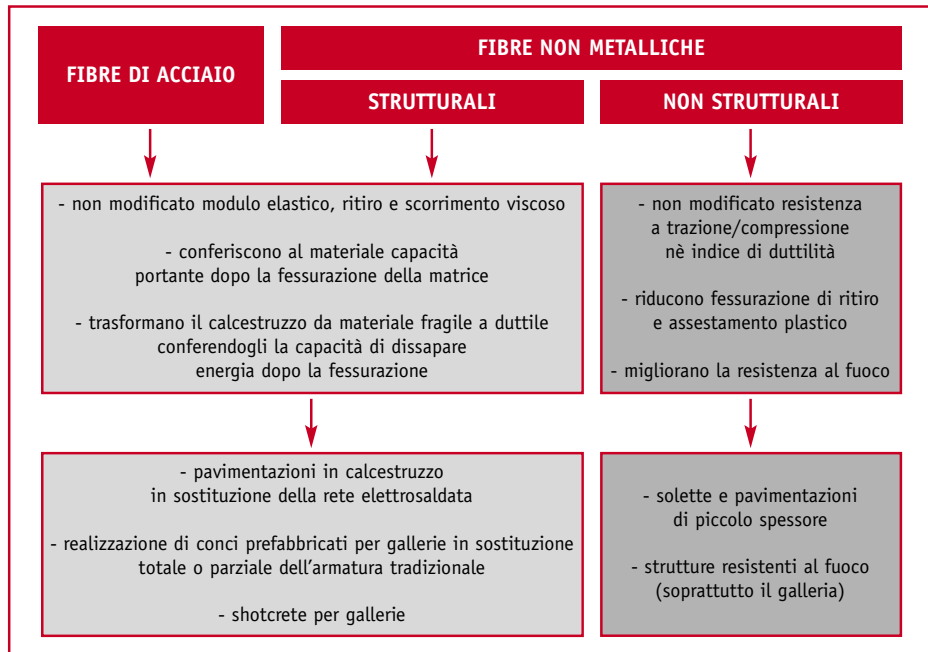
L'impiego di fibre non metalliche non pone problemi relativamente alla durabilità dei manufatti in quanto esse sono praticamente immuni dall'attacco degli aggressivi presenti negli ambienti naturali. Le fibre d'acciaio, invece, a contatto con l'aria o con soluzioni contenenti cloruri possono corrodersi, pertanto vengono preventivamente zincate.

Una interessante applicazione delle fibre non strutturali non metalliche riguarda il miglioramento della resistenza al fuoco delle strutture in calcestruzzo e la riduzione del fenomeno di scoppio ed espulsione delle zone di conglomerato esposte direttamente all'incendio. Questo fenomeno è da ascrivere al fatto che, per effetto dell'aumento di temperatura, la fase acquosa presente nei pori capillari in parte evapora verso l'ambiente esterno e in parte verso l'interno del conglomerato dove può condensare formando uno strato di acqua che impedisce l'ulteriore migrazione di vapore. Questo impedimento genera la nascita di pressioni nella zona corticale di calcestruzzo che, superata la resistenza a trazione del materiale, si rende responsabile del fenomeno di espulsione del conglomerato negli strati corticali. L'aggiunta di fibre non metalliche può ridurre drasticamente il fenomeno di *spalling* grazie al fatto che a seguito dell'innalzamento della temperatura prodotto dall'incendio le fibre fondono lasciando all'interno della matrice cementizia delle porosità aggiuntive in cui il vapore può espandersi riducendone la pressione responsabile dei fenomeni di espulsione del calcestruzzo.

Meccanismo di espulsione del calcestruzzo per effetto dell'incendio.



Modifiche delle proprietà del calcestruzzo derivanti dall'aggiunta di fibre strutturali e non e principali campi di impiego del calcestruzzo fibrorinforzato.



<sup>49)</sup> Il diametro equivalente rappresenta il diametro del cerchio di area uguale a quella della sezione della fibra.

49

## I CALCESTRUZZI ESPANSIVI A RITIRO COMPENSATO

**I calcestruzzi a ritiro compensato** o anche **espansivi** sono conglomerati prodotti ricorrendo all'impiego di materie prime in grado, a contatto con l'acqua, di aumentare di volume. Gli agenti espansivi correntemente impiegati nel settore del calcestruzzo sono quelli a base di:

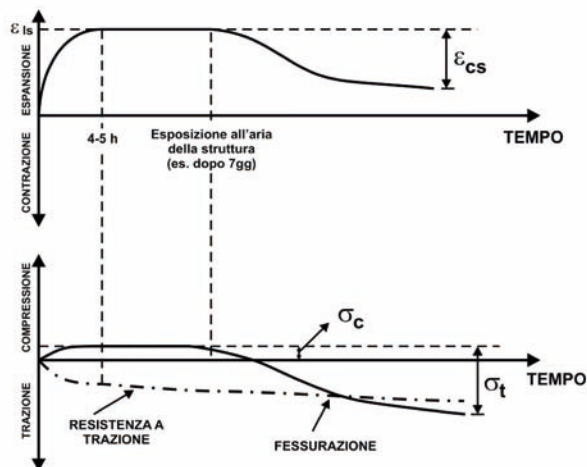
- ossido di calcio (CaO) che produce il corrispondente idrossido;
- solfoalluminato tetracalcico<sup>50</sup> (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S) che origina l'ettringite.

La peculiarità di questi agenti espansivi, che ne rende possibile l'utilizzo nel conglomerato per prevenire il quadro fessurativo derivante dal ritiro idraulico, è rappresentata dal fatto che solo una modesta aliquota dell'espansione si manifesta durante le prime ore dal confezionamento dell'impasto (nella fase in cui il conglomerato è ancora plastico), mentre la maggior parte di essa si esplica ad indurimento avvenuto del calcestruzzo in un arco di tempo che, a seconda della natura e della finezza dell'agente espansivo, varia da 2 a 10 giorni circa. Infatti, se l'espansione avvenisse completamente durante la fase plastica del conglomerato essa produrrebbe un aumento di volume del calcestruzzo che non avrebbe alcun effetto benefico sulla compensazione del ritiro. Per chiarire meglio il significato di questa affermazione è opportuno premettere che l'utilizzo di agenti espansivi non modifica il ritiro idraulico del calcestruzzo: in sostanza il ritiro a tempo infinito, ma anche quello a stagionature più brevi (ad esempio, dopo 3 o 6 mesi), di un calcestruzzo a ritiro compensato è identico a quello dello stesso conglomerato privo di agente espansivo. Per questo motivo, la terminologia spesso adottata per questi conglomerati di **calcestruzzi a ritiro nullo è assolutamente impropria**.

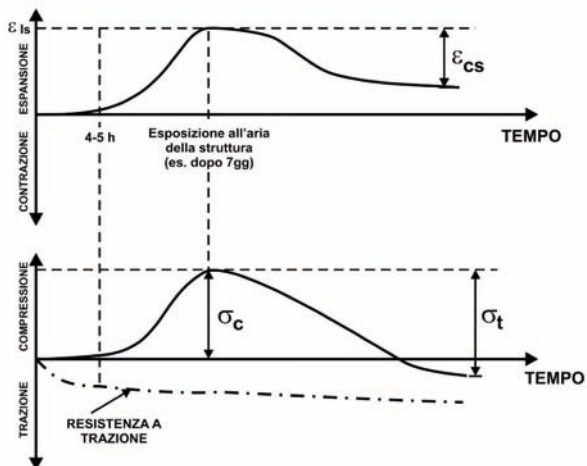
Premesso questo è opportuno ricordare come in un qualsiasi elemento in calcestruzzo armato se non vi è impedimento alla espansione o alla contrazione di volume l'effetto risultante è rappresentato da una mera variazione di geometria dell'elemento strutturale senza la nascita di alcuno stato di coazione interna. Pertanto, se l'agente espansivo aumentasse di volume, ad esempio, dopo 1-3 ore dalla posa in opera del calcestruzzo, non avendo sufficiente rigidità, né aderenza alle barre di armatura, non produrrebbe che un modesto stato di compressione ( $\sigma_c$ ) all'interno dell'elemento in calcestruzzo ingegneristicamente trascurabile anche in presenza di un'espansione rilevante. Quando, successivamente all'esposizione all'aria, il calcestruzzo è interessato dal fenomeno del ritiro, essendo la contrazione ostacolata sia dalla presenza delle armature che dai vincoli esterni, si genera uno stato tensionale di trazione ( $\sigma_t$ ) superiore alla modesta compressione iniziale anche se l'entità del ritiro ( $\epsilon_{cs}$ ), in valore assoluto, è inferiore all'espansione indotta inizialmente. Nel momento in cui la tensione di trazione dopo aver rilassato il modesto sforzo di compressione supera la resistenza del materiale il calcestruzzo si fessura. Se, invece, la reazione espansiva avviene quasi esclusivamente dopo che il conglomerato ha terminato la presa (dopo 6-8 ore), l'aumento di volume è impedito, grazie alla rigidità del calcestruzzo e all'aderenza che lo stesso ha stabilito con la barra d'armatura, dai vincoli interni ed esterni all'elemento strutturale e genera uno stato di compressione ( $\sigma_c$ ) maggiore di quello determinato da un espansivo in fase plastica. Pertanto, quando per effetto dell'esposizione all'aria della struttura il conglomerato sarà assoggettato al ritiro, l'impedimento alla contrazione genererà uno stato di trazione che, però, risulterà inferiore a quello di compressione e alla resistenza a trazione del materiale e, quindi, non sufficiente a promuovere la fessurazione del conglomerato. Quindi, in definitiva modulando opportunamente il dosaggio di agente espansivo, anche in relazione alla contrazione dimensionale attesa per il calcestruzzo, e impiegando prodotti in grado di espandere quasi esclusivamente dopo che il calcestruzzo ha terminato la presa è possibile indurre uno stato di precompressione iniziale capace di fronteggiare il rilassamento dello sforzo dovuto al ritiro in modo da prevenire la fessurazione.



Gruppo Cementirosi S.p.A.



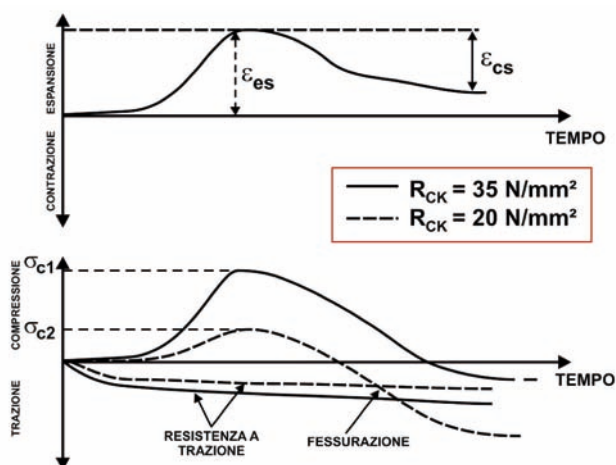
Andamento dell'espansione/contrazione e corrispondente stato di sforzo nel conglomerato confezionato con un agente espansivo non idoneo (che esplica l'aumento di volume in fase plastica) maturato ad umido per 7 giorni.



Andamento dell'espansione/contrazione e corrispondente stato di sforzo nel conglomerato confezionato con un agente espansivo idoneo (che esplica l'aumento di volume dopo che il calcestruzzo ha terminato la presa).

I dosaggi di agente espansivo nel calcestruzzo variano generalmente tra 15 e 35 kg/m<sup>3</sup> e sono sufficienti per contrastare gli effetti del ritiro purché si provveda:

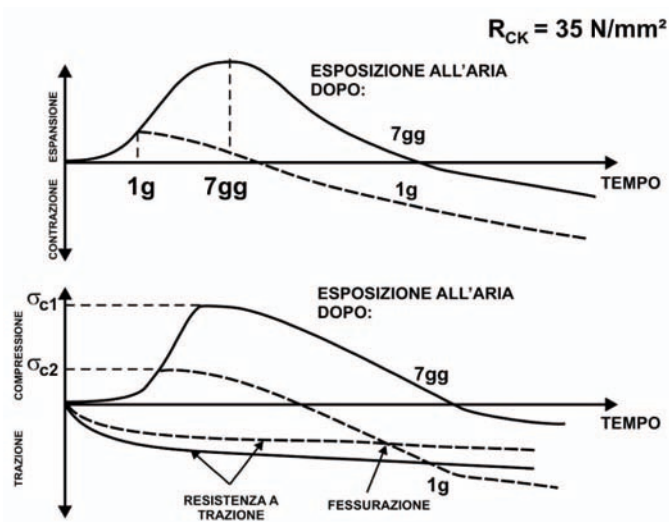
- a confezionare calcestruzzi con una resistenza caratteristica a compressione minima di 35 N/mm<sup>2</sup> : a pari dosaggio e natura dell'agente espansivo, lo sforzo di compressione indotto dall'impedimento all'espansione sarà tanto maggiore quanto più rigido è il conglomerato e maggiore l'aderenza all'acciaio. Queste due proprietà aumentano con la resistenza a compressione del calcestruzzo;
- a garantire una maturazione umida del conglomerato per almeno 7 giorni. Infatti, esponendo il calcestruzzo ad atmosfere asciutte, parte dell'acqua evapora verso l'esterno riducendo l'espansione potenziale e, quindi, lo stato benefico di compressione indotto dal contrasto all'espansione. La mancata bagnatura, inoltre, determina anche una riduzione della resistenza a trazione del conglomerato che oltretutto è assoggettato ad una più giovane età al ritiro e, quindi, allo sforzo di trazione esaltando il rischio di fessurazione degli elementi strutturali;
- a predisporre una opportuna armatura di contrasto all'espansione in forma di fibre strutturali o di ferri di piccolo diametro distribuiti omogeneamente nella sezione dell'elemento strutturale, avendo cura, soprattutto in presenza di copriferro di spessore superiore a 40 mm di disporre una opportuna armatura di pelle in forma di rete elettrosaldata (ad esempio, diametro 6 mm e maglia 10x10 o 20x20 cm).



Influenza della resistenza caratteristica a compressione sullo stato di sforzo indotto dall'impedimento all'espansione (pari natura e dosaggio di agente espansivo).

Relativamente agli impieghi del calcestruzzo a ritiro compensato si segnala che le applicazioni più ricorrenti riguardano:

- la realizzazione di pavimentazioni industriali di estensione variabile tra 600 e 900 m<sup>2</sup> prive di giunti di contrazione o di controllo;
- la produzione di calcestruzzi per la ricostruzione parziale o completa di elementi verticali quali pilastri e setti portanti;
- nel ringrosso strutturale di pile da ponte o di pilastri quando si vuole incrementare sia la portanza che la rigidità. In questo caso, l'utilizzo di calcestruzzo a ritiro compensato è finalizzato a controbilanciare gli effetti derivanti dal differente comportamento deformativo del nucleo originario (che ormai ha già scontato il ritiro) rispetto al ringrosso che deve, invece, ancora scontare la contrazione igrometrica.



Influenza della durata della maturazione umida sull'espansione e sullo stato di sforzo di un conglomerato a ritiro compensato.

50

## LE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO

**L**e pavimentazioni industriali sono piastre di calcestruzzo normalmente rifinite in superficie da uno strato antiusura dotato di elevata resistenza all'abrasione. Possono essere realizzate sia all'interno che all'esterno, direttamente a contatto con il terreno, su solai o pavimenti esistenti ed essere non oppure armate (con reti elettrosaldate o con fibre strutturali). La realizzazione di una pavimentazione in calcestruzzo priva di difetti, funzionale per l'intera vita nominale prevista, che richieda una ridotta o assente manutenzione, si basa su un'accurata progettazione strutturale che tenga conto dei carichi in gioco e delle caratteristiche del terreno o del solaio sul quale la stessa poggia. Inoltre, la progettazione deve anche riguardare il corretto dimensionamento, localizzazione e modalità di realizzazione dei giunti. Infine, particolare attenzione deve essere posta nella scelta del calcestruzzo e nella fase di realizzazione che presenta una maggiore difficoltà, rispetto ad altre strutture in c.a., proprio per la necessità di eseguire sulla superficie della pavimentazione lo strato antiusura.



Le pavimentazioni industriali possono essere classificate in funzione:

- del tipo di supporto;
- della destinazione d'uso;
- della resistenza all'abrasione;
- dei materiali utilizzati (calcestruzzo ordinario oppure espansivo armato con rete di armatura e/o fibre metalliche o sintetiche).

La piastra di calcestruzzo può appoggiare su supporti di diversa natura quali massicciata, igloo, lamiera grecata, materassini coibenti, solaio oppure su una pavimentazione già esistente. In generale, quando la pavimentazione poggia su terreno, solitamente s'interpone uno strato di separazione costituito da una barriera vapore con il compito, da un lato, di impedire la risalita di umidità dalla sottostante falda e, dall'altro, di rendere meno dipendente i movimenti della pavimentazione – indotti da fenomeni termo-igrometrici – dal supporto sottostante. Tale accorgimento risulta obbligatorio nel caso in cui:

- si preveda una finitura del pavimento con materiale impermeabile (PAVIMENTI IN RESINA);
- si tema l'insorgere di reazioni degradanti alcali/aggregato all'interfaccia con lo strato antiusura a polveroso;
- gli ambienti e le lavorazioni richiedono un pavimento asciutto (cartiera, mobilificio, etc.).

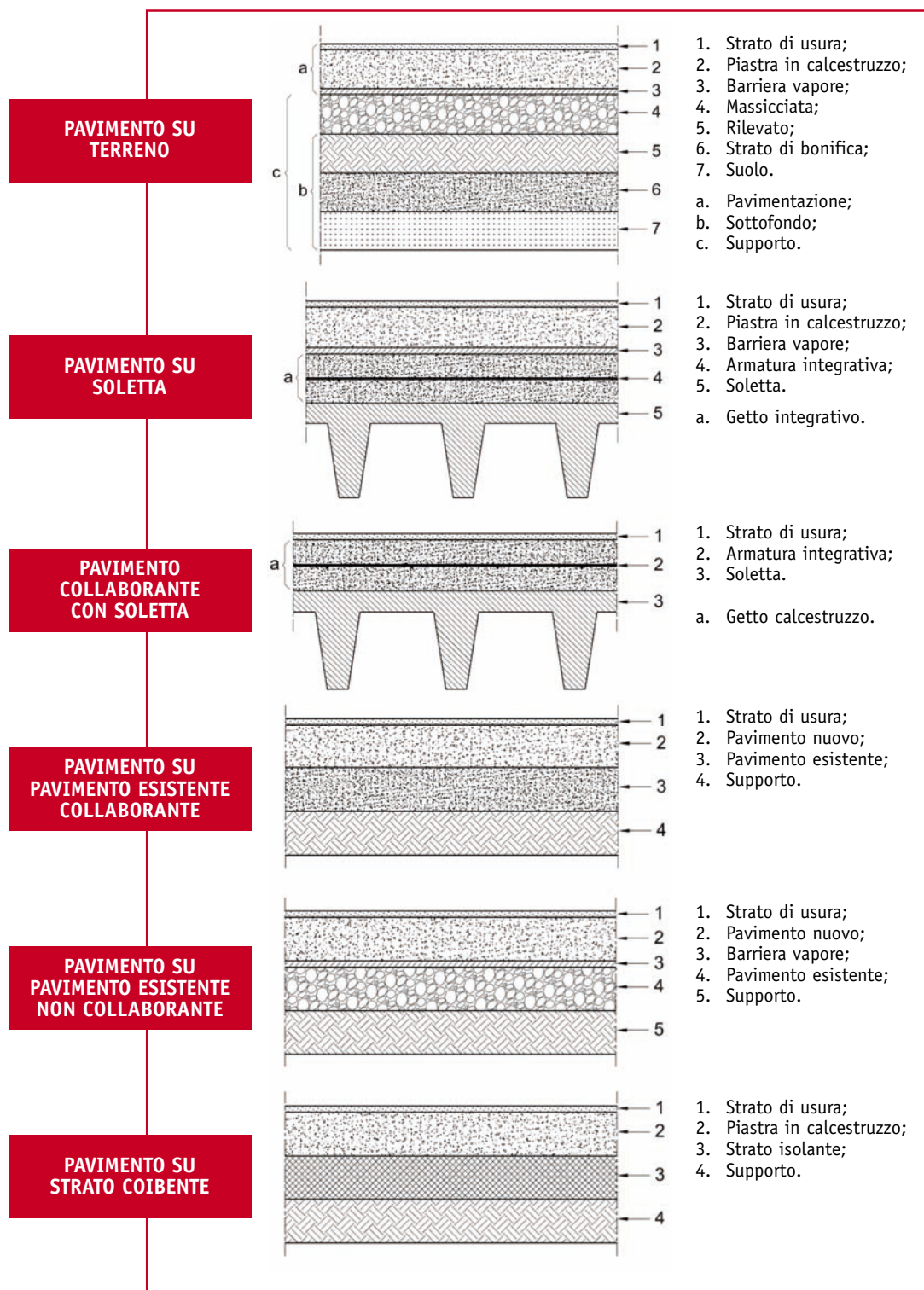
L'utilizzo dei fogli di polietilene, tuttavia, accentua il ritiro differenziale della lastra, gli imbarcamenti che inevitabilmente insorgono e, nel caso in cui si utilizzino miscele scadenti di calcestruzzo, favorisce il bleeding (risalita d'acqua sulla superficie) con la formazione di una zona in superficie meccanicamente più debole per l'elevato rapporto a/c. Pertanto, l'inserimento della barriera a vapore tra massicciata e piastra è uno degli aspetti che il progettista deve considerare sia in fase progettuale che realizzativa, prescrivendo calcestruzzi di fluidità adeguata alle modalità di posa – in modo da evitare che in cantiere si proceda alle dannose riaggiunte di acqua – e riducendo la distanza tra i giunti di contrazione/controllo rispetto a quella richiesta per una pavimentazione priva di foglio di polietilene.



Nel caso in cui la piastra in calcestruzzo appoggi, non su una massicciata, ma su un solaio, su elementi prefabbricati o su una pavimentazione preesistente, possono presentarsi due soluzioni realizzative differenti:

1. Pavimentazione desolidarizzata svincolata completamente dalla struttura portante mediante interposizione di foglio di polietilene.
2. Pavimentazione collaborante gettata direttamente a contatto con la struttura portante a realizzare una sezione mista in c.a.

Per le pavimentazioni desolidarizzate, sarà necessario garantire uno spessore della piastra di almeno 12 cm (a meno che non si ricorra a calcestruzzi speciali confezionati con agenti espansivi, additivi riduttori del ritiro e fibre strutturali) ed evitare la presenza di elementi interni come tubazioni, canaline, etc. che ne riducano lo spessore. Se, invece, la piastra di calcestruzzo costituisce la soletta di completamento ancorata alla struttura portante, costituita generalmente da elementi prefabbricati, si definisce la pavimentazione collaborante (o vincolata alla struttura). In tal caso, la piastra sarà armata e saranno previsti degli ancoraggi meccanici alla struttura prefabbricata.



Fonte: UNI 11146:2005

La norma UNI 11146 classifica i pavimenti anche in funzione della destinazione d'uso e della resistenza all'abrasione che deve essere garantita. Relativamente alla destinazione d'uso, sono previste 5 classi (da 1 a 5) in ordine crescente di carico. La classe 1 prevede pavimentazioni industriali destinate a zone uffici, con carichi ridotti, mentre in classe 5 ricadono quelle strutture soggette al transito di veicoli pesanti o con la presenza di scaffalature con carichi rilevanti. Per quanto concerne la classificazione in funzione della resistenza all'abrasione, sono previste 4 classi, da A a D, in ordine crescente all'aumentare della severità delle condizioni di traffico.



Le pavimentazioni industriali possono essere realizzate utilizzando calcestruzzi standard o espansivi rinforzati con rete elettrosaldata o fibre. Per procedere al dimensionamento, il progettista innanzitutto dovrà richiedere una caratterizzazione del terreno in termini di Modulo di deformazione ( $M_d$ ) o coefficiente di Winkler ( $K$ ) desunti mediante prove di carico su piastra condotte direttamente in situ. Nella scelta dei materiali da utilizzare e per il calcolo dovranno essere rispettati i requisiti di "vita utile di progetto", "durabilità" e "garanzia di qualità", in accordo a quanto riportato nel D.M. 14/01/2008. Normalmente, per quanto riguarda il requisito "vita utile di progetto", il sistema pavimentazione appartiene alla classe 2 (25 anni); per la durabilità si dovrà far riferimento, nella scelta della classe di resistenza del calcestruzzo e nel dimensionamento del copriferro, alle classi di esposizione così come riportato nelle norme UNI EN

206-1 e UNI 11104. Successivamente, si potrà procedere alle verifiche agli stati limite ultimi, a taglio e punzonamento per i carichi concentrati e agli stati limite di esercizio quali limitazione delle tensioni, verifica a imbarcamento e a ritiro, formazione di fessure, in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni. Sarà, infine, compito del progettista definire sia il tipo di finitura che i tempi e le modalità di maturazione dei getti.

In fase progettuale, se non sono noti i carichi che graveranno sulla pavimentazione, si deve fare riferimento alla norma UNI EN 1991-1-1 per i carichi concentrati e distribuiti in funzione della destinazione d'uso e le sollecitazioni dovute alla presenza di mezzi di movimentazione motorizzati e manuali (carrelli elevatori, trans-pallets). Per quanto concerne, invece, i carichi dovuti al transito di veicoli quali camion, autocarri, autotreni si faccia riferimento a quanto riportato nella norma UNI EN 1991-1-2. In ogni caso, in assenza di qualsiasi tipo di informazione, i carichi caratteristici minimi su una pavimentazione industriale da considerare sono:

- $q_k = 20.0 \text{ kN/m}^2$  uniformemente distribuito;
- $Q_k = 20.0 \text{ kN}$  con area di applicazione quadrata di lato 100 mm.

Il calcolo delle sollecitazioni e delle deformazioni può essere effettuato con la classica teoria delle piastre di medio spessore considerando un comportamento elastico, rigido-plastico o non lineare del materiale.

In generale, considerando un comportamento elastico del materiale è possibile progettare le pavimentazioni in calcestruzzo verificando che la tensione di trazione per flessione massima indotta dai carichi agenti sulla lastra di pavimentazione sia in tutti i punti inferiore alla resistenza a trazione per flessione ammissibile di progetto. I carichi considerati potranno essere concentrati fissi o dinamici e posizionati al centro, al bordo o all'angolo della piastra (formule di Westergaard) o distribuiti (formule di Timoshenko). Seguendo questo approccio per il dimensionamento, si dovrà comunque sempre prevedere l'inserimento di una rete elettrosaldata posta a una distanza pari a circa  $1/3$  dello spessore della piastra dall'estradosso del pavimento o l'utilizzo di fibre al fine di limitare l'apertura delle fessure che si producono per effetto delle contrazioni di ritiro nelle sezioni di giunto. Infatti, la presenza del rinforzo, sia in forma di rete elettrosaldata e/o di fibre strutturali, garantirà che i lembi del giunto non si allontanino eccessivamente, in modo che la sezione di giunto, grazie all'effetto ingranamento tra gli aggregati, possa resistere alle sollecitazioni flessionali e taglianti indotte dai carichi agenti.

Nel caso in cui si volesse tenere in considerazione anche il contributo dato dal rinforzo in termini strutturali, si dovranno utilizzare altri metodi di progettazione. In particolare, se si inserisce un'armatura nella zona intradosso la pavimentazione dovrà essere progettata in accordo all'Eurocodice 2 (strutture in calcestruzzo armato), mentre se si ricorre ad un rinforzo fibroso (fibre strutturali con o senza armatura tradizionale in forma di rete)

sarà necessario ricorrere alla teoria delle linee di rottura (Yield Lines) ipotizzando un comportamento rigido-plastico del materiale.

Una volta dimensionata strutturalmente la piastra sarà compito del progettista definire la disposizione, la profondità e la modalità esecutiva dei giunti. I giunti possono essere:

- di **isolamento** per svincolare la pavimentazione da elementi fissi e/o singoli (muri, pilastri, travi di fondazione, pozzetti, ecc.) limitando l'insorgere di fessure dovute all'impedimento alla deformazione in prossimità di tali elementi. Tali giunti devono essere estesi a tutto lo spessore della piastra e sono realizzati ponendo, prima del getto, una striscia continua di materiale deformabile lungo lo sviluppo dell'elemento da isolare;

- di **costruzione** per suddividere la pavimentazione in moduli di cui è prevista la realizzazione in tempi diversi. Tali giunti debbono essere estesi a tutto lo spessore e possono essere realizzati in opera utilizzando dei barrotti oppure ricorrendo ad elementi prefabbricati.



- di **contrazione/controllo** per assorbire i movimenti termoigrometrici della piastra di calcestruzzo quali dilatazioni dovute a escursioni termiche (nel caso di pavimentazioni esterne) o contrazioni dovute al ritiro igrometrico del calcestruzzo (sempre presente, ma di particolare rilievo per le pavimentazioni interne protette dall'escursione termica). Questi giunti vengono realizzati operando dei tagli che devono essere realizzati non appena il calcestruzzo è capace di resistere all'azione della sega a disco utilizzata per questa operazione. Il tempo che intercorre tra l'ultimazione del pavimento e la realizzazione dei tagli dipende sia dal tipo di calcestruzzo che dalle condizioni climatiche. In linea di massima i tagli - di profondità pari a  $\frac{1}{4}$  dell'altezza della piastra - vanno realizzati non oltre le 24 ore e le 48-72 ore rispettivamente nel periodo caldo e freddo. Infine, i tagli debbono essere realizzati in modo da ottenere delle campiture preferibilmente quadrate (o rettangolari con un rapporto tra i lati non superiore a 1.5). La distanza massima tra i tagli dipende dallo spessore del pavimento, dalla localizzazione della pavimentazione, dal tipo di calcestruzzo e generalmente varia tra i 3 e i 6 metri.

La prevenzione dei quadri fessurativi indotti dal ritiro idraulico può essere ottenuta ricorrendo nel confezionamento degli impasti all'impiego degli agenti espansivi, prodotti in polvere che aggiunti al conglomerato al momento della miscelazione, in presenza di acqua, sono in grado di espandere in parte durante la presa e in maggior misura dopo che la stessa è terminata. I dosaggi di agente espansivo nel calcestruzzo possono essere compresi tra 15 e 30 kg/m<sup>3</sup> anche se nella pratica variano tra 18 e 25 kg/m<sup>3</sup>. Ricorrendo all'impiego di questi conglomerati è possibile realizzare pavimentazioni senza giunti di controllo per estensioni variabili tra 600 e 1200 m<sup>2</sup> circa in funzione della "forza lavoro e delle ore lavorative continue" dell'impresa esecutrice. Si raccomanda di studiare preventivamente le modalità di posa in opera, valutare se l'impresa esecutrice è in grado di fornire la "forza

lavoro" sufficiente ed il fornitore di calcestruzzo è in grado di dare continuità di fornitura durante il getto. Utilizzando calcestruzzi espansivi, al fine di assicurare l'efficacia di questi prodotti, sarà necessario sia garantire un'adeguata maturazione umida delle superfici (almeno per 7 giorni) che predisporre una opportuna armatura di contrasto all'espansione in forma di ferri di piccolo diametro distribuiti omogeneamente nella sezione dell'elemento strutturale oppure ricorrere a calcestruzzi fibrorinforzati con un dosaggio di fibre equivalente, dal punto di vista del contrasto all'espansione, alla doppia rete elettrosaldata.



Gruppo Cementirosi S.p.A.



## I CALCESTRUZZI PER STRUTTURE FACCIAVISTA

**I** conglomerati destinati alla realizzazione di strutture le cui superfici debbono rimanere a vista e dove, quindi, l'estetica del manufatto rappresenta una prestazione fondamentale da conseguire unitamente ai requisiti di carattere statico e di durabilità, costituiscono una categoria di calcestruzzi ad alte prestazioni che differiscono sia per la natura degli ingredienti che per il loro proporzionamento dai calcestruzzi destinati a strutture che interessate da successive lavorazioni non necessitano di specifiche proprietà dal punto di vista estetico. È opportuno precisare, tuttavia, che la qualità estetica della superficie delle strutture in calcestruzzo dipende sia dalla composizione e dalle prestazioni del calcestruzzo impiegato che da una serie di fattori che attengono strettamente alla progettazione e all'esecuzione dell'opera. In particolare il facciavista dipende:

**A) dal tipo di cassero: i casseri assorbenti** permettono di ottenere una superficie leggermente ruvida perché assorbono l'acqua in eccesso e impediscono la formazione di antiestetiche bolle superficiali. Per ottenere una superficie omogenea, tuttavia, è necessario utilizzare tavole che sono state impiegate lo stesso numero di volte e caratterizzate da medesimo assorbimento (stesso legno). **I casseri non assorbenti** (pannelli in legno trattati o casseri d'acciaio) producono superfici molto lisce, ma caratterizzate anche da una maggiore disomogeneità cromatica. Per questo motivo è opportuno che grandi superfici facciavista vengano suddivise mediante motivi architettonici in campiture di modesta estensione che possano attenuare queste disomogeneità cromatiche inevitabili. Tali tipi di casseri possono essere utilizzati molte volte, ma producono superfici lisce che esaltano la comparsa delle bolle superficiali. Relativamente ai casseri, indipendentemente che essi siano o meno assorbenti, è assolutamente importante curare la tenuta dei punti di giunzione; in caso contrario, infatti, la perdita di boiaccia da queste zone provoca la formazione di difetti superficiali in termini di macroporosità;

**B) dal tipo di disarmante:** prima di procedere al getto è sempre opportuno eseguire delle prove preliminari di compatibilità tra cassero e disarmante. L'applicazione del disarmante deve avvenire con cura in strati sottili e regolari prima del posizionamento delle gabbie di armatura. Il disarmante in eccesso deve essere rimosso mediante degli stracci pena l'apparizione di macchie o di zone a colorazione grigia variabile;

**C) dalle modalità di posa in opera:** la presenza di bolle superficiali può essere esaltata da procedure di posa in opera che favoriscono l'intrappolamento di aria nel calcestruzzo. Per questo motivo per ottenere un eccellente facciavista è opportuno che il calcestruzzo non venga lasciato cadere da altezze superiori a 40-50 cm e che la vibrazione del conglomerato avvenga interessando strati non spessi più di 50 cm;

**D) dalle modalità di maturazione:** la bagnatura delle superfici del calcestruzzo con acqua può promuovere la comparsa di antiestetiche efflorescenze biancastre. Allo stesso modo si possono generare macchiature della superficie se vengono impiegate pellicole in plastica applicate direttamente sulla superficie del calcestruzzo. Le modalità di protezione consigliate per le strutture facciavista sono quelle basate sull'impiego di un foglio di plastica tenuto distante dalla superficie della struttura in calcestruzzo evitando comunque che si crei un effetto camino che possa favorire l'evaporazione di acqua dal conglomerato;

**E) dalle condizioni climatiche al momento della realizzazione dell'opera:** la qualità estetica delle superfici di calcestruzzo dipende strettamente dalle condizioni di ventilazione e di umidità esistenti durante la realizzazione e la successiva maturazione del getto: climi asciutti e ventilati producono colorazioni diverse da quelle che si realizzano in periodi caldo-umidi. Pertanto, è buona norma, ai fini dell'ottenimento di colorazioni omogenee delle superfici, che i getti di un determinato elemento strutturale vengano completati nell'arco di una stessa giornata. Da questo punto di vista sono parti-



colarmente problematiche quelle strutture che per la loro estensione sono interessate da una ripresa di getto orizzontale che inevitabilmente mette in evidenza la differenza cromatica inevitabile tra le due gettate effettuate in giorni distinti. In queste situazioni è opportuno organizzare il cantiere suddividendo gli elementi da realizzare in settori a prevalente sviluppo verticale in modo, ad esempio, da far coincidere la ripresa di getto in corrispondenza degli spigoli tra muri contigui.



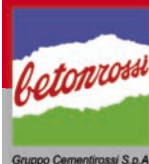
*Ripresa di getto orizzontale ed inevitabile difettosità cromatica della superficie di una parete in calcestruzzo armato.*

Relativamente alla composizione del calcestruzzo i parametri che influenzano la qualità estetica dei manufatti sono rappresentati:

**A) dal tipo di cemento:** tutti i cementi conformi alla UNI-EN 197-1 sono idonei per la produzione del calcestruzzo facciavista. Tuttavia, per evitare variazioni cromatiche è strettamente necessario che il conglomerato venga confezionato con lo stesso tipo/classe di cemento. Il cemento Portland conduce a superfici con tonalità cromatiche sul grigio, mentre superfici più chiare si possono ottenere con il cemento Portland al calcare. Il cemento Portland bianco si può utilizzare quando si richiedono superfici di particolare bianchezza oppure il calcestruzzo deve essere additivato con pigmenti finalizzati ad ottenere colorazioni pastello tenui. Il cemento bianco consente di valorizzare le tonalità cromatiche delle graniglie e dei pigmenti utilizzati. Questi ultimi devono resistere agli alcali, non subire alterazioni per effetto della presenza di calce, possedere una estrema stabilità alla luce (raggi ultravioletti) e agli agenti atmosferici, non contenere sali solubili che potrebbero provocare la formazione di efflorescenze ed, infine, non pregiudicare sia il processo di presa del cemento che lo sviluppo delle resistenze meccaniche nel tempo. L'aggiunta di pigmento avviene generalmente in ragione del 3-6% rispetto alla massa del cemento e la sua miscelazione deve avvenire a secco con parte della sabbia al fine di ottenere una omogenea dispersione dello stesso nell'impasto e, quindi una tonalità cromatica uniforme;

**B) dall'acqua di impasto:** al fine di evitare alterazioni cromatiche delle superfici per il calcestruzzo facciavista sono da escludere le acque di riciclo e ricorrere nel confezionamento all'impiego di sole acque potabili;

**C) dal tipo di aggregato:** il colore delle superfici in calcestruzzo dipende dal colore degli aggregati e, in particolare, da quello delle sabbie. Pertanto, al fine di evitare variazioni cromatiche è necessario che durante la fornitura del calcestruzzo non deve cambiare la fonte di provenienza dei materiali lapidei. Gli impasti possono essere confezionati con l'impiego di aggregati comuni, bianchi oppure colorati. L'aggregato prima del suo impiego deve essere lavato. L'aggregato grosso generalmente non appare sulla superficie che è composta prevalentemente solo di pasta cementizia e sabbia; il suo colore, pertanto, non è determinante quando non siano previste lavorazioni che asportino la pelle del calcestruzzo. La sabbia fine, invece, deve essere del colore desiderato.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

L'influenza della sabbia sul colore della pelle, in caso di contrasto di colore, è tanto maggiore quanto più piccoli sono i granuli della frazione fine: se la sabbia è priva di finissimo i granuli più grossi vengono in superficie e modificano la tessitura della pelle. Inoltre, al fine di evitare difettosità superficiali si deve imporre un limite nel contenuto di particelle leggere negli aggregati (0.25 e 0.05% rispettivamente per aggregati fini e grossi);

**D) dal dosaggio di cemento:** per aggregati con un diametro massimo di 32 mm il dosaggio di cemento minimo deve risultare almeno pari a 350 kg/m<sup>3</sup>. Inoltre, la somma del cemento e dei granuli di materiale inerte di dimensioni inferiori a 0.125 mm deve risultare non minore di 400 kg/m<sup>3</sup>. Questo significa che, in linea di massima per produrre un calcestruzzo facciavista la resistenza caratteristica a compressione del conglomerato non può essere inferiore a 35 N/mm<sup>2</sup>;

**E) dal rapporto a/c:** deve essere rispettato per ogni impasto il rapporto a/c nominale previsto il quale non deve subire oscillazioni di +/- 0.03 in quanto queste variazioni determinerebbero differenze cromatiche della superficie dei manufatti. Questo implica che la produzione del calcestruzzo destinato ad opere facciavista deve necessariamente avvenire in impianti con processo industrializzato dove si opera uno stringente controllo dell'umidità degli aggregati e dell'acqua introdotta nel mescolatore;

**F) dalla lavorabilità:** al fine di limitare la tendenza alla segregazione dell'impasto è opportuno per le strutture facciavista utilizzare uno slump di riferimento di 18 +/- 2 cm (classe di consistenza S4). Per il calcestruzzo da mettere in opera mediante pompa si possono utilizzare anche conglomerati con classe di consistenza S5 purché a livello compositivo si adottino i necessari provvedimenti per ottenere impasti coesivi e privi di segregazione.



Gruppo Cementirosi S.p.A.



## I CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI (Self-Compacting Concrete)

**I calcestruzzi autocompattanti** non necessitano durante la posa in opera di alcuna vibrazione in quanto sono in grado di riempire completamente la cassaforma, consentendo nel contempo una efficace espulsione dell'aria intrappolata al fine di 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.

In sostanza però un calcestruzzo autocompattante per essere realmente tale deve essere caratterizzato:

- da una **elevata capacità di scorrimento** in assenza di ostacoli;
- da una **elevata resistenza alla segregazione** in modo da poter minimizzare il rischio di separazione degli ingredienti durante il getto e lo scorrimento del conglomerato all'interno dei casseri. A questo proposito, in particolare, la malta (acqua, cemento, aggiunte minerali e frazioni fini della sabbia, aria) 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 proprietà viene identificata con il termine di capacità di attraversamento (*passing ability*) e risulta una delle proprietà fondamentali degli autocompattanti.

La quantificazione di proprietà reologiche così antitetiche può essere effettuata avvalendosi di diversi metodi di misura ognuno finalizzato alla misurazione di una caratteristica specifica degli SCC. Le attrezzature più diffuse per la valutazione delle proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti sono:

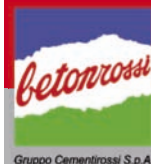
- il cono di Abrams;
- l'imbuto a forma di V (V-funnel);
- la scatola ad L (L-box);
- l'anello giapponese (Japanese Ring: J-ring).

### Il cono di Abrams e la misura dello slump-flow

La prova consiste nell'introdurre il calcestruzzo all'interno del cono di Abrams e nell'azionare un cronometro nel momento in cui lo stesso viene sollevato. 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 ( $d_f$  = slump-flow) dopo che lo stesso ha cessato di fluire.

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. In base al valore di  $d_f$  le Linee Guida europee suddividono i calcestruzzi autocompattanti, relativamente alla misura dello slump-flow, in tre classi.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Classificazione dei calcestruzzi autocompattanti in base al valore dello slump-flow in accordo alle Linee Guida europee.

NORMA	SF1 (mm)	SF2 (mm)	SF3 (mm)
Linee guida	550 - 650	660 - 750	760 - 850

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. Le Linee Guida europee, suddividono i calcestruzzi in due classi quelli con  $t_{500}$  inferiori o pari a 2 s o con  $t_{500}$  maggiore di 2 s.

### L'imbuto a forma di V (V-funnel)

La resistenza alla segregazione del calcestruzzo autocompattante può essere accertata 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 ( $t_0$ ). 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. Le Linee Guida europee 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.

Classificazione dei calcestruzzi in termini di resistenza alla segregazione ( $t_{500}$  e  $t_0$ ) in accordo alle Linee Guida europee.

NORMA	$t_0$ min (s)	$t_0$ max (s)	VS1/VF1 ( $t_{500}$ , $t_0$ )	VS2/VF2 ( $t_{500}$ , $t_0$ )
Linee guida	-	25	$\leq 2$ s, $\leq 8$ s,	$> 2$ s, 9 - 25 s,

### La scatola ad L

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. 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 se il rapporto  $h_1/h_2$  risulta almeno pari a 0.80. Le Linee Guida distinguono 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) conseguono questo risultato fluendo, rispettivamente, attraverso due o tre armature.

### L'anello giapponese (Japanese Ring)

Lo J-ring è un anello di acciaio forato dove vengono 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 e, successivamente, nel sollevarlo lasciando fluire il conglomerato attraverso le barre dello J-ring. La capacità di attraversamento può essere valutata:

- dalla differenza del diametro finale ottenuto ( $d_f$ ) rispetto a quello misurato in assenza dell'anello ( $d_i$ ): i calcestruzzi che evidenziano allo J-ring un  $d_f$  maggiore di più di 50 mm rispetto a quello misurato in assenza di anello ( $d_i$ ) denotano una naturale tendenza della malta di cemento a separarsi dall'aggregato grosso e, quindi, a favorire l'arresto del calcestruzzo allorché esso fluisce attraverso le armature;

- valutando la differenza di altezza della focaccia di calcestruzzo tra la zona interna ed esterna all'anello: valori superiori a 10 mm indicano che il conglomerato possiede scarse capacità di attraversamento delle barre.

*Valori massimi e minimi per le prove di passing ability con la scatola ad L e con l'anello giapponese (J-ring) in accordo alle norme UNI 11040, alle raccomandazioni EFNARC e classificazione dei calcestruzzi in termini di capacità di attraversamento secondo le Linee Guida.*

NORMA	SCATOLA AD L: $(h_1/h_2)_{min}$	SCATOLA AD L: $(h_1/h_2)_{max}$	PA1 (2 barre)	PA2 (3 barre)	J-RING $\Delta H_{min}$	J-RING $\Delta H_{max}$	J-RING $\Delta d_{max}$
UNI 11040	0.80	1.0	-	-	-	-	50 mm
EFNARC	0.80	1.0	-	-	0 mm	10 mm	-
Linee guida	0.80	1.0	> 0.80	> 0.80	-	-	-

È opportuno evidenziare come non esiste "il calcestruzzo autocompattante", ma una serie di SCC che possono evidenziare caratteristiche più o meno pronunciate di fluidità, di resistenza alla segregazione o di capacità di attraversamento. Pertanto, 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.

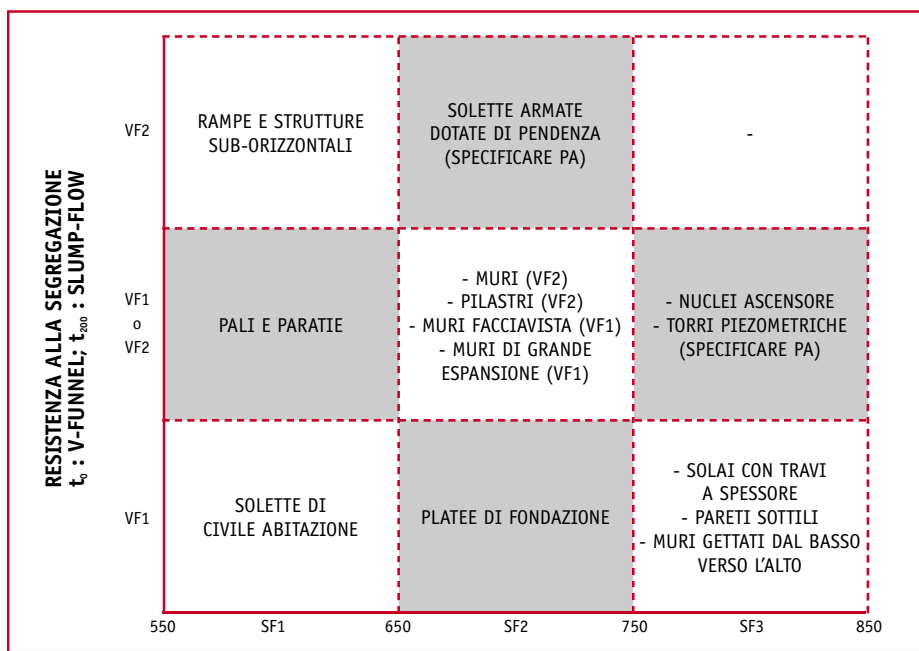
In accordo con quanto sopra riportato si possono fare ora alcune considerazioni riguardo alle proprietà dei calcestruzzi autocompattanti in relazione alla tipologia di struttura da realizzare:

- la classe di spandimento SF1 è appropriata per strutture debolmente armate 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;
- 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;
- la classe di viscosità VF1 si presta per essere impiegata in quelle strutture ove il facciavista rappresenta una caratteristica predominante per l'opera o per la realizzazione di strutture di grande estensione in quanto presenta 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) PA1 o PA2 è richiesta in quelle strutture rispettivamente con dimensioni minime/interferri compresi tra 80 e 100 mm oppure minori;

In base a quanto sopra esposto, in Figura viene riportato un abaco con le proprietà richieste per il calcestruzzo autocompattante in funzione della tipologia strutturale cui esso è destinato. Per ognuna delle tipologie strutturali il conglomerato viene identifi-

cato attraverso le due proprietà di base (slump-flow e tempo di svuotamento al V-funnel) integrate dalle specifiche relative alla capacità di attraversamento (PA).

Proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti in funzione della tipologia strutturale cui il conglomerato è destinato.



Al fine di conseguire le caratteristiche di scorrimento, di viscosità, resistenza alla segregazione e capacità di attraversamento è opportuno ricorrere all'impiego congiunto di additivi superfluidificanti e agenti modificatori di viscosità.

Gli additivi superfluidificanti nella produzione degli autocompattanti vengono utilizzati mantenendo fisso il dosaggio di cemento per aumentare la lavorabilità del conglomerato. L'impiego degli agenti modificatori della viscosità è, invece, finalizzato ad un miglioramento della passing ability, senza pregiudicare la capacità di scorrimento laterale del conglomerato.

La possibilità di produrre un calcestruzzo autocompattante è associata alla 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. Una regola pratica è quella di garantire un volume di materiale finissimo compreso tra 160 e 190 l/m<sup>3</sup> circa. Un volume così rilevante di materiale finissimo 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.

Per le aggiunte inerti (filler calcarei) si richiede un passante a 0.125 mm di almeno il 70%. In definitiva si ricorda che per un volume di finissimo (160-190 l/m<sup>3</sup>) è opportuno affiancare un ulteriore provvedimento legato al volume di acqua complessivo nel calcestruzzo il quale deve risultare compreso tra 170 e 210 litri/m<sup>3</sup>. Il volume di complessivo di pasta, inoltre, deve essere compreso tra 350 e 380 litri/m<sup>3</sup> e il rapporto in volume acqua/finissimo<sup>51</sup> 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/m<sup>3</sup>. Inoltre, occorrerà porre delle limitazioni anche al diametro massimo dell'aggregato che dovrà essere generalmente inferiore a 20 mm.

Requisiti compositivi per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti.

COMPONENTE	VALORI SUGGERITI IN MASSA (kg/m <sup>3</sup> )	VALORI SUGGERITI IN VOLUME (l/m <sup>3</sup> )
Finissimo	450 - 550	160 - 190
Pasta	-	350 - 380
Acqua	170 - 210	170 - 210
Aggregato grosso	< 970	< 360
Acqua/finissimo	-	0.85 - 1.10
Sabbia	-	45 - 55% del volume totale degli aggregati

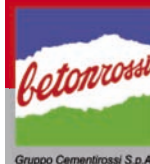
Le principali differenze compositivi tra calcestruzzi tradizionali superfluidi e conglomerati autocompattanti che possono essere riassunte in:

- minor volume di aggregato grosso;
- maggior volume di pasta;
- basso rapporto acqua/finissimo;
- 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);
- volume di aria leggermente superiore (per il maggior volume di pasta);
- agente modificatore di viscosità.

L'impiego del calcestruzzo autocompattante nella realizzazione delle strutture impone l'adozione di alcuni accorgimenti nella fase di preparazione dei casseri, della posa in opera 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.

### **La 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 a parità di tutte le condizioni, aumenta al diminuire della coesione e della viscosità del calcestruzzo; pertanto, si intuisce come il calcestruzzo autocompattante, per la maggiore fluidità determini un incremento della pressione esercitata sui casseri rispetto ad un conglomerato tradizionale. Tuttavia, occorre tener presente che la maggiore spinta diventa significativa soltanto quando la velocità di riempimento supera i 7 m/h allorché il calcestruzzo autocompattante imprime sulle sponde dei casseri una spinta triangolare assimilabile a quella idrostatica di un fluido che possiede una massa di 2500 Kg/m<sup>3</sup> circa. 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.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

### **Posa in opera: 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 (50 cm) prevista per i conglomerati convenzionali. Tuttavia, il calcestruzzo autocompattante, soprattutto quello caratterizzato da basse viscosità (VF1), possiede maggiore tendenza a segregare. Altezze di caduta di 5 m segnalate in passato come valori possibili per gli SCC in qualsiasi contesto sembrano siano assolutamente da sconsigliare. E' 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 una ragionevole regola pratica è quella di non superare distanze pari a 8-10 m circa.

### **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 e/o di maturazione delle superfici debbono essere anticipate rispetto ai tempi dei calcestruzzi tradizionali.

### **Facciavista delle strutture**

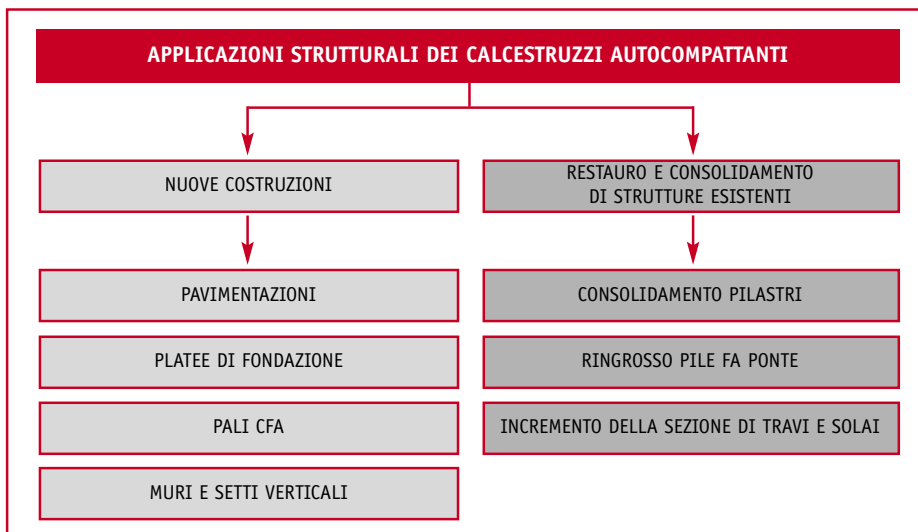
Le esperienze di cantiere hanno, tuttavia, confermato che l'ottenimento di un'eccellente faccia-vista dipende dagli stessi parametri che influenzano quello delle strutture realizzate con i convenzionali conglomerati.

Uno dei principali obiettivi che ci si prefigge di conseguire con i calcestruzzi autocompattanti è quello di ottenere per il conglomerato in opera una resistenza a compressione sostanzialmente prossima a quella massima raggiungibile sui provini cubici prelevati allo scarico del calcestruzzo in cantiere; ossia l'utilizzo del calcestruzzo autocompattante può consentire di adottare un requisito più stringente per la resistenza caratteristica a compressione in opera  $C(x/y)^*$  rispetto a quello previsto per le strutture realizzate con conglomerati di consistenza tradizionale. La prescrizione sui controlli in opera potrebbe essere così formulata:

$$C(x/y)^*_{\text{in opera}} > 0.90 \cdot C(x/y)$$

Le principali applicazioni dei calcestruzzi autocompattanti in Italia riguardano sia il settore delle nuove costruzioni che quello del ripristino di strutture esistenti. Nel settore delle nuove costruzioni gli SCC vengono convenientemente impiegati per la realizzazione di pavimentazioni e platee di fondazione di grande estensione superficiale, di pali trivellati, di muri e setti verticali. Nel settore del ripristino gli SCC vengono utilizzati laddove esigenze di carattere statico o di adeguamento antisismico richiedono un incremento delle sezioni originarie degli elementi strutturali ed in particolare dei pilastri e delle pile da ponte.

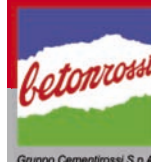
Principali campi di applicazione dei calcestruzzi autocompattanti in Italia.



I principali vantaggi derivanti dall'impiego dei calcestruzzi autocompattanti nel settore dei pavimenti e delle platee di fondazione 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.

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 (facciavista) 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 facciavista 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 superfluido.

I calcestruzzi autocompattanti hanno trovato larga applicazione anche nella realizzazione dei pali trivellati di tipo Augher (Continuous Flight Augher: CFA). Per queste strutture infatti gli SCC grazie alla bassa viscosità consentono a trivellazione avvenuta del terreno di procedere al getto del calcestruzzo per il riempimento dello scavo e, successivamente, all'affondamento della gabbia di armatura. Questa operazione ovviamente sarebbe di impossibile o quantomeno difficile attuazione impiegando un calcestruzzo a consistenza S5 o S4.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

Platea di fondazione armato del silo meccanizzato - Ikea Deposito Centrale 2 - Piacenza



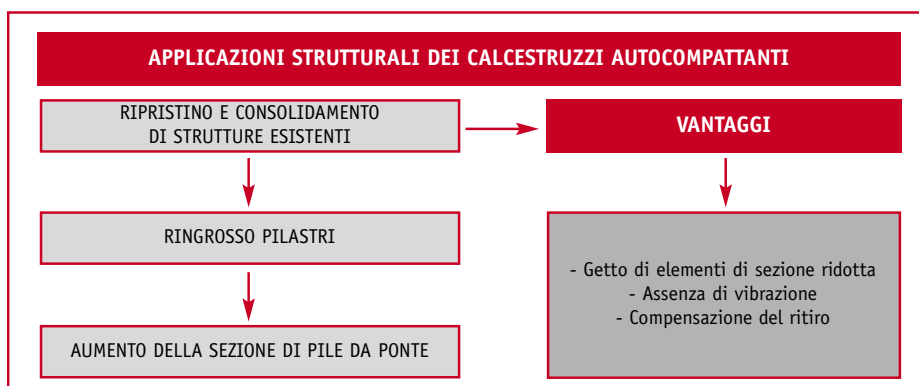
Platea di fondazione armata del silo meccanizzato - Ikea Deposito Centrale 2 - Piacenza  
getto di una platea di fondazione con calcestruzzo autocompattante fino a ridosso della maglia estradosale dell'armatura. La platea è stata completata e rifinita superficialmente con getto conclusivo in calcestruzzo superfluido.

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.



Affondamento della gabbia d'armatura dopo il getto di calcestruzzo per la realizzazione di un palo CFA.

Vantaggi derivanti dall'impiego degli SCC nel settore del ripristino di strutture esistenti.



<sup>51)</sup> 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.

53

## I CALCESTRUZZI AD ALTA ED ALTISSIMA RESISTENZA MECCANICA

I calcestruzzi di alta e altissima resistenza sono caratterizzati da classi di resistenza caratteristica convenzionale a compressione a 28 giorni maggiori di 60 N/mm<sup>2</sup>. Questi conglomerati trovano impiego nella realizzazione di pilastri di edifici multipiano soprattutto nei piani interrati dove è fondamentale ridurre le dimensioni degli elementi strutturali per avere maggiore spazio disponibile per le aree di parcheggio. I calcestruzzi ad alta resistenza vengono anche impiegati nella realizzazione di travi di ponti e impalcati soprattutto se di grande luce, per tegoli di copertura o per contenitori destinati ad ospitare scorie di materiale radioattivo o comunque nocivo per la salute dell'uomo.

I conglomerati ad alta resistenza vengono confezionati ricorrendo all'impiego:

- di **cementi di classe di resistenza 42.5R** (per quelli ad altissima resistenza con  $R_{ck}$  maggiori di 75 N/mm<sup>2</sup> impiegando esclusivamente cementi Portland di classe 52.5R caratterizzati da clinker con elevati contenuti di C<sub>3</sub>S e da una finezza di macinazione molto spinta);

- di **additivi super-riduttori di acqua** che consentono di ridurre l'acqua di impasto, senza pregiudicare la lavorabilità del conglomerato, al fine di conseguire rapporti acqua/cemento così bassi da poter ambire al raggiungimento di prestazioni meccaniche elevate;

- di **fumo di silice** che consente di poter "surdosare" gli additivi riduttori di acqua che possono essere impiegati anche in misura del 3-4% rispetto alla massa del legante. Questi dosaggi sarebbero improponibili in assenza di fumo di silice in quanto determinerebbero la segregazione dell'impasto. Il surdosaggio di additivo, in presenza di microsilice, consente di confezionare impasti con rapporto acqua/legante inferiore a 0.35 e, pertanto, capaci di attingere resistenze a compressione molto elevate. E' da sottolineare che il fumo di silice contribuisce all'ottenimento delle prestazioni meccaniche attraverso:

**A)** un'azione fillerizzante dei vuoti tra i granuli di cemento contribuendo ad una densificazione della struttura della matrice;

**B)** la reazione pozzolanica con produzione di silicati secondari che riducono la porosità capillare e producono una diminuzione della dimensione media dei pori;

**C)** una riduzione del bleeding interno che determina un miglioramento della qualità dell'interfaccia pasta-aggregato che direttamente influenza la resistenza a compressione del conglomerato cementizio;

- di **aggregati con massa volumica non inferiore a 2.7 Kg/l** per evitare l'utilizzo di aggregati scadenti meccanicamente che collassino per valori di sforzo inferiori a quelli che determinano la rottura della matrice cementizia. Inoltre, per il conseguimento di alti valori della prestazione meccanica è altresì opportuno ridurre la dimensione massima dell'aggregato in modo da diminuire le difettosità in corrispondenza dell'interfaccia pasta-aggregato e ridurre la concentrazione di sforzo nella zona di transizione responsabile di un precoce collasso del conglomerato.

Rispetto ai calcestruzzi tradizionali, quelli ad alta resistenza presentano un comportamento lineare del ramo ascendente sforzo-deformazione che si protrae per valori dello sforzo prossimo alla resistenza a compressione del materiale ed un ramo discendente ripido che denota una tendenza del materiale alla rottura di tipo fragile. A causa del miglioramento della qualità della pasta di cemento, derivante sia dal basso rapporto acqua/legante che dalla presenza del fumo di silice, vi è un minor divario in termini di modulo elastico tra pasta ed aggregato lapideo che conduce ad una distribuzione più omogenea degli sforzi di



Gruppo Cementirosi S.p.A.

compressione e ad una minore possibilità di redistribuzione delle microfessure all'interfaccia pasta-aggregato. Come risultato si ha che i percorsi fessurativi, quando il conglomerato è assoggettato alla massima tensione di compressione, si sviluppano rapidamente perché lo sforzo non può essere redistribuito tra fasi a diversa resistenza evidenziando un precoce collasso del calcestruzzo che, pertanto, mostra una maggiore fragilità rispetto ad un conglomerato a normal resistenza. I calcestruzzi ad alta resistenza, infine, evidenziano una minore deformazione laterale sotto sforzi di compressione di quelli a normal resistenza e, quindi, un minor incremento delle capacità portanti di elementi prevalentemente compressi per effetto di forze di confinamento laterali quali quelle esercitate, per esempio in un pilastro circolare da una spirale di acciaio o da un confinamento realizzato con materiali compositi. Alla luce di quanto sopra menzionato la progettazione e il dimensionamento delle strutture con calcestruzzi ad alta resistenza deve avvenire ricorrendo a codici di calcolo specifici per questi materiali in quanto quelli disponibili per i calcestruzzi a normal resistenza non sono utilizzabili. A tale scopo si suggerisce di consultare l'Estensione al Codice Modello CEB-FIP 90 specifico per i calcestruzzi ad alta resistenza. Alcune correlazioni tra diverse caratteristiche elasto-meccaniche del calcestruzzo e resistenza meccanica a compressione sono anche riportate nelle Linee Guida sui Calcestruzzi Strutturali emesse nel 1996 a cura del Servizio Tecnico Centrale del Ministero dei Lavori Pubblici.

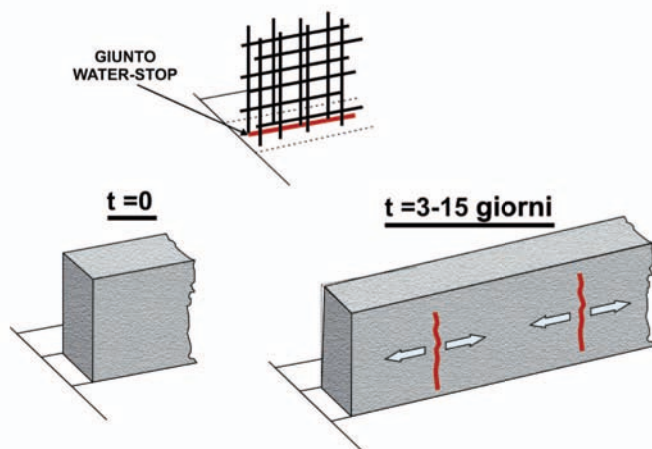
Rispetto ai calcestruzzi a normal resistenza quelli ad alta resistenza presentano una maggiore velocità di sviluppo del ritiro igrometrico. Tuttavia, alle lunghe stagionature, già dopo 4 mesi, la differenza in termini di ritiro è sostanzialmente nulla. I calcestruzzi ad alta resistenza, inoltre, sono interessati dal fenomeno del ritiro autogeno dovuto alla migrazione dell'acqua dai pori di grandi verso quelli di piccole dimensioni. Per questo motivo, rispetto ai tradizionali conglomerati di normal resistenza i calcestruzzi ad alta resistenza richiedono una modalità di stagionatura particolare nelle prime ore successive al getto. Per questi conglomerati, infatti, non è sufficiente evitare l'evaporazione di acqua verso l'ambiente esterno per prevenire il fenomeno fessurativo nei primissimi giorni successivi al getto, ma è, invece, necessario bagnare entro le prime 24 ore le superfici del getto e protrarre questa stagionatura umida per almeno 7 giorni.

## 54 I CALCESTRUZZI PER STRUTTURE MASSIVE

Tutte le reazioni dei costituenti del cemento sono di tipo esotermico: esse cioè avvengono con sviluppo di calore. Nelle strutture di grande spessore - quali le platee di fondazione di edifici multipiano, i blocchi di fondazione delle turbine negli impianti di produzione dell'energia elettrica, gli impalcati da ponte a struttura monolitica, i muri di sostegno di notevole altezza - a causa della modesta conducibilità termica del conglomerato ( $5.5 - 8 \text{ KJ}/(\text{mh}^\circ\text{C})$ ) gli strati più esterni del getto si comportano come materiale isolante impedendo la dissipazione verso l'esterno del calore sviluppato dalla reazione di idratazione determinando un conseguente aumento della temperatura del conglomerato. La conseguenza di questa diversa dissipazione è rappresentata dal fatto che gli strati corticali si attestano su temperature più basse di quelle che si realizzano nel "cuore" della struttura. Il gradiente termico nella sezione dell'elemento strutturale interessato dal riscaldamento può determinare la comparsa di indesiderati quadri fessurativi nel calcestruzzo i quali possono interessare la struttura già dopo qualche ora dalla ultimazione dei getti. Il problema della fessurazione dei getti può manifestarsi anche nella fase di raffreddamento della struttura allorché, esauritosi lo sviluppo di calore, essa tende ad equilibrare la propria temperatura con quella ambientale. In questo caso, gli strati più esterni del getto, già alla temperatura ambientale, opponendosi al raffreddamento del "cuore" della struttura più caldo, generano su queste porzioni della struttura stati tensionali di trazione che possono determinare la fessurazione in forma "subdola" in quanto non rilevabile dall'esterno. Queste fessure risultano particolarmente deleterie per quelle strutture ove la tenuta idraulica risulta un requisito di fondamentale importanza come accade, ad esempio, per le dighe.

Anche in assenza di gradienti termici interni (come, ad esempio, avviene se vengono predisposti degli strati di materiale isolante sulle superfici non casserate e direttamente sugli stessi casseri) l'incremento di temperatura prodotto dalla reazione esotermica di idratazione può risultare pericolosa se nella fase di raffreddamento la contrazione dell'intero elemento strutturale è impedita da vincoli esterni all'elemento rappresentati da porzioni di struttura precedentemente realizzate che sono in equilibrio dal punto di vista termico con l'ambiente. E' il caso, ad esempio, dei muri di grande spessore vincolati ad una struttura di fondazione realizzata da alcune settimane. Dopo l'iniziale riscaldamento, il muro tende a riportare la propria temperatura in equilibrio con quella ambientale. La contrazione dimensionale conseguente risulta, tuttavia, impedita dal vincolo esercitato, attraverso i ferri di ripresa, dalla platea di fondazione che è, invece, già alla temperatura ambientale. Pertanto, nel muro insorge uno stato tensionale di trazione che può provocare la nascita di fessurazioni perpendicolari alla direzione di massima contrazione ad andamento, quindi, verticale.

*Fessurazioni conseguenti all'impedimento alla contrazione del muro esercitato dalla struttura di fondazione già in equilibrio con la temperatura ambientale.*



In base a quanto sopra esposto si intuisce come la risoluzione delle problematiche connesse con lo sviluppo di calore nelle strutture si persegue:

- in presenza di soli vincoli interni (come accade in una fondazione di grande spessore) attraverso una limitazione del solo gradiente di temperatura tra gli strati cortecciali e quelli più interni;
- per strutture vincolate ad altri elementi già in equilibrio con la temperatura ambientale è, invece, indispensabile non solo limitare il gradiente tra cuore e periferia del getto, ma è altresì stringente ridurre la temperatura massima raggiunta nella fase di riscaldamento.

Obiettivi da perseguire per la riduzione del rischio di fessurazione nelle strutture massive.

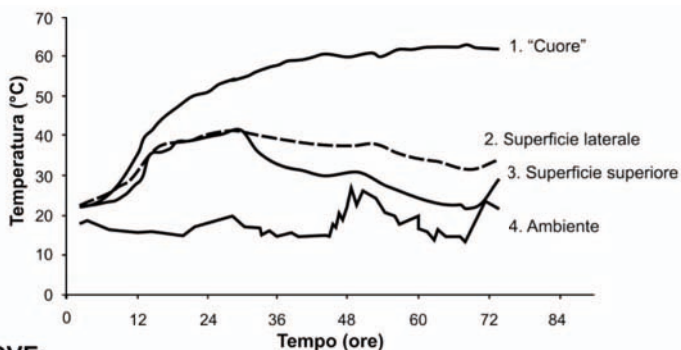


Da un punto di vista pratico, ai fini della riduzione dei quadri fessurativi, è importante sottolineare come non risulti importante la quantità totale di calore sviluppato, quanto la velocità con cui esso si produce. Nella realtà la velocità con cui si sviluppa il calore nei primi giorni successivi al getto supera di gran lunga quella con cui lo stesso viene dissipato verso l'esterno, con il risultato che la temperatura del calcestruzzo aumenta anche per gli strati corticali a contatto con l'ambiente esterno. È interessante notare come gli strati superficiali raggiungano una temperatura inferiore a quella attinta dal "cuore" della struttura per effetto della dissipazione di parte del calore verso l'ambiente. Il gradiente termico tra "cuore" e periferia del getto aumenta e, conseguentemente, si eleva il rischio di fessurazione dopo i primi giorni quando la temperatura raggiunta dal cuore rimane sostanzialmente immutata per l'impedimento alla dissipazione del calore esercitato proprio dagli strati esterni che, invece, si raffreddano cercando di eguagliare la temperatura ambientale. Alla luce di quanto sopra esposto, risulta evidente come l'attenuazione del gradiente termico nelle strutture di grande massa si deve perseguire attraverso sia una riduzione della temperatura massima raggiunta nel "cuore" del getto, ma non può prescindere da una protezione degli strati più esterni da realizzarsi attraverso una adeguata protezione termoisolante tesa a limitare la dissipazione del calore verso l'ambiente lasciata per un periodo sufficientemente lungo da consentire anche al cuore della struttura di potersi raffreddare. Generalmente, la durata della protezione termoisolante varia con lo spessore del manufatto e con la temperatura ambientale, ma da un punto di vista pratico è opportuno che i pannelli protettivi vengano lasciati per almeno 7 o 15 giorni per gli elementi strutturali di spessore rispettivamente inferiore o superiore ai 2 m.



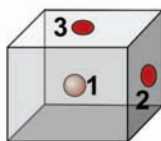
Preparazione del cassero e dell'armatura di un plinto di fondazione di una pila da ponte (volume complessivo di calcestruzzo 361.8 m<sup>3</sup>, spessore minimo de getto: 3 m) - per gentile concessione di Betonrossi S.p.A. - Piacenza.

Andamento della temperatura ambientale e del calcestruzzo nel "cuore" e sulla superficie del plinto di fondazione della Figura precedente.



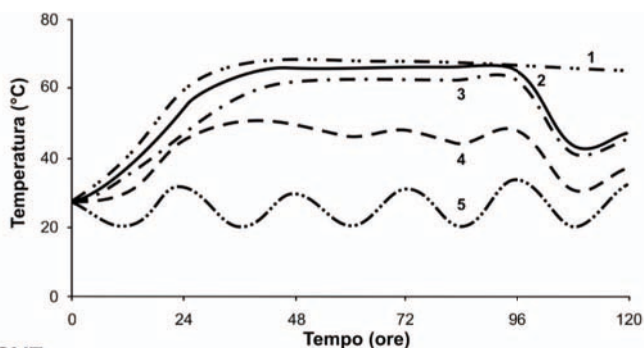
**DOVE:**

4 ●



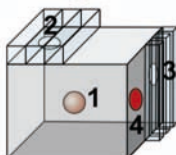
1. CUORE DEL GETTO
2. SUPERFICIE LATERALE
3. SUPERFICIE SUPERIORE
4. TEMPERATURA AMBIENTE

Andamento della temperatura del calcestruzzo in un blocco di fondazione (27x10x3 m).  
Calcestruzzo C25/30, CE IV/A-P 32.5 SR dosaggio cemento 320 kg/m<sup>3</sup>.



**DOVE:**

5 ●



1. CUORE DEL GETTO
2. SUPERFICIE SUPERIORE NON CASSERATA PROTETTA DA PANNELLI DI POLISTIRENE (spessore 5 cm)
3. SUPERFICIE LATERALE A 5 cm DALLA SPONDA DEL CASSERO IN ACCIAIO PROTETTA CON PANNELLI DI POLISTIRENE
4. SUPERFICIE LATERALE A 5 cm DALLA SPONDA DEL CASSERO DI ACCIAIO
5. TEMPERATURA AMBIENTALE



*Protezione della superficie superiore di un blocco di fondazione con pannelli termoisolanti per la riduzione dei gradienti.*

Lo sviluppo di calore ed il conseguente incremento di temperatura del getto ( $\Delta T$ ) sono funzione del tipo e della classe di resistenza del cemento adoperato, del dosaggio del cemento, dello spessore dei getti e delle caratteristiche isolanti della casseratura. Le condizioni prossime a quelle adiabatiche con pratica assenza di calore dissipato verso l'esterno nel calcestruzzo persistono per un periodo di tempo variabile da qualche decina di ore per le strutture sottili (15-30 cm di spessore) a circa 3-7 giorni per quelle aventi dimensioni superiori a 2 m. Per questo motivo, si ritiene che il rischio fessurativo di origine termica risulti ingegneristicamente poco rilevante in quelle strutture di spessore inferiore a 60-80 cm.

Nella ipotesi che non avvengano scambi termici di calore tra le superfici del getto e l'ambiente esterno, il massimo riscaldamento ( $\Delta T_{t,ad}$ ) ad un certo tempo  $t$  risulta esclusivamente funzione del calore totale sviluppato a quel tempo ( $Q_t$ ) dalla reazione di idratazione del cemento, il quale a sua volta è dipendente dal calore unitario sviluppato al tempo  $t$  dal cemento utilizzato ( $q_t$ ) e dal dosaggio ( $c$ ) dello stesso nell'impasto ( $Q_t = c \times q_t$ ).

Dall'equazione, pertanto, si evince che per diminuire il calore totale sviluppato al tempo  $t$  si debbono impiegare cementi caratterizzati da un basso calore di idratazione unitario e adottare tutti quei provvedimenti finalizzati a contenere il dosaggio di cemento. Si ricorda che il calore di idratazione del cemento sarà pesantemente influenzato dalla percentuale di clinker in esso presente, inoltre, lo sviluppo di calore aumenta con la finezza del cemento per via della maggiore frazione di cemento che ad un certo tempo ha reagito con l'acqua.

Nell'ultima versione della norma UNI EN 197-1 pubblicata nel mese di Marzo 2006, al punto 7, viene specificato che i cementi comuni che a 7 giorni sviluppano un calore di idratazione inferiore ai 270 J/g (determinato in accordo alla EN 196-8) sono classificati a "basso sviluppo di calore" e vengono identificati con la sigla LH (Low Heat) nella denominazione normalizzata (es. CEM III/B 32.5 N-LH). Inoltre, al punto 9.2.3 dei criteri di conformità del cemento si prescrive che qualunque sia la classe di resistenza per i cementi LH è imposto un limite superiore al calore di idratazione pari a 300 J/g.

Un ulteriore beneficio in termini di riduzione del calore unitario si ottiene ricorrendo all'impiego di cementi pozzolanici, d'altoforno o compositi dove la parziale sostituzione del clinker con i materiali pozzolanici determina una riduzione della velocità di sviluppo del calore per la lentezza che caratterizza la reazione pozzolanica rispetto a quella del clinker. Pertanto, si può concludere che i cementi contraddistinti dal calore di idratazione unitario più basso sono quelli di tipo pozzolanico, composito o d'altoforno confezionati con clinker a ridotto tenore di silicato e alluminato tricalcico (cementi ferrico-pozzolanici) di classe 32.5 (Tabella). Nella eventualità che questi cementi non fossero disponibili nel confezionamento dell'impasto si può ricorrere all'impiego delle ceneri volanti siliciche in parziale sostituzione del cemento<sup>52</sup>.

Calore di idratazione unitario a 3 e 7 giorni di diversi cementi disponibili in Italia.

TIPO DI CEMENTO	CLASSE DI CEMENTO	q <sub>3</sub> (kJ/kg)	q <sub>7</sub> (kJ/kg)
I	52.5 R	380 - 410	400 ÷ 430
II/A-LL	42.5 R	300 ÷ 320	330 ÷ 340
II/B-LL	32.5 N	250 ÷ 270	285 ÷ 290
II/B-M	32.5 R	250 ÷ 270	285 ÷ 290
II/A-S	42.5 R	290 ÷ 310	320 ÷ 330
III/A	32.5 R	230 ÷ 250	265 ÷ 270
III/B	32.5 N	180 ÷ 190	190 ÷ 200
IV/A (ARS)	32.5 R	200 ÷ 210 (150 - 170)	210 ÷ 220 (170 - 190)
IV/A	42.5 R	240 ÷ 290	285 ÷ 310
IV/B	32.5 R	175 ÷ 220	190 ÷ 240

Ai fini della riduzione dell'incremento di temperatura, unitamente ad una oculata scelta del tipo/classe di cemento, si possono adottare tutti quegli accorgimenti finalizzati a ridurre l'acqua di impasto e, conseguentemente, a pari classe di resistenza del calcestruzzo, a diminuire il dosaggio di cemento, quali:

- l'utilizzo di aggregati di grossa pezzatura e l'adozione di fusi granulometrici "sotto-sabbati";
- impiegare efficaci additivi super-riduttori di acqua (par. 9.4.5)<sup>53</sup>;
- ridurre, compatibilmente con le difficoltà di esecuzione del getto, la lavorabilità del calcestruzzo.

La Norma ENV 206 del 1992<sup>54</sup>, per fissare il massimo gradiente termico nelle strutture al fine di scongiurare il rischio di fessurazione nelle strutture, suggeriva di adottare calcestruzzi che sviluppassero un incremento di temperatura in condizioni adiabatiche non superiore a 20 °C. Queste indicazioni sono state ribadite alcuni anni dopo dalle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale pubblicate nel 1996 dal Consiglio Superiore dei LL.PP. Questo limite discende dal fatto che con un gradiente di 20 °C e un coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo pari a  $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (Norme Tecniche per le Costruzioni: D.M. 14/01/2008) l'allungamento del conglomerato risulterebbe di  $200 \cdot 10^{-6}$  che rappresenta il limite superiore dell'allungamento a rottura del calcestruzzo a trazione. Pertanto, limitando il gradiente termico a valori inferiori a 20°C il conglomerato sarebbe salvaguardato dalla comparsa di lesioni.

Per la definizione delle specifiche di capitolato di calcestruzzi destinati alla realizzazione di strutture massive si debbono, pertanto, integrare quelle rivolte alle normali opere in calcestruzzo ponendo delle limitazioni in termini di tipo/classe e dosaggio di cemento al fine di ottenere un gradiente termico inferiore a 35°C.

La riduzione del rischio fessurativo negli elementi massivi vincolati a strutture che si trovano già in equilibrio con la temperatura ambientale non può limitarsi alla sola minimizzazione dei gradienti termici tra cuore e corteccia del getto, ma deve avere come obiettivo la riduzione della massima temperatura raggiunta dal cuore della struttura. Pertanto,



Gruppo Cementirosi S.p.A.

in queste situazioni, soprattutto nei muri di modesto spessore vincolati alla fondazione dove il gradiente interno al getto è generalmente piccolo, dove il problema principale è rappresentato dalle tensioni di trazione generate dall'impedimento esercitato dalla fondazione alla contrazione del muro in fase di raffreddamento, può essere conveniente scassare precocemente (già alle 24 ore) e coprire le superfici del getto con un geotessile da irrorare costantemente con acqua al fine di aumentare la quantità di calore dissipato verso l'esterno riducendo la temperatura massima dell'elemento strutturale.

Inoltre, può risultare efficace per queste strutture predisporre una opportuna armatura costituita da ferri di piccolo diametro a passo raffittito per il controllo dell'ampiezza delle fessurazioni. Ove, come nel caso dei muri di vasche di contenimento di liquidi, la fessurazione, anche se di modesta ampiezza, non è consentita sarà necessario predisporre delle sezioni di giunto da presidiare con profili impermeabili per garantire la tenuta idraulica delle strutture.



Gruppo Cementirosi S.p.A.

---

<sup>52)</sup> Particolarmente indicati per la realizzazione delle strutture massive risultano i calcestruzzi ad alto volume di cenere volante (High Volume Fly-Ash: HVFA). Questo tipo di conglomerato è stato, ad esempio, utilizzato per l'appesantimento della fondazione di un muro controterra per aumentare la resistenza allo scivolamento del muro. La composizione del calcestruzzo (C16/20) era contraddistinta da cemento CE II/A-L 42.5 R: 200 Kg/m<sup>3</sup>; cenere volante: 150 Kg/m<sup>3</sup>; additivo superiduttore d'acqua: 4.8 Kg/m<sup>3</sup>; acqua: 155 Kg/m<sup>3</sup>; aggregati (D<sub>max</sub> 25 mm): 1735 Kg/m<sup>3</sup>.

<sup>53)</sup> E' da segnalare che l'impiego di additivi superfluidificanti con spiccate caratteristiche ritardanti può rivelarsi pericoloso. Infatti, se da una parte il ritardo nel processo di idratazione del cemento può rivelarsi benefico per la minore quantità di calore sviluppato dall'altra un eccessivo ritardo nell'indurimento, e quindi nello sviluppo di una sufficiente resistenza a trazione capace di fronteggiare le tensioni indotte dai gradienti termici, può esaltare il quadro fessurativo della struttura nelle prime ore successive al getto.

<sup>54)</sup> È opportuno evidenziare comunque che, contrariamente al passato, le norme UNI EN 206, UNI 11104 e le stesse Norme Tecniche di cui al D.M. 14/01/2008 non pongono alcuna limitazione al gradiente termico nelle strutture.



## CENTRALI DI BETONAGGIO

### AREA 1

CAMPODARSEGO (PD)  
049.9201600 - 9202125

RIESE PIO X (TV)  
0423.746233

NOALE (VE)  
041.440360

CANOVE DI ROANA (VI)  
0424.450444

COGOLLO DEL CENGIO (VI)  
0445.320343

MONTECCHIO PRECALCINO (VI)  
0445.330150

MARANO VICENTINO (VI)  
0445.621460

ZUGLIANO (VI)  
0445.330150

### AREA 2

MONTEBELLO VICENTINO (VI)  
0444.649949 - 440595

COLOGNA VENETA (VR)  
0442.85560 - 85500

LAZISE (VR)  
045.6472411

NOGARA (VR)  
0442.88266 - 88345

VERONA - LA RIZZA (VR)  
045.542223 - 543043

PESCANTINA (VR)  
045.6767268

VERONA SANTA LUCIA (VR)  
045.8621721

BUTTAPIETRA (VR)  
045.6660094

### AREA 3

POZZOLO (MN)  
0376.460288

REVERE (MN)  
0376.615395

SAN BENEDETTO PO (MN)  
0376.615395

MANTOVA (MN)  
0376.271266 - 271240

BASTIGLIA (MO)  
059.661853 - 661000

CARPI (MO)  
059.661853 - 661000

MEDOLLA (MO)  
0535.20308 - 27263

MODENA (MO)  
059.512699 - 512694

FINALE EMILIA (MO)  
339.6829949

PAVONE DEL MELLA (BS)  
030.959650

### LABORATORI

PIACENZA (PC)

CAMPODARSEGO (PD)

LAZISE (VR)

MANTOVA (MN)

MODENA (MO)

PESCANTINA (VR)

### AREA 4

FIorenzuola D'ARDA (PC)  
0523.982095

GOSSOLENGO (PC)  
0523.603060

PIACENZA (PC)  
0523.603060

PARMA (PR)  
0521.607033

### AREA 5

ACQUANEGRA CREMONESE (CR)  
0372-32320

BAGNOLO CREMASCO (CR)  
0373-648244

CAMAIRAGO (LO)  
0377-34878

MONTANASO LOMBARDO (LO)  
0371-610653

SANT'ANGELO LODIGIANO (LO)  
0371-90564

TRUCCAZZANO (MI)  
02-95309208

SAN DONATO MILANESE (MI)  
02-5391124

ZIBIDO SAN GIACOMO (MI)  
02-90005279

BAREGGIO (MI)  
02-90360667

ABBIATEGRASSO (MI)  
02-94969122

PAVIA (PV)  
0382-460421

ARENA PO (PV)  
0385-49373

LANDRIANO (PV)  
0382-615740

### AREA 7

ROMAGNANO (TN)  
0461.349117

LAVIS (TN)  
0461.240690

ARCO (TN)  
0464.518133

ROVERETO (TN)  
0464.944066

NAGO (TN)  
0464.54818

EGNA (BZ)  
0471.812289







Gruppo Cementirossi S.p.A.

[www.betonrossi.it](http://www.betonrossi.it)

**Betonrossi S.p.A.** Via Caorsana, 11 - 29122 Piacenza - Tel. 0523.603011 Fax 0523.612765