

Relazione del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in
Ambiente, Salute e Processi Ecosostenibili
Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Modellistica per l'Ingegneria
Università della Calabria
XXI Ciclo

Nell'ambito del Corso di Dottorato di Ricerca in "Ambiente, Salute e Processi Ecosostenibili", l'ing. Serafino MARCHESE ha svolto una ricerca riguardante diversi aspetti e caratteristiche dei calcestruzzi innovativi ed a basso impatto ambientale sotto la direzione del prof. Fortunato Crea.

La ricerca è stata realizzata presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dove da tempo sono in corso studi sulla realizzazione di calcestruzzi innovativi ed in particolare di calcestruzzi realizzati mediante l'utilizzo di materiali zeolitici.

Il lavoro svolto dal Dottorando Serafino MARCHESE ha presentato carattere di originalità completezza, avendo affrontato un argomento estremamente vasto e di notevole interesse per lo sviluppo tecnologico del settore dell'edilizia nella direzione della sostenibilità ambientale. Tale lavoro è stato suddiviso in tre parti: una riguardante la realizzazione e caratterizzazione di calcestruzzi ad alte prestazioni, la seconda il confezionamento e la descrizione delle prove sui calcestruzzi confezionati con aggregati da riciclo. In questo contesto è da evidenziare l'utilizzazione di materiali microporosi fini e metodiche sperimentali utili al raggiungimento del giusto mix design, responsabile degli ottimi risultati sperimentali ottenuti.

Il lavoro risulta esaustivo dell'argomento ed eseguito con estrema cura e competenza, infatti i risultati generali ottenuti incoraggiano l'utilizzo di tali calcestruzzi nelle realtà applicative del mercato, risultando di notevole interesse.

In tutte e tre le tipologie di calcestruzzi realizzate sono stati utilizzati materiali provenienti dal mercato locale con l'obiettivo di ridurre i costi energetici per il trasporto da altre realtà. Nella realizzazione dei diversi tipi di calcestruzzo sono stati impiegati materiali reperiti sul mercato locale e confrontati con altrettanti tipi di calcestruzzo realizzati con materiali già sperimentati, ma provenienti da realtà mondiali diverse. Sono stati valutati diversi sistemi leganti - additivo - filler variabili sia nella natura dei costituenti che nelle loro relative proporzioni. Successivamente si è passato a progettare e produrre conglomerati cementizi usando i sistemi legante - additivo - filler ottimizzati in una prima fase. Per il confezionamento dei conglomerati sono stati impiegati, inoltre, aggregati provenienti da rifiuti da costruzione e demolizione. La sperimentazione ha mirato alla valutazione degli effetti di una sostituzione parziale e completa dell'aggregato naturale con l'aggregato riciclato. Inoltre il lavoro è stato mirato ad una precisa individuazione di metodiche sperimentali necessarie a caratterizzare gli aggregati riciclati ed all'individuazione dei parametri che influenzano le proprietà, chimiche, fisico - meccaniche dei calcestruzzi realizzati

Dagli esiti della ricerca condotta dall'Ing. Serafino MARCHESE si è evidenziato in modo inequivocabile come siano paragonabili ed in alcuni casi migliori i valori espressi dalle prove di lavorabilità, di resistenza meccanica, di resistenza ai cicli di gelo e disgelo, di resistenza agli attacchi chimici dei calcestruzzi realizzati con i materiali autoctoni rispetto a quelli preparati con materiali convenzionalmente adoperati, infatti i migliori risultati per tutti i tipi di calcestruzzo confezionato si sono avuti con l'utilizzo della zeolite 5A industriale come materiale finissimo utilizzato, sia i valori di lavorabilità, di resistenza meccanica, di resistenza agli agenti aggressivi che di resistenza ai cicli di gelo e disgelo hanno mostrato notevoli miglioramenti rispetto alle altre aggiunte finissime utilizzate.

L'intero lavoro di ricerca si è caratterizzato per l'assenza di specifici corsi universitari consolidati sull'argomento trattato, perciò in questo senso è da apprezzare l'autonomia, la professionalità e la capacità di apprendere del Dottorando Serafino MARCHESE, che non solo si è dimostrato in grado di coordinare con successo i vari aspetti del lavoro, ma anche di saperli trasferire ai livelli di formazione più bassi seguendo, come co-relatore, 1 tesi di laurea triennale, 3

tesi di laurea specialistica e 6 tesi di laurea magistrale in ingegneria edile e civile. I risultati degli studi condotti e delle attività sperimentali hanno portato alla presentazione di una comunicazione orale e tre poster, durante la partecipazione a 4 convegni durante la partecipazione a convegni nazionali ed internazionali, inoltre è coautore di 2 pubblicazioni su atti di un convegno internazionale e 5 pubblicazioni su atti di convegni nazionali.

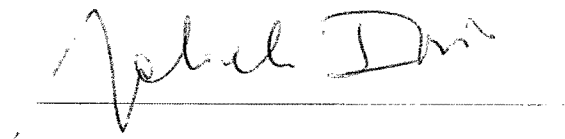
Durante il triennio di dottorato ha svolto per due anni successivi le esercitazioni del corso di Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata del corso di laurea in Ingegneria Edile - Architettura.

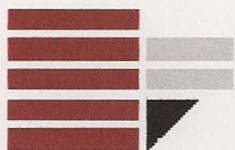
Si vuole evidenziare infine le buone qualità relazionali messe in mostra negli anni di dottorato, che gli hanno consentito di interagire facilmente con i vari gruppi di ricerca con cui ha collaborato.

Il Collegio dei Docenti, visto l'impegno profuso e la qualità della sua attività, esprime giudizio favorevole ai fini dell'ammissione dell'Ing. Serafino MARCHESE all'esame finale per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca in "Ambiente, Salute e Processi Ecosostenibili".

Addì, 9 dicembre 2010

Per il Coordinatore del Collegio
Prof. Gabriele Iorio

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Gabriele Iorio", is written over a horizontal line. The signature is fluid and cursive.



Università della Calabria



Ministero dell'Università e della
Ricerca Scientifica e Tecnologica



Unione Europea
Fondo Sociale Europeo

Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali

DOTTORATO DI RICERCA IN AMBIENTE, SALUTE E PROCESSI

ECOSOSTENIBILI

XXI° CICLO

TESI

**STUDIO, PROGETTAZIONE, CARATTERIZZAZIONE DI MATERIALI
INNOVATIVI A BASE CEMENTIZIA ECOCOMPATIBILI**

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE ING-IND 22 – SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI

Supervisore

Prof. Fortunato CREA

Candidato

Serafino MARCHESE

Coordinatore del Corso di Dottorato

Prof. Bruno DE CINDIO

A. A. 2009/2010

A Giuliana

INDICE

| | |
|-------------------|---|
| INTRODUZIONE..... | 1 |
|-------------------|---|

CAPITOLO 1

CALCESTRUZZI A BASSO IMPATTO AMBIENTALE: HPC, SCC, CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI

| | | |
|---------|--|----|
| 1.1 | Calcestruzzi ad alte prestazioni..... | 5 |
| 1.1.1 | Microstruttura..... | 8 |
| 1.1.2 | Zona di Transizione..... | 9 |
| 1.1.3 | Proprietà Fisiche ed Elasto-Meccaniche..... | 12 |
| 1.1.4 | Modulo di Elasticità a Compressione e Coefficiente di Poisson..... | 17 |
| 1.1.5 | Resistenza a Trazione..... | 18 |
| 1.1.6 | Ritiro Igrometrico..... | 19 |
| 1.1.7 | Durabilità..... | 19 |
| 1.1.8 | Permeabilità..... | 20 |
| 1.1.9 | Carbonatazione..... | 21 |
| 1.1.10 | Dilavamento..... | 22 |
| 1.1.11 | Attacco Solfatico..... | 23 |
| 1.1.12 | Penetrazione dei Cloruri e Corrosione dei ferri d'armatura..... | 23 |
| 1.1.13 | Resistenza ai cicli ripetuti di Gelo e Disgelo..... | 25 |
| 1.1.14 | Lavorabilità e Messa in Opera..... | 25 |
| 1.1.15 | Benefici prodotti dagli HPC..... | 26 |
| 1.1.16 | Realizzazioni Strutturali con HPC..... | 27 |
| 1.2 | Calcestruzzi autocompattanti (SCC)..... | 30 |
| 1.2.1 | Premessa..... | 30 |
| 1.2.2 | Requisiti prestazionali..... | 31 |
| 1.2.2.1 | Reologia..... | 31 |
| 1.2.2.2 | Compattabilità..... | 32 |
| 1.2.2.3 | Lavorabilità..... | 34 |
| 1.2.2.4 | Resistenza meccanica..... | 35 |
| 1.2.2.5 | Deformazione..... | 35 |
| 1.2.2.6 | Durabilità..... | 35 |
| 1.2.3 | Classificazione dei Calcestruzzi Autocompattanti..... | 36 |
| 1.2.4 | Mix Design dell'SCC..... | 36 |
| 1.2.4.1 | Materiali componenti..... | 36 |
| 1.2.5 | Progettazione..... | 38 |
| 1.2.6 | Metodologie di prova..... | 40 |
| 1.2.6.1 | Slump Flow..... | 40 |
| 1.2.6.2 | J-Ring..... | 41 |
| 1.2.6.3 | V-Funnel..... | 42 |
| 1.2.6.4 | L-Box..... | 43 |
| 1.2.7 | Normativa..... | 44 |
| 1.3 | Calcestruzzi con aggregati riciclati..... | 46 |
| 1.3.1 | Premessa..... | 46 |
| 1.3.2 | Proprietà degli aggregati riciclati..... | 49 |
| 1.3.2.1 | Massa volumica..... | 49 |
| 1.3.2.2 | Assorbimento dell'acqua..... | 49 |
| 1.3.2.3 | Sostanze non desiderabili..... | 51 |
| 1.3.3 | Il calcestruzzo allo stato fresco..... | 53 |
| 1.3.4 | Il calcestruzzo allo stato indurito..... | 53 |
| 1.3.5 | Campi d'utilizzo dei materiali riciclati..... | 54 |
| 1.3.5.1 | Materiale sciolto per rilevati stradali e ferroviari..... | 54 |
| 1.3.5.2 | Misto per strato di fondazione..... | 56 |
| 1.3.5.3 | Altri usi in via di sperimentazione..... | 57 |

CAPITOLO 2

MATERIALI E PER I CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI (HPC), AUTOCOMPATTANTI (SCC) E PER I CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI

| | | |
|---------|-----------------------------------|----|
| 2.1 | Premessa | 59 |
| 2.2 | Cemento | 63 |
| 2.3 | Acqua | 66 |
| 2.4 | Aggregati..... | 67 |
| 2.4.1 | Idoneità degli Aggregati..... | 69 |
| 2.4.1.1 | Cloruri..... | 70 |
| 2.4.1.2 | Solfati..... | 70 |
| 2.4.1.3 | Silice Alcali-Reattiva..... | 71 |
| 2.4.1.4 | Sostanze Limo-Argillose..... | 73 |
| 2.4.1.5 | Sostanze Organiche..... | 73 |
| 2.4.1.6 | Gelività..... | 74 |
| 2.4.2 | Umidità degli Aggregati..... | 75 |
| 2.5 | Additivi | 76 |
| 2.6 | Aggiunte Minerali Attive | 80 |
| 2.6.1 | Silica fume..... | 81 |
| 2.6.2 | Loppa granulata d'altoforno | 84 |
| 2.6.3 | Ceneri volanti | 86 |
| 2.6.4 | Pozzolane naturali | 88 |
| 2.6.5 | Cenere di pula di riso..... | 90 |
| 2.6.6 | Metacaolino..... | 91 |
| 2.6.7 | Filler Calcareo | 93 |
| 2.6.8 | Zeoliti | 93 |

CAPITOLO 3

ZEOLITI NATURALI E SINTETICHE

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.1 | Premessa | 95 |
| 3.2 | Zeoliti..... | 96 |
| 3.3 | Caratteristiche pozzolaniche | 98 |
| 3.4 | Proprietà di calcestruzzi contenenti zeoliti naturali..... | 99 |
| 3.4.1 | Calcestruzzi con cementi pozzolanici a base di zeolite naturale | 99 |
| 3.5 | Zeoliti Sintetiche | 100 |
| 3.5.1 | Definizione chimica | 102 |
| 3.5.2 | Proprietà ed applicazioni | 103 |
| 3.5.3 | Sintesi delle zeoliti | 106 |
| 3.5.3.1 | Natura e composizione della miscela reagente..... | 107 |
| 3.5.3.2 | Temperatura, pressione e condizioni del sistema di sintesi..... | 108 |
| 3.6 | Zeolite LTA..... | 109 |
| 3.6.1 | Zeoliti 3A, 4A, 5A..... | 112 |
| 3.6.1.1 | Zeolite 4A..... | 112 |
| 3.6.1.2 | Zeolite 5A | 113 |

CAPITOLO 4

MATERIALI E METODI DEI CALCESTRUZZI HPC, SCC E DEI CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI

| | | |
|------------|--|-----|
| 4.1. | Premessa | 114 |
| 4.2. | Metodi di Prova..... | 114 |
| 4.2.1. | Analisi diffrattometrica ai raggi X..... | 115 |
| 4.2.2. | Microscopia elettronica a scansione..... | 117 |
| 4.2.3. | Microanalisi a dispersione di energia..... | 118 |
| 4.2.4. | Analisi Termica | 119 |
| 4.2.5. | Prove meccaniche di resistenza..... | 120 |
| 4.2.6. | Prove sugli SCC allo stato fresco..... | 121 |
| 4.2.6.1. | Normativa..... | 121 |
| 4.2.6.2. | Slump Flow..... | 121 |
| 4.2.6.3. | J-Ring..... | 123 |
| 4.2.6.4. | V-Funnel..... | 125 |
| 4.2.7. | Determinazione penetrabilità dello ione cloruro..... | 126 |
| 4.2.8. | Determinazione penetrabilità dello ione solfato..... | 127 |
| 4.2.9. | Carbonatazione..... | 129 |
| 4.2.10. | Cicli di gelo e disgelo..... | 129 |
| 4.2.11. | Prove di ritiro..... | 130 |
| 4.2.12. | Prove sugli aggregati dei calcestruzzi con aggregati da riciclo..... | 130 |
| 4.2.12.1. | Prova al solfato di magnesio..... | 130 |
| 4.3. | Materiali Utilizzati..... | 131 |
| 4.3.1. | Materiali per calcestruzzi HPC..... | 132 |
| 4.3.1.1. | Cementi..... | 132 |
| 4.3.1.1.1. | Caratterizzazione meccanica..... | 134 |
| 4.3.1.1.2. | Analisi termica..... | 137 |
| 4.3.1.1.3. | Analisi diffrattometrica..... | 139 |
| 4.3.1.1.4. | Microanalisi a dispersione di energia..... | 140 |
| 4.3.1.1.5. | Microscopia elettronica a scansione..... | 142 |
| 4.3.1.2. | Aggregati..... | 143 |
| 4.3.1.2.2. | Analisi diffrattometrica ai raggi X..... | 152 |
| 4.3.1.2.3. | Analisi chimica..... | 154 |
| 4.3.1.3. | Zeoliti..... | 156 |
| 4.3.1.3.2. | Preparazione e caratterizzazione della zeolite 5A..... | 159 |
| 4.3.1.3.3. | Caratterizzazione della zeolite 4A industriale..... | 160 |
| 4.3.1.3.4. | Caratterizzazione della zeolite 5A industriale..... | 161 |
| 4.3.1.4. | Additivi..... | 162 |
| 4.3.1.5. | Silica fume..... | 163 |
| 4.3.1.6. | Acqua d'impasto..... | 163 |
| 4.3.2. | Materiali per calcestruzzi SCC..... | 164 |
| 4.3.2.1. | I cementi..... | 164 |
| 4.3.2.1.1. | Caratterizzazione meccanica..... | 165 |
| 4.3.2.1.2. | Analisi diffrattometrica..... | 167 |
| 4.3.2.2. | Gli aggregati naturali..... | 168 |
| 4.3.2.2.1. | Analisi granulometrica della sabbia..... | 169 |
| 4.3.2.2.2. | Analisi diffrattometrica..... | 170 |
| 4.3.2.3. | Le zeoliti..... | 171 |
| 4.3.2.3.1. | Caratterizzazione della zeolite 5A industriale..... | 173 |
| 4.3.2.4. | Il filler calcareo..... | 175 |
| 4.3.2.4.1. | Caratterizzazione del filler calcareo..... | 175 |
| 4.3.2.5. | Silica fume..... | 177 |
| 4.3.2.5.1. | Caratteristiche tecniche..... | 177 |
| 4.3.2.5.2. | Modalità di impiego..... | 178 |
| 4.3.2.5.3. | Analisi diffrattometrica..... | 178 |
| 4.3.2.6. | Gli additivi..... | 178 |
| 4.3.2.6.1. | Viscofluid SCC/10..... | 180 |
| 4.3.2.7. | L'acqua d'impasto..... | 182 |
| 4.3.3. | Materiali per calcestruzzi con aggregati da riciclo..... | 182 |
| 4.3.3.1. | I cementi..... | 182 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 4.3.3.1.1. | Caratterizzazione meccanica | 183 |
| 4.3.3.1.2. | Analisi diffrattometrica..... | 186 |
| 4.3.3.2. | Gli aggregati riciclati..... | 187 |
| 4.3.3.2.1. | Reperimento e analisi di caratterizzazione. | 187 |
| 4.3.3.2.2. | Analisi granulometrica. | 187 |
| 4.3.3.2.3. | Condizione di s.s.a. (saturazione a superficie asciutta)..... | 190 |
| 4.3.3.2.4. | Analisi diffrattometrica. | 191 |
| 4.3.3.2.5. | Microanalisi a dispersione di energia. | 197 |
| 4.3.3.2.6. | Prova al solfato di magnesio..... | 200 |
| 4.3.3.3. | Gli aggregati naturali..... | 201 |
| 4.3.3.3.1. | Analisi granulometrica della sabbia..... | 201 |
| 4.3.3.3.2. | Analisi diffrattometrica..... | 202 |
| 4.3.3.3.3. | Microanalisi a dispersione di energia. | 205 |
| 4.3.3.4. | Acqua d'impasto. | 207 |
| 4.3.3.5. | Gli additivi. | 208 |

CAPITOLO 5

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.1 | Premessa | 212 |
| 5.2 | Malte | 212 |
| 5.3 | Preparazione e stagionatura dei provini | 212 |
| 5.3.1 | Resistenza a compressione dei provini realizzati con il CEM I 42,5 R..... | 212 |
| 5.3.2 | Resistenza a compressione dei provini realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R | 216 |
| 5.3.3 | Resistenza a compressione dei provini realizzati con il CEM III/A 42,5 N | 220 |
| 5.3.4 | Valutazione dell'effetto delle zeoliti sulle resistenze a compressione..... | 223 |
| 5.4 | Calcestruzzi HPC | 225 |
| 5.4.1 | HPC con cemento Portland. | 225 |
| 5.4.1.1 | Prove eseguite. | 225 |
| 5.4.1.2 | Lavorabilità. | 229 |
| 5.4.1.3 | Resistenza a compressione. | 231 |
| 5.4.1.4 | Curve carico – spostamento. | 234 |
| 5.4.2 | HPC con cemento Portland alla loppa. | 236 |
| 5.4.2.1 | Prove eseguite. | 237 |
| 5.4.2.2 | Lavorabilità. | 237 |
| 5.4.2.3 | Resistenza a compressione | 239 |
| 5.4.2.4 | Curve carico – spostamento. | 242 |
| 5.4.3 | HPC con cemento d'altoforno. | 244 |
| 5.4.3.1 | Prove eseguite. | 245 |
| 5.4.3.2 | Lavorabilità. | 245 |
| 5.4.3.3 | Resistenza a compressione. | 246 |
| 5.4.3.4 | Curve carico – spostamento. | 250 |
| 5.4.4 | Valutazione sull'effetto delle zeoliti sulle resistenze a compressione. | 252 |
| 5.5 | Durabilità | 254 |
| 5.5.1 | Attacco ai cloruri | 255 |
| 5.5.1.1 | Procedimento della prova..... | 255 |
| 5.5.2 | Attacco ai solfati..... | 260 |
| 5.5.2.1 | Procedimento della prova..... | 261 |
| 5.5.3 | Carbonatazione..... | 267 |
| 5.5.3.1 | Procedimento della prova..... | 267 |
| 5.5.4 | Cicli di gelo e disgelo | 268 |
| 5.5.4.1 | Procedimento della prova..... | 270 |
| 5.6 | Ritiro | 276 |
| 5.6.1 | Ritiro igrometrico del calcestruzzo..... | 278 |
| 5.6.2 | Ritiro autogeno | 280 |
| 5.6.3 | Influenza dell'additivo sul ritiro. | 282 |
| 5.6.4 | Ritiro dei provini | 283 |
| 5.6.4.1 | Ritiro del provino di calcestruzzo privo di additivo..... | 284 |

CAPITOLO 6

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1 | Premessa | 286 |
| 6.2 | Progettazione delle miscele | 287 |
| 6.2.1 | Materiali | 287 |
| 6.2.2 | Proporzionamento e mix-design | 288 |
| 6.2.3 | Miscele ottimali | 288 |
| 6.3 | Prove sul calcestruzzo autocompattante allo stato fresco | 293 |
| 6.3.1 | Slump - Flow | 293 |
| 6.3.2 | J-Ring | 296 |
| 6.3.3 | V-Funnel Test | 298 |
| 6.4 | Resistenza meccanica | 300 |
| 6.4.1 | Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo ai diversi tempi di stagionatura | 304 |
| 6.5 | Prove di durabilità: resistenza alla degradazione per i cicli di gelo e disgelo | 309 |
| 6.5.1 | Procedimento della prova e risultati | 310 |
| 6.6 | Ritiro | 320 |
| 6.7 | Conclusioni | 327 |

CAPITOLO 7

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI CALCESTRUZZI CON AGGREGATI DA RICICLO

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.1 | Premessa | 330 |
| 7.2 | Studio delle miscele | 330 |
| 7.3 | Determinazione delle curve granulometriche | 331 |
| 7.4 | Dosaggio delle miscele | 340 |
| 7.5 | Impasti ottimali | 344 |
| 7.6 | Confronti ed osservazioni | 370 |
| 7.6.1 | Lavorabilità | 370 |
| 7.6.2 | Resistenza a compressione | 372 |
| 7.7 | Determinazione penetrabilità dello ione cloruro | 380 |
| 7.8 | Determinazione penetrabilità dello ione solfato | 381 |
| 7.9 | Prove di ritiro | 382 |
| 7.9.1 | Stagionatura e misurazioni | 383 |
| | Conclusioni | 388 |
| | Bibliografia | 394 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|-----|
| Fig. 1.1 - Allocamento delle particelle di silica fume tra i granuli di cemento | 8 |
| Fig. 1.2 - Rappresentazione schematica di un calcestruzzo nella zona di transizione tra aggregato lapideo e matrice cementizia..... | 10 |
| Fig. 1.3 - Andamento schematico nel tempo della porosità nella matrice cementizia e della zona di transizione del calcestruzzo | 11 |
| Fig. 1.4 - Effetto della silica fume sulla resistenza del calcestruzzo..... | 12 |
| Fig. 1.5 - Diagramma sforzo-deformazione (a compressione) di calcestruzzi ad alta resistenza comparati con calcestruzzi tradizionali..... | 14 |
| Fig. 1.6 - Andamento schematico della curva sforzo-deformazione di cls tradizionali (a), ad alta resistenza (b) e dei relativi costituenti | 15 |
| Fig. 1.7 - Curva sforzo-deformazione di cls aventi stessa resistenza a compressione, confezionati con aggregato di diverso modulo elastico. | 17 |
| Fig. 1.8 - Dipendenza della permeabilità dalla dimensione dei pori..... | 20 |
| Fig. 1.9 - Confronto nella resistenza meccanica dei provini compattanti a rifiuto e della carota estratta dalla struttura. | 33 |
| Fig. 1.10 - Dispositivo per effettuare lo slump flow test. | 41 |
| Fig. 1.11 - Dispositivo per effettuare il test J ring | 42 |
| Fig. 1.12 - Dispositivo per effettuare il V funnel test. | 43 |
| Fig. 1.13 - Dispositivo per effettuare il test L-Box | 43 |
| Fig. 1.14 - Dispositivo per effettuare il test U-box | 44 |
| Fig. 1.15 - Confronto visivo tra aggregati naturali (a sinistra) e riciclati (a destra)..... | 49 |
| Fig. 1.16 - Assorbimento d'acqua in funzione della massa volumica dell'aggregato riciclato..... | 50 |
| Fig. 2.1 - Aggiunte ed Additivi tipici di un calcestruzzo ad Alta Resistenza | 59 |
| Fig. 2.2 - Fessure da reazione alcali-aggregato evidenziate dalla presenza del silicato idrato alcalino di colore biancastro..... | 72 |
| Fig. 2.3 - Micrografia al microscopio elettronico delle sferette di..... | 81 |
| Fig. 2.4 - Effetti dell'introduzione di silica fume per ottenere resistenze a compressione superiori a 80 MPa..... | 82 |
| Fig. 3.1 - Schematizzazione del singolo tetraedro silicico:..... | 96 |
| Fig. 3.2 - Rappresentazione schematica della relazione tra: quarzo a) a basse temperature e b) ad alte temperature. | 97 |
| Fig. 3.3 - Schema ad otto e dieci elementi in cerchio che formano i canali nella clinoptilolite. Differente forma dei canali A e B..... | 98 |
| Fig. 3.4 - Unità tetraedrica. | 100 |
| Fig. 3.5 - Costruzione delle unità di alcuni reticoli zeolitici | 100 |
| Fig. 3.6 - Bilanciamento elettronico di SiO_4 e $(\text{AlO}_4)^-$ | 101 |
| Fig. 3.7 - Rappresentazione della zeolite LTA. | 110 |
| Fig. 3.8 - Unità di cella e siti cationici della zeolite A..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 4.1 - Condizione geometrica di diffrazione dei raggi X..... | 115 |
| Fig. 4.2 - Condizioni in cui non si verifica la diffrazione..... | 116 |
| Fig. 4.3 - Diffrattometro a raggi X Philips PW 1730/10..... | 116 |
| Fig. 4.4 - Microscopio elettronico a scansione FEI INSPECT..... | 118 |
| Fig. 4.5 - Analizzatore termico Netzsch STA 409..... | 119 |
| Fig. 4.6 - Pressa Matest utilizzata per le prove sui calcestruzzi..... | 120 |
| Fig. 4.7 - compressore per rottura a flessione (a) e compressore per rottura a compressione (b)..... | 121 |
| Fig. 4.8 - Dispositivo usato per lo slump test (dimensioni in mm)..... | 123 |
| Fig. 4.9 - Alcune immagini sullo svolgimento dello slump-flow test..... | 123 |
| Fig. 4.10 - Prova dell'anello a J..... | 124 |
| Fig. 4.11 - prova dell'imbuto a V..... | 126 |
| Fig. 4.12 - Aggregati immersi in una soluzione satura di solfato di magnesio..... | 131 |
| Fig. 4.13 - Classificazione dei cementi secondo la norma UNI EN 197-1..... | 133 |
| Fig. 4.14 - Requisiti fisici e meccanici dei vari tipi di cemento..... | 133 |
| Fig. 4.15 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM I 42,5 R, a diverse stagionature..... | 135 |
| Fig. 4.16 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/A-S 42,5 R, a diverse stagionature..... | 136 |
| Fig. 4.17 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM III/A 42,5 N, a diverse stagionature..... | 137 |
| Fig. 4.18 - Analisi termica del campione di legante CEM I 42,5 R..... | 137 |
| Fig. 4.19 - Analisi termica del campione di legante CEM II/A-S 42,5 R..... | 138 |
| Fig. 4.20 - Analisi termica del campione di legante CEM III/A 42,5 N..... | 138 |
| Fig. 4.21 - Diffrattogramma della polvere del campione di CEM I 42,5 R..... | 139 |
| Fig. 4.22 - Diffrattogramma della polvere del campione di CEMII/A-S 42,5 R..... | 139 |
| Fig. 4.23 - Diffrattogramma della polvere del campione di CEMIII/A 42,5 N..... | 140 |
| Fig. 4.24 - Microanalisi del campione di cemento CEM I 42,5 R..... | 141 |
| Fig. 4.25 - Microanalisi del campione di cemento CEM II/A-S 42,5 R..... | 141 |
| Fig. 4.26 - Microanalisi del campione di cemento CEM III/A 42,5 N..... | 142 |
| Fig. 4.27 - Micrografia del CEM I 42,5 R..... | 142 |
| Fig. 4.28 - Micrografia del CEM II/A-S 42,5 R..... | 143 |
| Fig. 4.29 - Micrografia del CEM III/A 42,5 N..... | 143 |
| Fig. 4.30 - Curva granulometrica della sabbia secondo i dati della tabella 4.4 con scala lineare per l'apertura dei setacci..... | 145 |
| Fig. 4.31 - Curva granulometrica per il calcolo grafico dell'assortimento dei due inerti..... | 149 |
| Fig. 4.32 - Analisi termica del campione trattenuto a 10 mm..... | 151 |
| Fig. 4.33 - Analisi termica del campione trattenuto a 4 mm..... | 152 |
| Fig. 4.34 - Diffrattogramma del campione trattenuto a 10 mm..... | 152 |
| Fig. 4.35 - Diffrattogramma del campione trattenuto a 4 mm..... | 153 |
| Fig. 4.36 - Diffrattogramma del campione passante a 4 mm..... | 153 |
| Fig. 4.37 - Diffrattogramma del campione di sabbia..... | 154 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4.38 - Analisi chimica del campione trattenuto a 10 mm. | 154 |
| Fig. 4.39 - Analisi chimica del campione trattenuto a 4 mm. | 155 |
| Fig. 4.40 - Analisi chimica del campione passante a 4 mm. | 155 |
| Fig. 4.41 - Analisi chimica del campione di sabbia. | 156 |
| Fig. 4.42 - DiffrattoGRAMMA della polvere dei cristalli di zeolite A..... | 158 |
| Fig. 4.43 - Micrografia dei cristalli di zeolite A ottenuti dal gelo: 2,37 Na ₂ O 1,90 SiO ₂ 1 Al ₂ O ₃ (50,8+11,2) H ₂ O omogeneizzato e mantenuto a 25°C per 168 ore. Dalla microanalisi si rileva che il rapporto Si/Al e il rapporto Na/Al sono uguali ad 1, tipici di una zeolite A pura..... | 158 |
| Fig. 4.44 - Microanalisi della zeolite 4A. | 159 |
| Fig. 4.45 - Analisi termica della zeolite 4A. | 159 |
| Fig. 4.46 - Microanalisi della zeolite 5A di laboratorio..... | 160 |
| Fig. 4.47 - Micrografia dei cristalli di zeolite 4A industriale..... | 161 |
| Fig. 4.48 - Microanalisi della zeolite 4A industriale..... | 161 |
| Fig. 4.49 - Microanalisi della zeolite 5A industriale..... | 162 |
| Fig. 4.50 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/B-LL 32,5 R bianco, a diverse stagionature. | 166 |
| Fig. 4.51 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM I 52,5 R bianco, a diverse stagionature. | 167 |
| Fig. 4.52 - DiffrattoGRAMMA della polvere del campione di CEM II/B-LL 32,5 R bianco. | 167 |
| Fig. 4.53 - DiffrattoGRAMMA della polvere del campione di CEM I 52,5 R bianco..... | 168 |
| Fig. 4.54 - Curva granulometrica media della sabbia. | 170 |
| Fig. 4.55 - DiffrattoGRAMMA del campione di sabbia utilizzata negli impasti. | 170 |
| Fig. 4.56 - DiffrattoGRAMMA del campione di trattenuto a 7.1 mm utilizzato negli impasti..... | 171 |
| Fig. 4.57 - DiffrattoGRAMMA del campione di trattenuto a 10 mm utilizzato negli impasti..... | 171 |
| Fig. 4.58 - DiffrattoGRAMMA della polvere dei cristalli di zeolite 5A..... | 174 |
| Fig. 4.59 - Micrografia dei cristalli di zeolite 5A. | 174 |
| Fig. 4.60 - Analisi termica della zeolite 5A. | 174 |
| Fig. 4.61 - Microanalisi della zeolite 5A. | 175 |
| Fig. 4.62 - DiffrattoGRAMMA del campione di filler calcareo. | 175 |
| Fig. 4.63 - Analisi termica del campione di filler calcareo..... | 176 |
| Fig. 4.64 - Analisi chimica del Filler calcareo..... | 176 |
| Fig. 4.65 - Micrografia del filler calcareo..... | 177 |
| Fig. 4.66 - DiffrattoGRAMMA della silica fume Mapeplast SF. | 178 |
| Fig. 4.67 - Grafico A: prove di resistenza; Grafico B: prove di consistenza. | 180 |
| Fig. 4.68 - Schematizzazione delle catene del Viscofluid SCC/10 nel calcestruzzo in quiete e in movimento. | 181 |
| Fig. 4.69 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con..... | 184 |
| Fig. 4.70 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con..... | 185 |
| Fig. 4.71 - DiffrattoGRAMMA della polvere del campione di CEM II/A-LL 32,5 R..... | 186 |
| Fig. 4.72 - DiffrattoGRAMMA della polvere del campione di CEM II/A-L 42,5 R. | 186 |
| Fig. 4.73 - Analisi granulometrica | 187 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4.74 - Curva granulometrica campione n°1..... | 189 |
| Fig. 4.75 - Curva granulometrica campione n°2..... | 190 |
| Fig. 4.76 - Curva granulometrica dell'aggregato riciclato..... | 190 |
| Fig. 4.77 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 16 mm..... | 192 |
| Fig. 4.78 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 10 mm..... | 192 |
| Fig. 4.79 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 7,1 mm..... | 193 |
| Fig. 4.80 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 4 mm..... | 193 |
| Fig. 4.81 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 2,8 mm..... | 194 |
| Fig. 4.82 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,850 mm..... | 194 |
| Fig. 4.83 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,425 mm..... | 195 |
| Fig. 4.84 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,250 mm..... | 195 |
| Fig. 4.85 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,106 mm..... | 196 |
| Fig. 4.86 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato passante a 0,106 mm..... | 196 |
| Fig. 4.87 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 10 mm. | 197 |
| Fig. 4.88 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 7,1 mm. | 197 |
| Fig. 4.89 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 4 mm. | 198 |
| Fig. 4.90 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,850 mm. | 198 |
| Fig. 4.91 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,425 mm. | 199 |
| Fig. 4.92 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,250 mm. | 199 |
| Fig. 4.93 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato passante a 0,106 mm. | 200 |
| Fig. 4.94 - Aggregati dopo la prova al solfato di magnesio..... | 201 |
| Fig. 4.95 - Curva granulometrica della sabbia..... | 202 |
| Fig. 4.96 - Difrattogramma del campione di aggregato naturale trattenuto a 10 mm..... | 203 |
| Fig. 4.97 - Difrattogramma del campione di aggregato naturale trattenuto a 4 mm..... | 203 |
| Fig. 4.98 - Difrattogramma del campione di aggregato naturale passante a 4 mm..... | 204 |
| Fig. 4.99 - Difrattogramma del campione di sabbia. | 204 |
| Fig. 4.100 - Analisi chimica del campione di aggregato naturale trattenuto a 10mm..... | 205 |
| Fig. 4.101 - Analisi chimica del campione di aggregato naturale trattenuto a 4 mm..... | 205 |
| Fig. 4.102 - Analisi chimica del campione di aggregato naturale passante a 4 mm. | 206 |
| Fig. 4.103 - Analisi chimica del campione di sabbia. | 206 |
| Fig. 4.104 - Matrice cementizia (A) senza e (B) in presenza di additivo fluidificante..... | 211 |
| Fig. 5.1 - Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni | 213 |
| Fig. 5.2 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 2 giorni, realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R. | 214 |
| Fig. 5.3 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 7 giorni, realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R. | 215 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 5.4 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 28 giorni, realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R. | 215 |
| Fig. 5.5 - Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni. | 217 |
| Fig. 5.6 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 2 giorni, realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R. | 218 |
| Fig. 5.7 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 7 giorni, realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R. | 218 |
| Fig. 5.8 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 28 giorni, realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R. | 219 |
| Fig. 5.9 - Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N ed il 10% delle varie sostituzioni. | 220 |
| Fig. 5.10 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 2 giorni, realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N. | 221 |
| Fig. 5.11 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 7 giorni, realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N. | 222 |
| Fig. 5.12 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 28 giorni, realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N. | 222 |
| Fig. 5.13 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini confezionati con il CEM I 42,5 R a varie stagionature. | 223 |
| Fig. 5.14 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini confezionati con il CEM II/A-S 42,5 R a varie stagionature. | 224 |
| Fig. 5.15 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini confezionati con il CEM III/A 42,5 N a varie stagionature. | 224 |
| Fig. 5.16 - Forme di abbassamento al cono. | 228 |
| Fig. 5.17 - Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM I 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta. | 230 |
| Fig. 5.18 - Lavorabilità dell'impasto di calcestruzzo realizzato con il CEM I 42,5 R senza aggiunta (T.Q.) | 230 |
| Fig. 5.19 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte. | 231 |
| Fig. 5.20 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 2 giorni, realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R. | 232 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 5.21 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 7 giorni, realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R..... | 233 |
| Fig. 5.22 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 28 giorni, realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R..... | 233 |
| Fig. 5.23 - Provino di calcestruzzo realizzato con CEM I 42,5 R ed il 10% di aggiunta di zeolite 5A industriale, dopo rottura a 28 giorni..... | 234 |
| Fig. 5.24 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R (T.Q.). | 234 |
| Fig. 5.25 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + 4A IND. | 235 |
| Fig. 5.26 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + 5A IND. | 235 |
| Fig. 5.27 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + 5A LAB. | 236 |
| Fig. 5.28 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + Silica fume..... | 236 |
| Fig. 5.29 - Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta. | 237 |
| Fig. 5.30 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte..... | 239 |
| Fig. 5.31 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 2 giorni, realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R. | 240 |
| Fig. 5.32 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 7 giorni, realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R. | 241 |
| Fig. 5.33 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 28 giorni, realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R. | 241 |
| Fig. 5.34 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R (T.Q.)..... | 242 |
| Fig. 5.35 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + 4A IND. | 242 |
| Fig. 5.36 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + 5A IND. | 243 |
| Fig. 5.37 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + 5A LAB..... | 243 |
| Fig. 5.38 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + Silica fume. | 244 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 5.39 - Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM III/A 42,5 N ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta. | 246 |
| Fig. 5.40 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM III/A 42,5 N ed il 10% delle varie aggiunte. | 247 |
| Fig. 5.41 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 2 giorni, realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N. | 248 |
| Fig. 5.42 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 7 giorni, realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N. | 248 |
| Fig. 5.43 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 28 giorni, realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N. | 249 |
| Fig. 5.44 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N (T.Q.)..... | 250 |
| Fig. 5.45 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + 4A IND. | 250 |
| Fig. 5.46 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + 5A IND. | 251 |
| Fig. 5.47 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + 5A LAB..... | 251 |
| Fig. 5.48 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + Silica fume. | 252 |
| Fig. 5.49 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini di cls confezionati con il CEM I 42,5 R a varie stagionature. | 252 |
| Fig. 5.50 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini di cls confezionati con il CEM II/A-S 42,5 R a varie stagionature..... | 253 |
| Fig. 5.51 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini di cls confezionati con il CEM III/A 42,5 N a varie stagionature..... | 253 |
| Fig. 5.52 - Preparazione del provino di cls | 256 |
| Fig. 5.53 - Soluzione di Nitrato d'argento e Fluoresceina | 256 |
| Fig. 5.54 - Provini impregnati con fluoresceina..... | 257 |
| Fig. 5.55 - Provini a contatto con il Nitrato d'argento | 257 |
| Fig. 5.56 - Provini trattati con il Nitrato d'argento | 258 |
| Fig. 5.57 - Particolare della linea di demarcazione fronte di avanzamento dello | 258 |
| Fig. 5.58 - Penetrazione dei cloruri nei provini di cls realizzati con CEM I, SP1 e le varie aggiunte. | 259 |
| Fig. 5.59 - Penetrazione dei cloruri nei provini di cls realizzati con CEM II, SP1 e le varie aggiunte..... | 259 |
| Fig. 5.60 - Penetrazione dei cloruri nei provini di cls realizzati con CEM III, SP1 e le varie aggiunte. | 260 |
| Fig. 5.61 - Preparazione del provino di cls | 261 |
| Fig. 5.62 - Soluzione di Cloruro di bario e Permanganato di potassio | 262 |
| Fig. 5.63 - Fasi della prova | 263 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 5.64 - Provini di cls dopo il contatto con la miscela di cloruro di bario e permanganato di potassio.. | 264 |
| Fig. 5.65 - Provino di cls a fine prova con linea di demarcazione fronte di avanzamento dello ione solfato | 264 |
| Fig. 5.66 - Penetrazione dei solfati nei provini di cls realizzati con CEM III, con SP1 e le varie aggiunte. | 265 |
| Fig. 5.67 - Penetrazione dei solfati nei provini di cls realizzati con CEM II, con SP1 e le varie aggiunte. | 266 |
| Fig. 5.68 - Penetrazione dei solfati nei provini di cls realizzati con CEM I, con SP1 e le varie aggiunte. . | 266 |
| Fig. 5.69 -Provino trattato con la fenolftaleina | 268 |
| Fig. 5.70 - Schema fasi di gelo-disgelo..... | 271 |
| Fig. 5.71 - Pesì iniziali (secco) e durante la prova gelo-disgelo (saturo a superficie asciutta) dei provini di cls | 273 |
| Fig. 5.72 - Variazione percentuale fra il peso iniziale (secco) e il peso finale (saturo a superficie asciutta) dei provini di cls dopo i cicli di gelo- disgelo | 273 |
| Fig. 5.73 - Variazione % delle resistenze meccaniche in funzione delle variazioni % in peso dei provini sottoposti ai cicli gelo-disgelo; | 274 |
| Fig. 5.74 - Resistenza meccanica dei provini di cls stagionati a 180 giorni e dei provini sottoposti ai cicli gelo-disgelo..... | 275 |
| Fig. 5.75 - Variazione % di Resistenza dopo i cicli gelo-disgelo | 275 |
| Fig. 5.76a - Provini di cls per la valutazione del ritiro..... | 276 |
| Fig. 5.77 - Sviluppo del ritiro nel tempo a diverse umidità. | 279 |
| Fig. 5.78 - Ritiro chimico: ritiro autogeno + porosità capillare. | 282 |
| Fig. 5.79 - Andamento del ritiro per i provini di cls realizzati con l'additivo SP1. | 284 |
| Fig. 5.80 - Andamento del ritiro in funzione del tempo e del tipo di additivo..... | 284 |
| | |
| Fig. 6.1 - Prova di spandimento per il calcestruzzo confezionato con cemento bianco CEM I 52,5 R, filler calcareo e zeolite (miscela 8). | 294 |
| Fig. 6.2 - Tempo di spandimento delle varie miscele per raggiungere il diametro di 500 mm..... | 295 |
| Fig. 6.3 - Diametro di spandimento delle varie miscele. | 295 |
| Fig. 6.4 - Tempo di spandimento delle varie miscele. | 297 |
| Fig. 6.5 - Diametro di spandimento massimo delle varie miscele. | 298 |
| Fig. 6.6 - Confronto tra i diametri di spandimento ottenuti con le prove dello Slump Flow (serie 1) e dello J-Ring (serie 2). | 298 |
| Fig. 6.7 - Tempo di efflusso iniziale per l'esecuzione del V - Funnel Test ad un generico istante $t = 0$ | 300 |
| Fig. 6.8 - Tempo di efflusso per l'esecuzione del V - Funnel Test dopo $t = 5$ min. | 300 |
| Fig. 6.9 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini delle varie miscele confezionate con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e stagionati a 2, 7 e 28 giorni..... | 301 |
| Fig. 6.10 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini delle varie miscele confezionate con il CEM I 52,5 R bianco e stagionati a 2, 7 e 28 giorni. | 303 |
| Fig. 6.11 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e i vari fini dopo 2 giorni di stagionatura. | 304 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 6.12 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e i vari fini dopo 7 giorni di stagionatura. | 305 |
| Fig. 6.13 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e i vari fini dopo 28 giorni di stagionatura. | 306 |
| Fig. 6.14 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e i vari fini dopo 2 giorni di stagionatura..... | 307 |
| Fig. 6.15 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e i vari fini dopo 7 giorni di stagionatura..... | 308 |
| Fig. 6.16 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e i vari fini dopo 28 giorni di stagionatura..... | 309 |
| Fig. 6.17-Pesi dei provini di calcestruzzo saturi a superficie asciutta confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R. | 312 |
| Fig. 6.18 - Pesi dei provini di calcestruzzo saturi a superficie asciutta confezionati con CEM I 52,2 R.... | 312 |
| Fig. 6.19 - Provino A attaccato dal gelo. | 313 |
| Fig. 6.20 - Peso iniziale e peso finale (dopo 220 cicli) dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di zeolite, il provino Q presenta quantità ridotte di tutti i suoi costituenti. | 314 |
| Fig. 6.21 - Peso iniziale e peso finale (dopo 220 cicli) dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo..... | 315 |
| Fig. 6.22 - Peso iniziale e peso finale (dopo 220 cicli) dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo e zeolite. | 315 |
| Fig. 6.23 - Variazione percentuale del peso iniziale dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di zeolite, dopo i cicli di gelo e disgelo, il provino Q presenta quantità ridotte di tutti i suoi costituenti. | 316 |
| Fig. 6.24 - Variazione percentuale del peso iniziale dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo, dopo i cicli di gelo e disgelo. | 316 |
| Fig. 6.25 - Variazione percentuale del peso iniziale dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo e zeolite, dopo i cicli di gelo e disgelo... | 317 |
| Fig. 6.26 - Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini stagionati per 120 giorni e di quelli sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, confezionati con aggiunta di zeolite, il provino Q presenta quantità ridotte di tutti i suoi costituenti. | 319 |
| Fig. 6.27 - Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini stagionati per 120 giorni e di quelli sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, confezionati con aggiunta di filler calcareo..... | 319 |
| Fig. 6.28 - Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini stagionati per 120 giorni e di quelli sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, confezionati con aggiunta di filler calcareo e di zeolite. | 320 |
| Fig. 6.29 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura. | 321 |
| Fig. 6.30 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 321 |
| Fig. 6.31 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta del 50% filler calcareo e 50% zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 322 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 6.32 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura. | 323 |
| Fig. 6.33 - Andamento ritiro del provino realizzato con CEM I 52.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura. | 323 |
| Fig. 6.34 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 324 |
| Fig. 6.35 - Andamento medio ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta del 50% filler calcareo e del 50% di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura..... | 325 |
| Fig. 6.36 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura. | 325 |
| Fig. 6.37 - Andamento medi del ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A quantità ridotta (100 kg/m3) in funzione del tempo di stagionatura. | 326 |
| Fig. 6.38 - Ritiro ottenuto dalle miscele con CEM II/B-LL 32.5 R e le varie aggiunte (filler calcareo, zeolite, fumo di silice). | 326 |
| Fig. 6.39 - Ritiro ottenuto dalle miscele con CEM I 52.5 R e le varie aggiunte (filler calcareo, zeolite, fumo di silice)..... | 327 |
| Fig. 7.1 - Curva granulometrica per il calcolo grafico dell'assortimento dei due aggregati. | 334 |
| Fig. 7.2 - Curva granulometrica dell'aggregato riciclato. | 335 |
| Fig. 7.3 - Curva granulometrica per il calcolo grafico dell'assortimento dei due inerti. | 336 |
| Fig. 7.4 - Curva granulometrica della miscela 3. | 338 |
| Fig. 7.5 - Curva granulometrica della miscela 4. | 339 |
| Fig. 7.6 - Curva granulometrica della miscela 5. | 340 |
| Fig. 7.7 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela H. | 345 |
| Fig. 7.8 - Prova di abbassamento al cono di Abrams della miscela I..... | 347 |
| Fig. 7.9 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela I..... | 347 |
| Fig. 7.10 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela L. ... | 348 |
| Fig. 7.11 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela M. . | 350 |
| Fig. 7.12 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela N.. | 351 |
| Fig. 7.13 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela O.. | 353 |
| Fig. 7.14 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela P.... | 354 |
| Fig. 7.15 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela Q. ... | 355 |
| Fig. 7.16 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela R. .. | 357 |
| Fig. 7.17 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela S.... | 358 |
| Fig. 7.18 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela T. .. | 359 |
| Fig. 7.19 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela U.. | 361 |
| Fig. 7.20 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela V.. | 362 |
| Fig. 7.21 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela W. . | 364 |
| Fig. 7.22 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela Z. .. | 365 |
| Fig. 7.23 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela K. .. | 367 |
| Fig. 7.24 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela Y. ... | 368 |
| Fig. 7.25 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela X. ... | 369 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 7.26 - Slump relativo agli impasti delle miscele definitive. | 371 |
| Fig. 7.27 - Resistenze a compressione a 2, 7, 28 giorni relative ai provini di calcestruzzo realizzati con le miscele definitive. | 373 |
| Fig. 7.28 - Resistenze a compressione a 2, 7, 28 giorni relative ai provini realizzati con le miscele H e V. | 374 |
| Fig. 7.29 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica. | 375 |
| Fig. 7.30 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica. | 376 |
| Fig. 7.31 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica. | 376 |
| Fig. 7.32 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica. | 377 |
| Fig. 7.33 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-LL 32,5 R ed Ergomix 180 e diverse composizioni di aggregato. | 378 |
| Fig. 7.34 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-LL 32,5 R e Premia 150 e diverse composizioni di aggregati. | 378 |
| Fig. 7.35 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-L 42,5 R ed Ergomix 180 e diverse composizioni di aggregati. | 379 |
| Fig. 7.36 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-L 42,5 R e Premia 150 e diverse composizioni di aggregati. | 379 |
| Fig. 7.37 - Profondità di penetrazione da cloruri, nei provini confezionati con CEM II/A-LL 32.5 R. | 380 |
| Fig. 7.38 - Profondità di penetrazione da cloruri, nei provini confezionati con CEM II/A-L 42.5 R. | 381 |
| Fig. 7.39 - I provini dopo l'attacco chimico da solfati. | 382 |
| Fig. 7.40 - Provini, contenitore e strumento di misura usato. | 384 |
| Fig. 7.41 - Andamento del ritiro nel tempo (CEM II/A-LL 32.5 R). | 385 |
| Fig. 7.42 - Andamento del ritiro nel tempo (CEM II/A-L 42.5 R). | 385 |
| Fig. 7.43 - Ritiro dei provini di calcestruzzo realizzati con CEM II/A-LL 32,5 R, additivi premia ed ergomix, aggregati alluvionali, di riciclo, alluvionali/riciclo dopo 90 giorni di stagionatura. | 386 |
| Fig. 7.44 - Ritiro dei provini di calcestruzzo realizzati con CEM II/A-L 42,5 R, additivi premia ed ergomix, aggregati alluvionali, di riciclo, alluvionali/riciclo dopo 90 giorni di stagionatura. | 387 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|---|-----|
| Tab. 1.1 - Esempi di strutture realizzate con HPC..... | 30 |
| Tab. 1.2 - Caratteristiche dei calcestruzzi autocompattanti allo stato fresco e relativi valori di accettazione .. | 45 |
| Tab. 1.3 - Conformità degli aggregati secondo il DPR 246/93..... | 47 |
| Tab. 1.4 - Materiali da riciclo | 48 |
| Tab. 1.5 - Massa volumica s.s.a. (satura a superficie asciutta) per aggregati naturali e riciclati grossi e fini... | 49 |
| Tab. 1.6- Raccomandazione per gli aggregati grossi riciclati da impiegare per il confezionamento del calcestruzzo (RILEM: “Specification concrete with recycled aggregate”, TC 121,1993)..... | 52 |
| Tab. 3.1 - Applicazioni delle zeoliti basate sullo scambio ionico..... | 104 |
| Tab. 3.2 - Applicazioni delle zeoliti basate su adsorbimento e setacciamento molecolare..... | 105 |
| Tab. 3.3 - Caratteristiche chimico-fisiche della zeolite 3A, 4A, 5A. | 112 |
| Tab. 3.4 - Diametro critico di alcune molecole adsorbibili dalla zeolite A. | 113 |
| Tab. 4.1 – Grado di aggressività dei cloruri in aria..... | 126 |
| Tab. 4.2 - Grado di aggressività dei cloruri in acqua..... | 127 |
| Tab. 4.3 - Grado di aggressività dei solfati in aria..... | 128 |
| Tab. 4.4 - Grado di aggressività dei solfati in acqua..... | 128 |
| Tab. 4.5 - Analisi granulometrica della sabbia. | 144 |
| Tab. 4.6 - Percentuale del pietrisco di diametro d utilizzabile nell’impasto. | 145 |
| Tab. 4.7 - Calcolo totale della miscela..... | 145 |
| Tab. 4.8 - Valori tipici di A per ottimizzare la granulometrica secondo Bolomey. | 147 |
| Tab. 4.9 - Distribuzione granulometrica dell’aggregato ottimale, di quelli disponibili e del misto ottenuto.. | 150 |
| Tab. 4.10 - Determinazione, alle diverse frazioni granulometriche, dei kg di pietrisco impiegati. | 151 |
| Tab. 4.11 - Composizione del silicato. | 157 |
| Tab. 4.12 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/B-LL 32,5 R bianco, a diverse stagionature..... | 165 |
| Tab. 4.13 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con CEM I- 52,5 R bianco, a diverse stagionature. | 166 |
| Tab. 4.14 - Analisi granulometrica campione Sabbia 1..... | 169 |
| Tab. 4.15 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con..... | 184 |
| Tab. 4.16 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con..... | 185 |
| Tab. 4.17 - Analisi granulometrica campione n°1. | 188 |
| Tab. 4.18 - Analisi granulometrica campione n°2. | 189 |
| Tab. 4.19 - Analisi granulometrica della sabbia. | 202 |

| | |
|---|-----|
| Tab. 5.1 – Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni | 213 |
| Tab. 5.2 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R, alle varie stagionature. | 214 |
| Tab. 5.3 – Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni. | 216 |
| Tab. 5.4 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R, alle varie stagionature. | 217 |
| Tab. 5.5 – Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni. | 220 |
| Tab. 5.6 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N, alle varie stagionature | 221 |
| Tab. 5.7 - Classi di consistenza mediante la misura dell'abbassamento al cono richiesta per alcune tipologie strutturali (UNI 9418). | 226 |
| Tab. 5.8 - Classi di consistenza mediante il metodo Vébé (UNI 9419). | 227 |
| Tab. 5.9 - Classi di consistenza mediante la misura della compattabilità (UNI 9420). | 227 |
| Tab. 5.10 - Classi di consistenza mediante la misura dello spandimento (UNI 8020 - Metodo B). | 227 |
| Tab. 5.11 – Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM I 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta. .. | 229 |
| Tab. 5.12 - Resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte. | 231 |
| Tab. 5.13 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R, alle varie stagionature. | 232 |
| Tab. 5.14 – Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta. | 238 |
| Tab. 5.15 - Resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte. | 239 |
| Tab. 5.16 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R, alle varie stagionature. | 240 |
| Tab. 5.17 – Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM III/A 42,5 N ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta. | 245 |
| Tab. 5.18 - Resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM III/A 42,5 N ed il 10% delle varie aggiunte. | 246 |
| Tab. 5.19 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N, alle varie stagionature. | 247 |

| | |
|--|-----|
| Tab. 5.20 – Profondità di penetrazione dello ione cloruro nei vari provini | 258 |
| Tab. 5.21 – Profondità di penetrazione dello ione solfato nei provini di cls..... | 265 |
| Tab. 5.22 - Pesi iniziali (secco) e durante la prova gelo-disgelo (saturo a superficie asciutta) dei provini di cls..... | 272 |
| Tab. 5.23 - Aumento peso in percentuale | 272 |
| Tab. 5.24 - variazioni % delle resistenze meccaniche dopo i cicli gelo-disgelo..... | 274 |
| Tab. 5.25 - Valori di ritiro dei provini di cls realizzati con l’additivo SP1..... | 283 |
| Tab. 6.1 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 1..... | 289 |
| Tab. 6.2 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 2..... | 289 |
| Tab. 6.3 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 3..... | 290 |
| Tab. 6.4 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 4..... | 290 |
| Tab. 6.5 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 5..... | 291 |
| Tab. 6.6 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 6..... | 291 |
| Tab. 6.7 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 7..... | 292 |
| Tab. 6.8 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 8..... | 293 |
| Tab. 6.9 - Risultati delle prove di Slump Flow eseguite sulle varie miscele. | 294 |
| Tab. 6.10 - Risultati delle prove di J-Ring eseguite sulle varie miscele. | 296 |
| Tab. 6.11 - Risultati delle prove del V-Funnel eseguite sulle varie miscele. | 299 |
| Tab. 6.12 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati dalle varie miscele definitive confezionate con CEM II/B-LL 32,5 R bianco. | 301 |
| Tab. 6.13 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzate dalle varie miscele confezionate con CEM I 52,5 R bianco..... | 302 |
| Tab. 6.14 - Provini di calcestruzzo confezionati..... | 310 |
| Tab. 6.15 - Peso iniziale dei provini sottoposti ai cicli di gelo e disgelo..... | 311 |
| Tab. 6.16 - Pesi dei provini saturi a superficie asciutta, rilevati durante i cicli di gelo e disgelo. | 311 |
| Tab. 6.17 - Aumento percentuale dei pesi dopo 220 cicli..... | 313 |
| Tab. 6.18 - Valori della resistenza meccanica dei provini di calcestruzzo stagionati a 90 giorni e a 120 giorni e sottoposti ai cicli di gelo e disgelo..... | 317 |
| Tab. 6.19 - Variazioni percentuali della resistenza meccanica a compressione dei provini di calcestruzzo... 318 | |
| Tab. 6.20 - Valori medi del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura..... | 320 |
| Tab. 6.21 Valori medi del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 321 |
| Tab. 6.22 - Valori di ritiro del provino realizzato con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta del 50% filler calcareo e 50% zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 322 |
| Tab. 6.23 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura. | 322 |
| Tab. 6.24 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura. | 323 |
| Tab. 6.25 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 324 |

| | |
|--|-----|
| Tab. 6.26 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta del 50% di filler calcareo e 50% di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura. | 324 |
| Tab. 6.27 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura. | 325 |
| Tab. 6.28 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A quantità ridotta (100 kg/m ³) in funzione del tempo di stagionatura. | 326 |
| Tab. 7.1 - Quantità dei componenti della miscela 1. | 332 |
| Tab. 7.2 - Valori di P. | 333 |
| Tab. 7.3 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (100% naturale). | 335 |
| Tab. 7.4 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (100%riciclato). Calcolo del misto ottimale della miscela 3. | 336 |
| Tab. 7.5 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (25% riciclato+75% naturale). | 337 |
| Tab. 7.6 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (50% riciclato+50% naturale). | 338 |
| Tab. 7.7 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (75% riciclato+25% naturale). | 339 |
| Tab. 7.8 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 1. | 341 |
| Tab. 7.9 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 2. | 342 |
| Tab. 7.10 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 3. | 342 |
| Tab. 7.11 - Quantita di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 4. | 343 |
| Tab. 7.12 - Quantita di aggregati utilizzate alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 5. | 344 |
| Tab. 7.13 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela H. | 345 |
| Tab. 7.14 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela I. | 346 |
| Tab. 7.15 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela L. | 348 |
| Tab. 7.16 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela M. | 349 |
| Tab. 7.17 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela N. | 351 |
| Tab. 7.18 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela O. | 352 |
| Tab. 7.19 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela P. | 353 |
| Tab. 7.20 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela Q. | 355 |
| Tab. 7.21 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela R. | 356 |
| Tab. 7.22 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela S. | 357 |
| Tab. 7.23 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela T. | 359 |
| Tab. 7.24 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela U. | 360 |
| Tab. 7.25 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela V. | 362 |
| Tab. 7.26 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela W. | 363 |
| Tab. 7.27 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela Z. | 365 |
| Tab. 7.28 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela K. | 366 |
| Tab. 7.29 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela Y. | 367 |
| Tab. 7.30 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela X. | 369 |
| Tab. 7.31 - Slump relativo alle miscele definitive. | 370 |
| Tab. 7.32 - Resistenze a compressione a 2, 7, 28 giorni relative ai provini realizzati con gli impasti delle miscele definitive. | 372 |
| Tab. 7.33 - Profondità di penetrazione dello ione cloruro nei provini di calcestruzzo realizzati. | 380 |

| | |
|--|-----|
| Tab. 7.34 - Profondità di penetrazione dello ione solfato nei provini di calcestruzzo realizzati. | 381 |
| Tab. 7.35 - Miscela provini destinati alla prova del ritiro..... | 383 |
| Tab. 7.36 - Valori del ritiro per provini di calcestruzzo realizzati con cemento II/A-LL 32.5 R. | 384 |
| Tab. 7.37 - Valori del ritiro per provini di calcestruzzo realizzati con cemento II/A-L 42.5 R..... | 385 |

INTRODUZIONE

Il precario equilibrio su cui poggia lo sviluppo del nostro pianeta è testimoniato dalla crescente frequenza di manifestazioni ambientali devastanti (inondazioni, uragani, ecc.) derivanti da un'eccessiva emissione di gas serra e dell'anidride carbonica in particolare.

Ma questo è solo dei due aspetti del problema. L'altro, strettamente connesso al primo, riguarda il consumo di risorse energetiche in forma di combustibili fossili non rinnovabili. Si registra ogni giorno un aumento del prezzo del petrolio che può portare ad un rallentamento del progresso industriale, ma bisogna porre l'attenzione soprattutto sulla disponibilità futura di petrolio e carbone.

Si va ormai consolidando la prospettiva che le future generazioni non troveranno più risorse energetiche e che si troveranno invece un ambiente fortemente inquinato. Occorre quindi prendere provvedimenti urgenti per cambiare questa tendenza e mettere in atto seriamente le direttive dell'accordo di Kyoto: risparmiare risorse energetiche non rinnovabili e ridurre l'emissione di anidride carbonica.

E' necessario mettere in atto un progresso "sostenibile" cercando di conciliare le attuali esigenze senza compromettere quelle delle future generazioni. Queste esigenze riguardano la disponibilità delle risorse naturali ed energetiche rinnovabili e la protezione dell'ambiente dall'inquinamento atmosferico e dal degrado paesaggistico.

Sul piano internazionale vanno sempre più evidenziandosi "concetti guida" che influenzeranno la ricerca scientifica e la produzione di innovazione nell'ingegneria e tecnologia delle costruzioni nei prossimi anni. Sinteticamente essi possono essere riassunti come segue:

- le esigenze ambientali e le costruzioni sostenibili;
- la reingegnerizzazione del processo di costruzione.

Sviluppare ricerca sulla costruzione sostenibile si traduce in sostanza nell'affrontare e risolvere problematiche connesse con lo sviluppo e l'impiego di materiali e soluzioni progettuali e tecnologiche che possono diminuire l'impatto delle opere di costruzione sull'ambiente costruito. Lo spettro di ricerche conseguentemente generabile è assai ampio: è tuttavia possibile individuare all'interno di esse un filone prioritario riguardante la valutazione dell'impatto sull'ambiente abitato di materiali da costruzione tradizionali, innovativi o provenienti da riciclaggio.

Nel settore delle costruzioni in calcestruzzo, il problema del progresso sostenibile è di rilevante importanza, perché coinvolge circa il 6% del consumo totale delle risorse energetiche e dell'inquinamento atmosferico da CO₂.

Negli ultimi anni sono emerse, in modo sempre più evidente, le contraddizioni sullo status qualitativo del calcestruzzo. Nonostante il contributo delle ricerche scientifiche abbia portato ad un potenziale miglioramento delle sue caratteristiche, quali aumento della durabilità attraverso una migliore definizione dei livelli di aggressione ambientale, ottimizzazione del mix design, si assiste ad un degrado strutturale crescente dovuto ad una errata messa in opera del calcestruzzo, con aumento dei difetti strutturali delle opere realizzate, che subiscono un decadimento delle prestazioni in termini di resistenza e di durabilità.

In particolare, la maggior parte del degrado strutturale dei manufatti esistenti è attribuibile al cattivo confezionamento del calcestruzzo, realizzato in modo scadente e con materiali non sempre idonei; ne scaturisce un materiale facilmente attaccabile da aggressioni di tipo chimico e una non adeguata protezione dei ferri d'armatura.

La consapevolezza dei problemi appena descritti ha spinto la ricerca a progettare un calcestruzzo che fosse in grado, da un lato, di rispondere a determinati requisiti di resistenza e durabilità, dall'altro, che potesse ridurre al minimo la probabilità di sminuire le proprie caratteristiche a causa del cattivo confezionamento degli impasti, dei relativi getti e della conseguente stagionatura.

La giusta risposta a queste esigenze è rappresentata dalla creazione di calcestruzzi speciali come gli High Performance Concrete (HPC) ed i Self Compacting Concrete (SCC); i primi caratterizzati soprattutto da alte resistenze meccaniche ed elevata durabilità, i secondi contraddistinti da una elevata lavorabilità.

I vantaggi di questi nuovi materiali consistono nel miglioramento delle qualità fisico-meccaniche delle strutture, con conseguente aumento della vita utile di un'opera, riduzione dei costi di costruzione, dovuti ad una velocizzazione dei processi produttivi, riduzione delle sezioni strutturali con notevole risparmio di materiale, possibilità di utilizzare materiali di riciclo.

Infatti basti pensare che le società occidentali hanno sempre più incentivato, nel corso del loro sviluppo, l'utilizzo delle risorse naturali per la produzione di costruzioni, spesso, come già detto, con durata di vita limitata nel tempo. Ciò ha comportato un

prelievo di risorse superiore alla capacità di rinnovamento ed una produzione di rifiuti maggiore della capacità di assorbimento degli stessi da parte dell'ambiente.

Da una parte si è pensato infatti di poter disporre di una riserva illimitata di materie prime, dall'altra che la natura e la quantità dei rifiuti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione non rappresentassero un effettivo problema di smaltimento.

Oggi si può affermare che tale comportamento non è più sostenibile. Infatti la domanda di aggregati ha generato forti impatti sul territorio a causa di una attività estrattiva che con molta difficoltà riesce ad essere pianificata e regolamentata, inoltre il notevole quantitativo di rifiuti proveniente dal settore edile ha generato una domanda di impianti di smaltimento difficile da soddisfare e che, tra l'altro, ha comportato il frequente abbandono in discariche abusive distribuite nelle aree periferiche degli agglomerati urbani. Di conseguenza lo sviluppo di calcestruzzi innovativi produce effetti positivi anche sulla qualità dell'ambiente, riuscendo a coniugare un miglior utilizzo delle risorse naturali con un adeguato recupero dei materiali esistenti.

Il presente lavoro rende conto, pertanto, dei seguenti obiettivi: progettazione di calcestruzzi ordinari, ad alte prestazioni ed autocompattanti a basso impatto ambientale realizzati con aggregati di riciclo; progettazione e caratterizzazione di calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC: High Performance Concrete) utilizzando materiali reperibili nel mercato locale.

Inizialmente, sono state effettuate ricerche su eventuali esperienze condotte in campo nazionale e internazionale che hanno attinenza con i processi ecosostenibili nell'ambito delle costruzioni in calcestruzzo.

Successivamente è stata condotta la valutazione delle proprietà reologiche di materiali a base cementizia realizzati con additivo e filler a basso impatto ambientale. Tali materiali sono individuati nelle categorie di prodotti ecolabel e nelle categorie di prodotti di scarto (es.: sabbia, fanghi, fly ash di provenienza industriale, pietre di pomice di provenienza estrattiva).

Dopo aver effettuato una completa caratterizzazione tramite indagini analitiche (Diffrattometria (XRD), Analisi termica (TG-DTA), Analisi microscopica (SEM), etc.) di tali materiali, sono state preparate delle malte con materiali leganti di diversa tipologia. Sono stati, pertanto, valutati diversi sistemi leganti - additivo - filler variabili e nella natura dei costituenti e nelle loro relative proporzioni.

La valutazione degli effetti dei diversi materiali è stata effettuata sia allo stato fresco, attraverso misure reologiche atte a misurare i parametri di fluidità e di plasticità, sia allo stato indurito, al fine della valutazione delle proprietà di resistenza meccanica e durabilità.

Questa prima fase pertanto ha indicato i materiali ottimali ed il loro dosaggio per ottenere malte con elevati requisiti prestazionali, in termini di proprietà reologiche, chimiche, fisico – meccaniche.

Si è passato in seguito a progettare e produrre conglomerati cementizi usando i sistemi legante – additivo – filler ottimizzati nella prima fase. Per il confezionamento dei conglomerati sono stati impiegati, inoltre, aggregati provenienti da rifiuti da costruzione e demolizione. La sperimentazione ha mirato alla valutazione degli effetti di una sostituzione parziale e completa dell'aggregato naturale con l'aggregato riciclato.

Inoltre il lavoro è stato finalizzato ad una precisa individuazione di metodiche sperimentali necessarie a caratterizzare gli aggregati riciclati ed all'individuazione dei parametri che influenzano le proprietà reologiche, chimiche, fisico – meccaniche dei calcestruzzi realizzati.

In conclusione basti dire che in confronto ad altri materiali (metalli, vetro, polimeri, ecc.) il calcestruzzo ha un eccellente profilo ecologico. Per una certa proprietà ingegneristica, come la resistenza meccanica, il modulo elastico o la durabilità, la produzione di calcestruzzo consuma meno quantità di materiali ed energia, produce la minore quantità di sottoprodotti pericolosi e provoca il minor danno possibile all'ambiente, per cui uno sviluppo sostenibile dell'industria del cemento e del calcestruzzo da sola può contribuire ad evitare un degrado ambientale irrimediabile e consentire un miglioramento della qualità della vita.

CAPITOLO 1

CALCESTRUZZI A BASSO IMPATTO AMBIENTALE: HPC, SCC, CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI

1.1 Calcestruzzi ad alte prestazioni

I calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC) individuano una classe di conglomerati cementizi caratterizzati da prestazioni superiori rispetto a quelle di un normale conglomerato, sia in termini di resistenza meccanica che di altre proprietà inerenti lo stato lavorabile e lo stato solido nonché in termini di durabilità in ambienti aggressivi.

Fino a qualche decennio fa i calcestruzzi ad alte prestazioni costituivano esclusivamente argomento di ricerca dei laboratori più avanzati di tecnologia del calcestruzzo. Negli ultimi anni, invece, lo sviluppo e le applicazioni strutturali di questi materiali hanno subito un notevole incremento.

I calcestruzzi ad alte prestazioni, infatti, sono stati ampiamente utilizzati nella realizzazione di strutture off-shore e di ponti di grande luce nel Nord Europa, dove era impossibile impiegare i tradizionali conglomerati cementizi a causa delle eccezionali sollecitazioni meccaniche ed ambientali (Larsen – Felland, 1987).

Inoltre, grazie ormai alla facilità con cui si realizzano calcestruzzi con resistenze di 100 N/mm², i conglomerati cementizi ad alte prestazioni vengono opportunamente impiegati negli edifici di grande altezza per contenere la dimensione dei pilastri ai livelli inferiori (Randall, Foot, 1989).

Numerose applicazioni, infine, vengono attualmente segnalate nelle strutture prefabbricate, negli impalcati da ponte, e per applicazioni speciali nel settore del condizionamento dei rifiuti nucleari (Matsumoto; 1976, Helland, 1990; Torrenti et al., 1996).

L'odierna facilità di produzione di calcestruzzi con resistenze a compressione prossime ai 100 N/mm² può essere sostanzialmente attribuita ai seguenti fattori:

- ✓ migliore qualità intrinseca del cemento per un maggior contenuto di silicato tricalcico (C₃S). il costituente che contribuisce maggiormente alla

resistenza meccanica, e per una maggiore finezza di macinazione (Collepari, Coppola, 1992);

- ✓ l'avvento degli additivi superfluidificanti che hanno permesso di ridurre drasticamente il valore del rapporto acqua/cemento senza penalizzare le capacità di flusso del calcestruzzo (Collepari, 1995).
- ✓ la disponibilità della silice fume che per la ridotta dimensioni dei granuli ($< 0,1 \mu\text{m}$) consente di ridurre la porosità della pasta di cemento e di migliorare la qualità della matrice all'interfaccia pasta-aggregato grazie alla diminuzione dell'effetto bleeding (Bache, 1981).

Il termine calcestruzzo ad alte prestazioni (High Performance Concrete - HPC) ha assunto negli anni un diverso significato. Negli anni '50, ad esempio, negli Stati Uniti si considerava ad alta resistenza un calcestruzzo con una resistenza a compressione di soli 35 N/mm^2 (Russel, 1987). Già negli anni '60, invece, erano normalmente prodotti calcestruzzi con resistenza di $45 \text{ Mpa (N/mm}^2)$.

Negli anni '70 furono realizzate opere con calcestruzzi aventi resistenze prossime a 70 MPa . Oggi calcestruzzi con resistenze superiori a 80 MPa rappresentano conglomerati usualmente disponibili e meritano di essere chiamati calcestruzzi del XXI secolo (Jian Yin et al., 2002; Zhongwei, 1998; Neiqian, 1996).

Per quanto attiene all'Europa, occorre considerare che il termine "Calcestruzzo ad Alte Prestazioni" non assume lo stesso significato in tutti i paesi. In linea di massima, tuttavia, si può ammettere che appartengono a questa categoria i calcestruzzi la cui resistenza caratteristica a compressione sia superiore a quella massima ammessa dai regolamenti nazionali (circa 60 MPa).

La mancanza di una idonea normativa in Italia fa sì che questi calcestruzzi siano poco conosciuti e di rado impiegati.

Tecnologicamente produrre un calcestruzzo ad alte prestazioni consiste nel ridurre significativamente l'acqua di impasto fino a rapporti a/c di $0,25 \div 0,35$ attraverso l'impiego di superfluidificanti e aggiungere alla miscela materiali estremamente fini, di dimensioni inferiori al micron, [silice fume, loppa d'altoforno, cenere volante (*fly ash*), riempitivi calcarei, ecc.].

I superfluidificanti deflocculano i granuli di cemento cosicché si ha un'apprezzabile riduzione dell'acqua necessaria per l'impasto in quanto una gran quantità di questa non è più trattenuta tra i granuli di cemento tra loro agglomerati.

I vuoti interstiziali fra i granuli di cemento sono riempiti dalle particelle fini (dimensioni 1-80 μm) in modo da ottenere una matrice cementizia più densa e meno porosa (Naiqian, 1996).

In questo modo si riduce drasticamente la distanza tra i granuli di cemento e la matrice legante diviene più densa e compatta.

Si ottiene addirittura che la matrice cementizia avvolgente gli elementi lapidei - e che nei calcestruzzi ordinari rappresenta l'anello debole della catena per la sua maggiore porosità - diventa meccanicamente più resistente dei comuni aggregati per la maggiore compattezza della sua microstruttura.

L'anello debole della catena, in queste condizioni, diventa quella sottilissima area del materiale, qualche decina di μm , situata all'interfaccia tra aggregato e matrice cementizia, nota con il nome di "zona di transizione".

Sperimentalmente si è dimostrato che anche adoperando materiali usuali, rispettando questi principi, è possibile confezionare un calcestruzzo con valore di resistenza di 60-80 Mpa (Malier, 1992), senza aumentare considerevolmente i costi.

La matrice che circonda gli aggregati è costituita da differenti idrati, dei quali i più importanti sono i silicati idrati C-S-H, che appaiono sotto forma di fibre, e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ che cristallizza in lastre esagonali.

La pasta di cemento Portland ha una porosità che varia tra il 25% e il 30% in volume per un rapporto acqua/cemento (a/c) di 0,50. Questa porosità è composta da due tipi di vuoti: i pori intrinseci del C-S-H, con una grandezza di alcuni manometri, ed i pori capillari tra gli idrati, dovuti all'acqua non reagita, le cui dimensioni variano tra 100 nm e parecchi mm (Neville, 1995).

La bassa resistenza meccanica del calcestruzzo è stata attribuita alla porosità capillare generata dall'eccesso d'acqua che è necessaria per la lavorabilità (miscelazione, trasporto e messa in opera) del calcestruzzo stesso.

Un'espressione della resistenza a compressione fu elaborata nel 1897 da Fétet nel seguente modo:

$$R_c = A \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2$$

dove c , w , a rappresentano ,rispettivamente, il volume di cemento, d'acqua e d'aria ed A è una costante dipendente dai materiali impiegati. Si ricava, dalla presente formula, che riducendo il rapporto a/c si ha un incremento di resistenza. Tuttavia il rapporto a/c deve tenere conto dell'insieme dei fattori indicati genericamente col nome lavorabilità.

Teoricamente è necessaria una semplice riduzione del rapporto a/c compensato da un'aggiunta di additivi alti riduttori d'acqua. In pratica ciò produce una notevole perdita di lavorabilità, generalmente misurata attraverso la perdita di slump.

Il problema reale nella produzione di HPC, piuttosto che la resistenza meccanica, variabile dipendente, è da ricercarsi nella suddetta perdita di slump, determinata dal rapporto acqua/cemento relativamente basso.

1.1.1 Microstruttura

Il calcestruzzo ad alte prestazioni manifesta nella sua microstruttura, più uniforme e compatta, una delle caratteristiche migliori rispetto al calcestruzzo normale.

Quando le particelle ultrafini della silice fume si combinano con il cemento Portland, considerando un basso rapporto acqua/cemento, la microstruttura di tale sistema consta di pochi idrati cristallini formanti una matrice più densa e di bassa porosità (Zimbelmann, 1987).

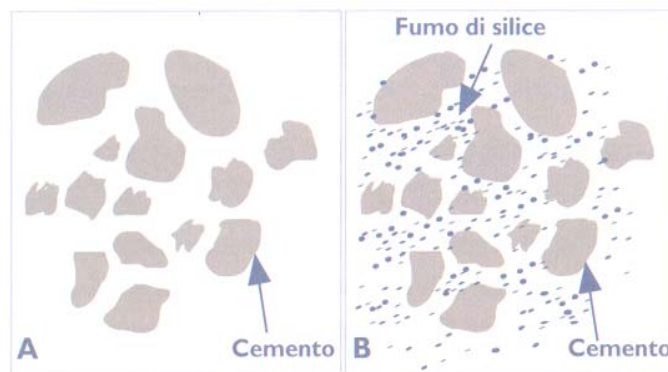


Fig. 1.1 – Allocazione delle particelle di silice fume tra i granuli di cemento

L'aumento del contenuto di silice fume fa aumentare la quantità di idrossido di calcio che si trasforma in silicati di calcio idrato C-S-H, la cosiddetta "colla di cemento",

responsabile della resistenza meccanica raggiunta dal cemento idratato. Il restante idrossido di calcio tende a formare cristalli più piccoli, rispetto a quelli presenti nel calcestruzzo tradizionale.

Pertanto la silice fume implica considerevoli cambiamenti nella microstruttura della zona di transizione. Si è osservato che in un HPC con silice fume tutto lo spazio attorno agli aggregati era occupato da un C-S-H amorfo e denso (Regourd et al., 1983, 1995). Tra l'aggregato e i silicati di calcio idrati si forma un contatto diretto piuttosto che con l'idrossido di calcio come nei calcestruzzi normali.

Nel quantificare la microstruttura interfacciale si è visto che la porosità di un calcestruzzo HPC con silice fume era praticamente nulla al contrario dei calcestruzzi ordinari.

Nei calcestruzzi ordinari la morfologia e la composizione del C-S-H è diversa rispetto a quella dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

Infatti gli HPC presentano una composizione del C-S-H meno cristallina e un più basso rapporto Ca/Si. Occorre ricordare, inoltre, che nella struttura dei calcestruzzi ad alte prestazioni sono incorporati ioni di natura diversa, i quali determinano un aumento di resistenza all'azione aggressiva di alcuni agenti e alla reazione alcali-aggregati.

1.1.2 Zona di Transizione

Per sfruttare al massimo nel materiale composito (calcestruzzo) il beneficio derivante da una matrice (pasta cementizia) più densa e compatta è necessario disporre di aggregati particolari (basalto, granito, diabase, ecc.), altrettanto densi e compatti e capaci soprattutto di stabilire un migliore legame adesivo nella zona di transizione con la matrice cementizia.

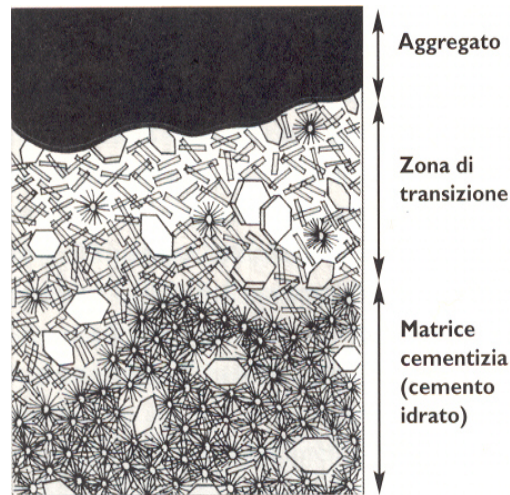


Fig. 1.2 – Rappresentazione schematica di un calcestruzzo nella zona di transizione tra aggregato lapideo e matrice cementizia

La zona di transizione, che generalmente è più porosa e meccanicamente più debole dell'aggregato lapideo e della matrice cementizia, esercita un'influenza sulle proprietà del materiale composito significativamente maggiore di quella che ci si potrebbe attendere dalle sue dimensioni relativamente ridotte.

E' opportuno approfondire la descrizione della zona di transizione per interpretare meglio il meccanismo di influenza, piuttosto complessa, esercitata da questa zona-chiave del calcestruzzo sulle proprietà meccaniche, elastiche e quelle riguardanti la durabilità del materiale. Durante la compattazione del calcestruzzo fresco, intorno alle zone inferiori dei granuli grossi dell'aggregato vengono a formarsi dei film di acqua (qualche decina di μm) al di sotto dei quali si raccoglie principalmente l'acqua di bleeding.

Questa situazione determina un rapporto a/c più elevato, e quindi una maggiore porosità rispetto alla matrice cementizia.

La formazione dei primi germi cristallini di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e di ettringite, che avviene in tutta la matrice cementizia per effetto dell'idratazione dei silicati e degli alluminati del cemento, è seguita da un maggior accrescimento dei cristalli di questi prodotti nella zona di transizione, più porosa per il maggior rapporto acqua/solido localmente esistente.

La maggior porosità di questa zona consente anche lo sviluppo di cristalli di calce pluristratificati, orientati più o meno parallelamente alla superficie dell'aggregato, facilmente sfaldabili, e quindi meccanicamente più deboli.

In tempi molto lunghi ed in condizioni particolarmente favorevoli, a seguito di un'accurata stagionatura umida atta a favorire il grado di idratazione del cemento, la zona di transizione potrebbe diventare un po' meno porosa della matrice con formazione di veri e propri legami chimici tra i prodotti di idratazione del cemento e la superficie dell'aggregato.



Fig. 1.3– Andamento schematico nel tempo della porosità nella matrice cementizia e della zona di transizione del calcestruzzo

Tuttavia, non è facile che questa situazione, potenzialmente determinante di una maggiore resistenza della zona di transizione, possa verificarsi realmente nelle normali condizioni di stagionatura all'aria dei conglomerati cementizi.

A causa della maggiore porosità, la zona di transizione è sede di innesco e propagazione di microfessure che danneggiano irreversibilmente il materiale. Le microfessure si formano per una qualsiasi sollecitazione che provochi un movimento differenziale tra matrice cementizia e aggregato, in quanto dotati di modulo elastico diversi. Ad esempio un gradiente termico originato dal calore di idratazione del cemento, un ritiro idrometrico che coinvolge la matrice ma non l'aggregato, un carico applicato ancorché inferiore a quello di rottura (Neville, 1995).

La presenza di microfessure nella zona di transizione, oltre ad influenzare le proprietà meccaniche ed elastiche del calcestruzzo, condiziona anche la permeabilità all'acqua e ad altri potenziali agenti aggressivi, infatti in corrispondenza della zona di transizione, intrinsecamente più porosa e più microfessurata, è più facile che possa penetrare l'acqua e l'aria con conseguenze negative sulla durabilità del calcestruzzo e sulla protezione dei ferri d'armatura dalla corrosione.

1.1.3 Proprietà Fisiche ed Elasto-Meccaniche

Per la produzione di calcestruzzi ad alte prestazioni è stata data particolare attenzione, negli ultimi decenni, all'uso della silice fume (Randall et al., 1989).

L'aggiunta di silice fume può portare anche ad una riduzione di resistenza a causa di una maggiore quantità d'acqua necessaria per mantenere una determinata fluidità dell'impasto, visto che tale aggiunta causa una minore lavorabilità (Punkki et al., 1996).

Questo effetto negativo può, tuttavia, essere eliminato usando un riduttore d'acqua (superfluidificante), che conferisce all'impasto la necessaria fluidità senza cambiare il rapporto acqua-materiale cementizio (cemento + silice fume).

Nel calcestruzzo aggiungere silice fume, insieme all'uso di un superfluidificante, porta efficacemente ad incrementare la resistenza a compressione (Hacque, 1996).

Il tempo sufficiente affinché la silice fume inizi a dare contributo al miglioramento della resistenza meccanica dipende da diversi fattori, come la percentuale di silice fume, la temperatura, l'umidità della stagionatura ed il rapporto acqua-materiale cementizio.

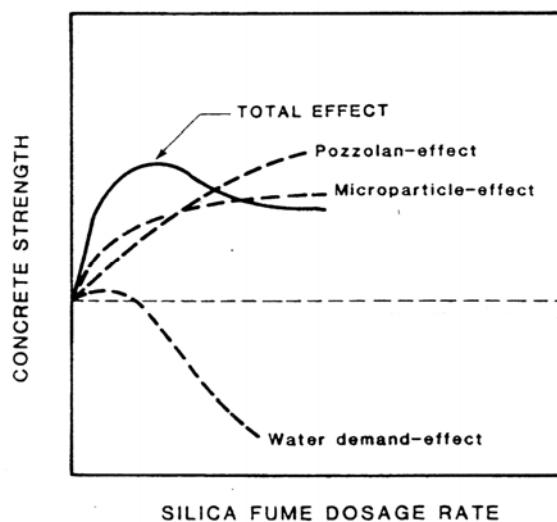


Fig. 1.4 – Effetto della silice fume sulla resistenza del calcestruzzo.

Si è sperimentato, ad esempio, che calcestruzzi realizzati con aggiunta del 10% di silice fume ed un rapporto acqua-materiale cementizio pari a 0,32 mostrano incrementi di resistenza già dopo un giorno di stagionatura in condizioni ambientali normali per l'effetto accelerante della silice fume sull'idratazione del cemento (Jahren, 1983).

La quantità ottimale di silice fume nei calcestruzzi ad alte prestazioni da un punto di vista della resistenza meccanica a compressione è circa il 5-10% per le brevi stagionature (1 giorno), mentre per lunghe stagionature (28 giorni) la quantità ottimale è circa il 15-20%. Caratteristiche composizioni di miscele di calcestruzzi ad alte prestazioni contengono da 400 a 600 kg/m³ di cemento, dal 5% al 15% di silice fume (generalmente il 10%), un rapporto acqua-cemento compreso fra 0,25 e 0,35 ed una quantità di superfluidificante che è funzione della percentuale di silice fume aggiunta (Aitcin, 1998).

Lo sviluppo delle caratteristiche meccaniche è influenzato dal tipo di stagionatura. In particolare si è trovato che la stagionatura a 30 °C di provini in calcestruzzo ricoperti con un film di polietilene influisce positivamente sullo sviluppo della resistenza a compressione rispetto a provini stagionati in acqua a 20°C, questo avviene particolarmente nella prima settimana di stagionatura.

Generalmente le raccomandazioni e le norme di legge vigenti in ogni paese, relative al progetto delle strutture in conglomerato cementizio armato e precompresso, forniscono alcune correlazioni che consentono di determinare le caratteristiche fondamentali del calcestruzzo, quali il comportamento sforzo-deformazione, la resistenza a trazione, il modulo elastico, ecc.

Queste correlazioni sono basate su prove sperimentali ed esperienze condotte quasi esclusivamente su calcestruzzi la cui resistenza a compressione è inferiore a 40-50 MPa.

E' chiaro, quindi, che queste correlazioni non sono direttamente estensibili ai calcestruzzi con resistenza a compressione superiore a 60 MPa.

Per cui, nel seguito, verranno analizzate alcune proprietà fondamentali del calcestruzzo ad alte prestazioni e verranno proposte alcune correlazioni, generalmente diverse da quelle usate per i calcestruzzi tradizionali, tra le proprietà caratteristiche del conglomerato cementizio.

Il comportamento sforzo-deformazione del calcestruzzo ad alta resistenza è stato ampiamente indagato (Fip-Ceb, 1990; Carrasquillo et al.,1981; Tognon et al.,1981; Smeplass et al., 1990) e può essere analizzato nella seguente figura:

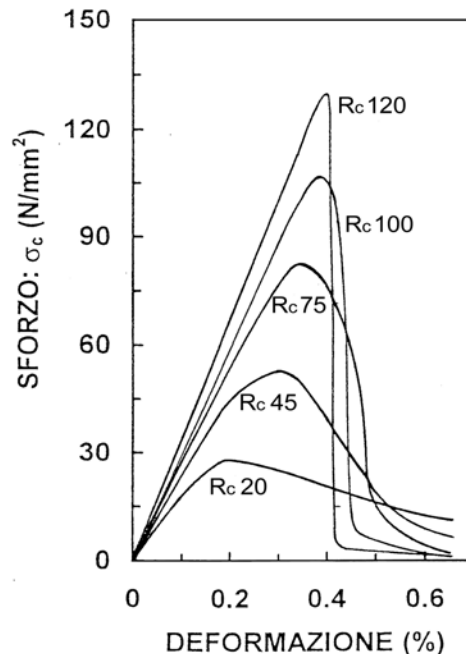


Fig. 1.5 – Diagramma sforzo-deformazione (a compressione) di calcestruzzi ad alta resistenza comparati con calcestruzzi tradizionali.

Come si può notare i calcestruzzi ad alta resistenza evidenziano:

- un ramo ascendente molto più lineare rispetto ai calcestruzzi tradizionali;
- la linearità del ramo ascendente si protrae fino a valori dello sforzo prossimi alla resistenza a compressione;
- una maggiore deformazione, rispetto ai calcestruzzi tradizionali, in corrispondenza del massimo sforzo applicato;
- una repentina caduta del ramo discendente ed una minore deformazione ultima, entrambe indici di una spiccata fragilità del materiale.

Questi comportamenti sono da ascrivere al miglioramento della qualità del materiale all'interfaccia pasta-aggregato. Infatti, grazie alla diminuzione del bleeding interno, per la presenza della silice fume, nei calcestruzzi ad alta resistenza l'interfaccia pasta-aggregato è molto meno porosa, per cui nella fase di carico si verifica una drastica diminuzione delle microfessure che implica una maggiore linearità del tratto ascendente della curva sforzo-deformazione.

Nei calcestruzzi tradizionali le microfessure iniziano a manifestarsi all'interfaccia pasta-aggregato in corrispondenza di un valore dello sforzo pari al 65% della resistenza a compressione (Carrasquillo et al.,1981).

Nei calcestruzzi ad alta resistenza, invece, la rottura dell'interfaccia pasta-aggregato si innesca in corrispondenza di un valore dello sforzo maggiore o uguale all'80% della resistenza a compressione del materiale.

Questo comportamento, quindi, giustifica la linearità del tratto ascendente (nel grafico sforzo-deformazione) fino a valori di sforzo prossimi alla resistenza del materiale.

Per quanto attiene alla forma del ramo discendente della curva sforzo-deformazione, occorre tener conto che il calcestruzzo è un materiale composito costituito sostanzialmente dalla pasta di cemento e dagli aggregati, entrambi materiali fragili.

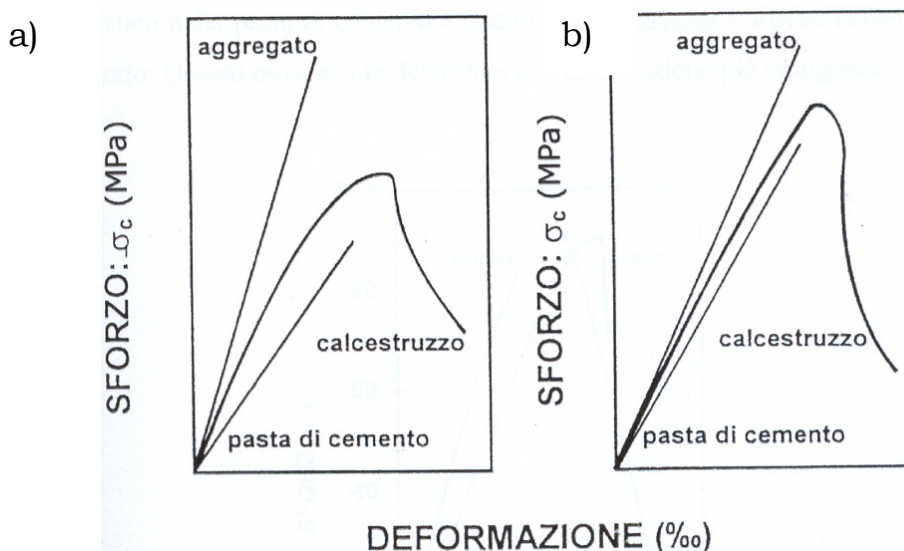


Fig. 1.6 – Andamento schematico della curva sforzo-deformazione di cls tradizionali (a), ad alta resistenza (b) e dei relativi costituenti

Nonostante ciò, il calcestruzzo tradizionale presenta un comportamento sostanzialmente duttile attribuibile all'enorme divario di rigidità dei materiali che lo compongono: il modulo elastico della pasta di cemento varia generalmente tra 15000 e 35000 MPa, mentre il modulo elastico degli aggregati è solitamente superiore a 50000 MPa.

A causa di questo divario tra i moduli elastici, nel calcestruzzo tradizionale si determinano delle concentrazioni di sforzo in corrispondenza dell'interfaccia pasta-aggregato che provocano la formazione di un reticolo di microfessure.

Aumentando ulteriormente il valore dello sforzo applicato, una parte dell'energia disponibile viene consumata per promuovere l'ulteriore sviluppo delle microfessure.

E' in questa fase, a seguito degli immancabili scorrimenti delle fessure nella pasta di cemento, che si verifica una sostanziale deviazione della linearità della curva sforzo-deformazione. Dopo il superamento della resistenza del materiale, infine, sono le fessure a determinare un'ulteriore redistribuzione dello sforzo all'interno del calcestruzzo e, quindi, una rottura di tipo duttile del materiale.

Nei calcestruzzi ad alte prestazioni, invece, il divario tra il modulo elastico della pasta di cemento e quello degli aggregati è sostanzialmente ridotto. Questo ovviamente determina una distribuzione più omogenea degli sforzi e, quindi, una ridotta microfessurazione all'interfaccia pasta-aggregato.

La minore fessurazione determina una ridotta redistribuzione dello sforzo e di conseguenza una rottura di tipo fragile per questo tipo di materiale.

Da quanto esposto emerge che in generale il comportamento deformativo dei calcestruzzi, soprattutto quelli ad alta resistenza, è influenzato anche dalla qualità dell'aggregato ed in particolare dal suo modulo elastico.

Aggregati con modulo elastico sostanzialmente uguale a quello della pasta di cemento (gneiss: $E = 40000$ MPa), consentono di ottenere maggiori deformazioni in corrispondenza della massima tensione; tuttavia, essi esaltano la fragilità del materiale.

Al contrario aggregati con moduli di elasticità molto più elevati della pasta di cemento (bauxite: $E = 100000$ MPa) conferiscono al conglomerato un comportamento duttile.

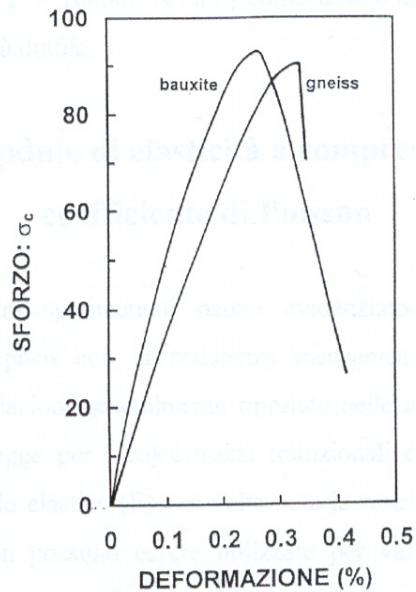


Fig. 1.7– Curva sforzo-deformazione di cls aventi stessa resistenza a compressione, confezionati con aggregato di diverso modulo elastico.

1.1.4 Modulo di Elasticità a Compressione e Coefficiente di Poisson

Si è evidenziato da numerose indagini sperimentali (Carrasquillo et al., 1981; Bernardt et al.; Jensen et al.) che il modulo di elasticità cresce poco con la resistenza meccanica a compressione.

Pertanto, le correlazioni generalmente riportate nelle raccomandazioni o norme di legge per i calcestruzzi tradizionali, che consentono di calcolare il modulo elastico (E), una volta nota la resistenza meccanica a compressione, non possono essere utilizzate per valutare i moduli di elasticità dei calcestruzzi ad alta resistenza. Queste correlazioni, infatti, tendono a sovrastimare il modulo elastico dei calcestruzzi con resistenze superiori a 45 MPa.

Nell'estensione, pubblicata nel 1995, al codice modello CEB-FIP 1990 l'equazione:

$$E_{ci} = 10^4 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3}$$

valida per i soli calcestruzzi tradizionali con resistenza a compressione inferiore a 50 MPa, viene sostituita dall'equazione:

$$E_{ci} = 22000 \cdot [(f_{ck} + 8)/10]^{0,3}$$

oppure:

$$E_{ci} = 22000 \cdot [f_{cm} / 10]^{0,3}$$

con:

- E_{ci} = modulo elastico tangenziale
- f_{ck} = resistenza caratteristica a compressione misurata su cilindri
- f_{cm} = resistenza caratteristica a compressione media misurata su cilindri

Le suddette equazioni possono essere utilizzate anche per i calcestruzzi tradizionali.

In riferimento al coefficiente di Poisson si è evidenziato da indagini sperimentali che non esistono differenze sostanziali nel campo elastico tra calcestruzzi ad alta e bassa resistenza meccanica. I valori registrati generalmente si attestano tra 0,18 e 0,24, in funzione del valore dello sforzo applicato (Ahmad et al., 1988).

Nel campo plastico, invece, i calcestruzzi ad alta resistenza sembrano evidenziare una minore deformazione laterale per un minor numero di fessure presenti all'interfaccia pasta-aggregato rispetto ai calcestruzzi a bassa resistenza.

1.1.5 Resistenza a Trazione

La resistenza a trazione, al pari del modulo elastico, cresce relativamente poco con la resistenza a compressione: se la resistenza meccanica a compressione raddoppia l'aumento della resistenza a trazione si attesta appena intorno al 20%.

Secondo alcuni studi (ACI Journal, 1984), inoltre, la resistenza a trazione indiretta (R_{ti}) in un calcestruzzo a bassa resistenza è all'incirca il 10% della resistenza meccanica a compressione del materiale, mentre nei calcestruzzi ad alta resistenza la R_{ti} si riduce ad appena il 5% della resistenza a compressione.

L'estensione al CEB-FIB Model Code del 1990 propone di impiegare per il calcolo della resistenza a trazione le seguenti formule:

$$f_{ctk,min} = 1,22 \cdot [(f_{ck} + 8)/18]^{0,6}$$

$$f_{ctk,max} = 2,38 \cdot [(f_{ck} + 8)/18]^{0,6}$$

$$f_{ctm} = 1,80 \cdot [(f_{ck} + 8)/18]^{0,6}$$

1.1.6 Ritiro Igrometrico

Sembra evidenziarsi dai dati disponibili sulla stabilità dimensionale del conglomerato in ambiente secco che i calcestruzzi ad alta resistenza siano caratterizzati da una maggiore velocità di contrazione, nella fase immediatamente successiva all'esposizione all'atmosfera insatura di vapore, rispetto ai calcestruzzi tradizionali (Tomaszewicz et al.). A lungo termine, generalmente dopo quattro mesi, invece, non si registrano sostanziali differenze nel valore di ritiro fra calcestruzzo ad alta e bassa resistenza meccanica (Charif et al., 1990).

Alcuni risultati (ACI Journal, 1984) sembrano, inoltre, indicare che il ritiro dei calcestruzzi ad alte prestazioni sia molto più dipendente dal contenuto di acqua dell'impasto che dal rapporto acqua/cemento.

Questi risultati potrebbero spiegare perché i calcestruzzi ad alte prestazioni, ottenuti riducendo il rapporto a/c solo mediante l'incremento del legante ma senza alcuna riduzione dell'acqua di impasto, hanno evidenziato valori di ritiro superiori a quelli dei calcestruzzi tradizionali (Parrot, 1969).

1.1.7 Durabilità

Nelle opere in calcestruzzo il degrado è uno dei problemi più rilevanti che necessita dell'esame di due aspetti paralleli, ma anche in relazione tra loro: da una parte le condizioni ambientali dalle quali derivano le aggressioni, dall'altra la resistenza che il materiale deve opporre a queste aggressioni. Il calcestruzzo è durabile ed è capace, cioè, di conservare le caratteristiche iniziali nel momento in cui questa resistenza è in grado di vincere le sollecitazioni aggressive dell'ambiente.

L'impermeabilità è un prerequisito necessario, anche se non sufficiente, per la resistenza del materiale alle aggressioni ambientali. In sostanza minore è la permeabilità del calcestruzzo, maggiore sarà la sua durabilità.

E' importante ricordare che, grazie alla maggiore compattezza della matrice legante, i calcestruzzi ad alte prestazioni hanno tenuta nel tempo nettamente superiore a quella dei calcestruzzi ordinari, al punto che la loro maggiore durabilità permette alla vita in servizio di andare ben oltre i 50 anni, appunto perché vi è una maggiore resistenza offerta alla penetrazione degli agenti aggressivi.

1.1.8 Permeabilità

Alla porosità del calcestruzzo (Neville, 1995) è direttamente legato il trasporto degli ioni aggressivi. I solidi permeabili trasportano fluido attraverso i pori.

I parametri che controllano il trasporto degli agenti aggressivi sono i gradienti così come la pressione capillare (imbibizione di acqua nella reazione alcali-aggregato), crescita cristallina (ettringite), temperatura, umidità (evaporazione, bagnato e asciutto) e la composizione chimica del fluido contenuto nei pori (sovrasaturazione della soluzione in CaO ed Al_2O_3 nel caso di formazione di ettringite).

Come già detto minore è la permeabilità del calcestruzzo, maggiore è la sua resistenza alle soluzioni aggressive (Derucker et al., 1994; Neville, 1995).

La notevole diminuzione della permeabilità è attribuita alla raffinazione della struttura dei pori e agli effetti apportati dai materiali pozzolanici all'interfaccia pasta di cemento-aggregato.

L'intera porosità di 1 cm^3 di calcestruzzo di cemento potrebbe essere rappresentata schematicamente da 1 solo poro cilindrico avente diametro di 6 mm (caso a) oppure da 10^{12} pori cilindrici aventi diametro di 6 nm (caso b). Nel primo caso la permeabilità K sarebbe dell'ordine di 10^2 cm/s mentre nel secondo di circa 10^{-10} cm/s (figura 1.8).

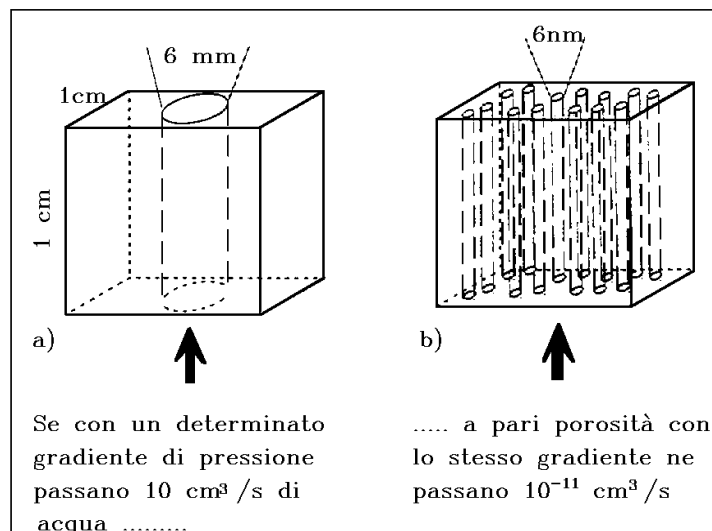


Fig. 1.8 - Dipendenza della permeabilità dalla dimensione dei pori.

La permeabilità è influenzata considerevolmente dall'inclusione di materiali pozzolanici nel calcestruzzo. La porosità totale della pasta cementizia non è ridotta dall'aggiunta

della silice fume. La frazione di pori capillari è considerevolmente ridotta e la struttura dei pori è costituita da pori disconnessi (Mehta, 1983; Gillot, 1975).

Normalmente, maggiore è l'aggiunta di silice fume, più discontinua diventa la struttura. Questo fenomeno è molto esaltato nelle malte a causa della modificazione dell'interfaccia tra sabbia e pasta cementizia (Powers et al., 1954; Diamond, 1978).

Si è trovato che il contenuto ottimale di silice fume riguardo alla permeabilità può allinearsi tra 6 ed 8% (Sorensen, 1982).

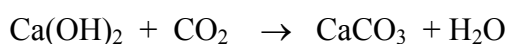
E' stato, inoltre, dimostrato che la silice fume può ridurre notevolmente la permeabilità all'acqua in un calcestruzzo magro, ma ha minore influenza sulla permeabilità di una miscela ricca in cemento (Gjorv, 1983).

Nello stesso studio si è rilevato che il coefficiente di permeabilità all'acqua di un calcestruzzo contenente 100 kg/m^3 di cemento può decrescere da $1,6 \times 10^{-7}$ a 4×10^{-10} m/s se vengono aggiunti 10 kg/m^3 di silice fume. Quest'ultimo valore di permeabilità è comparabile a quello ottenuto per un calcestruzzo senza silice fume dosato a 250 kg/m^3 .

I coefficienti di permeabilità all'acqua di calcestruzzi contenenti 300 kg/m^3 di materiale cementizio e 0% e 5% di silice fume sono risultati essere rispettivamente 3×10^{-11} m/s e 6×10^{-14} m/s.

1.1.9 Carbonatazione

La penetrazione dell'anidride carbonica (CO_2) presente nell'aria all'interno del calcestruzzo, che avviene per diffusione attraverso gli spazi accessibili dei pori interconnessi e delle microfessure, e la conseguente neutralizzazione della calce proveniente dall'idratazione dei silicati, fenomeno noto come carbonatazione, non è di per sé un fenomeno degradante del materiale. Esso consiste nella trasformazione dell'idrossido di calcio in carbonato di calcio e nella conseguente diminuzione del pH iniziale (circa 12,5) della soluzione contenuta nei pori:



La diminuzione del pH nella matrice cementizia crea condizioni più favorevoli al processo di corrosione dell'acciaio causata dall'ingresso di ossigeno e umidità. Per questo motivo, la carbonatazione è un fenomeno da prendere in considerazione per le strutture in calcestruzzo armato o precompresso.

La carbonatazione, pertanto, pur innocua di per sé nei confronti del calcestruzzo, crea le condizioni favorevoli nella matrice cementizia per la corrosione dei ferri, che sostanzialmente consiste in una trasformazione del metallo nel suo corrispondente ossido idrato. In sostanza, con la carbonatazione si abbassa il pH e cessa l'azione protettiva assicurata dalla matrice cementizia nei confronti dei ferri di armatura.

A causa di questo processo, accompagnato da un considerevole rigonfiamento dei ferri per il maggior volume occupato dall'ossido rispetto al metallo, si verifica anche la fessurazione e l'espulsione del copriferro in calcestruzzo per la conseguente azione dirompente.

Alcuni studiosi, usando il metodo della fenolftaleina per misurare la profondità di carbonatazione del calcestruzzo, hanno trovato che questa decresce con l'aumentare della resistenza a compressione, e che l'aggiunta di silice fume riduce leggermente la profondità di carbonatazione (Vennestad e Gjorv, 1983).

1.1.10 Dilavamento

Mentre la carbonatazione è un processo che coinvolge le strutture esposte all'aria, la presenza di CO₂ nelle acque piovane o naturali a contatto con le strutture in calcestruzzo comporta un processo addizionale che consiste sostanzialmente in un dilavamento del materiale.

Le acque contenenti CO₂, infatti, possono essere considerate acque acide per la presenza di acido carbonico:



L'acido carbonico può provocare la trasformazione del carbonato di calcio, poco solubile, in bicarbonato di calcio, molto più solubile e quindi facilmente dilavabile da acque piovane o correnti:



L'allontanamento di tale sale solubile dal calcestruzzo fa aumentare la sua permeabilità; questo facilita ed esalta l'ingresso di agenti aggressivi.

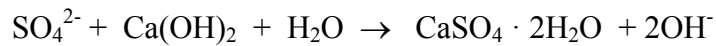
L'aggiunta di silice fume nel calcestruzzo riduce tale fenomeno diminuendo la quantità di Ca(OH)₂ presente nel calcestruzzo (Diamond, 1983).

1.1.11 Attacco Solfatico

L'azione solfatica sulle strutture in calcestruzzo avviene quando esse vengono a contatto con acque o terreni contenenti solfati, i quali possono diffondersi nel calcestruzzo e reagire con i prodotti dell'idratazione del cemento, come C_3AH_6 e $Ca(OH)_2$ o con i costituenti non ancora idratati del cemento - C_3A e C_4AF -, per formare ettringite.

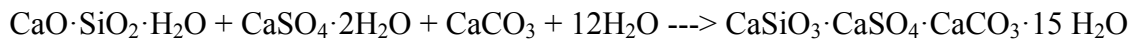
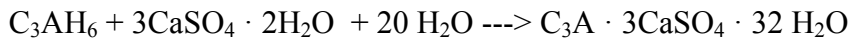
In presenza di umidità, l'ettringite si forma con notevolissimo aumento di volume causando un'espansione distruttiva nel calcestruzzo.

L'azione distruttiva del solfato si può spiegare attraverso tre meccanismi distinti ancorché tra loro in relazione. Innanzitutto lo ione SO_4^{2-} penetrato all'interno del calcestruzzo può interagire con la calce, $Ca(OH)_2$ presente nella matrice cementizia per formare gesso:



L'aumento dirompente di volume che danneggia la matrice cementizia è dovuto alla trasformazione della calce in gesso.

Successivamente, il gesso così formato può reagire con gli alluminati, come ad esempio il C_3AH_6 , o con i silicati di calcio idrati, come $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$, per produrre rispettivamente ettringite o thaumasite:



Per la matrice cementizia entrambe le reazioni sono ancor più distruttive di quella che porta alla formazione di gesso. La thaumasite, la cui formazione è favorita alle basse temperature (0, 10°C), provoca l'attacco più severo della matrice cementizia a causa della distruzione del componente silicato idrato (C-S-H) che costituisce l'elemento legante più significativo.

E' stato sperimentato che l'aumento del contenuto di allumina incorporato negli idrati in presenza di silice fume riduce la quantità di allumina disponibile per la formazione di ettringite, quindi migliora ulteriormente la resistenza del calcestruzzo ai solfati (Sellevold, 1984).

1.1.12 Penetrazione dei Cloruri e Corrosione dei ferri d'armatura

In assenza di cloruri la corrosione dei ferri d'armatura avviene quando il pH del calcestruzzo è inferiore a 9-10, all'aumentare del contenuto di cloruri la corrosione si

innesca per valori del pH superiori (Broomfield, 1997). È stato dimostrato che la diffusione dei cloruri nel calcestruzzo è un fenomeno complesso, funzione del tempo, e controllato da numerosi parametri interdipendenti.

I principali fattori di cui si tiene conto sono: il rapporto acqua -legante della miscela di calcestruzzo; il tipo di cemento e la presenza di altri materiali cementizi nella miscela di calcestruzzo come fly ash, loppa granulata d'altoforno macinata e silice fume; l'effetto mutuo dei cationi coesistenti con lo ione cloro; la temperatura dell'ambiente che circonda gli elementi in calcestruzzo ed infine il tipo di condizione di esposizione.

La resistenza del calcestruzzo alla penetrazione dei cloruri dipende anche dalla quantità e dalla finezza dell'aggiunta (Bleszynski et al., 2002).

Si è constatato che calcestruzzi contenenti una grande quantità di aggiunta (70% di loppa granulata d'altoforno molto finemente macinata e 10% di silice fume), stagionati per 28 giorni in ambiente umido, hanno mostrato ottima resistenza alla penetrazione ai cloruri (Bleszynski et al., 2002).

Lo strato passivante protettivo di ossido di ferro presente sui ferri d'armatura può diventare instabile quando il pH del calcestruzzo circostante scende a valori tra 10 e 11 o quando questo strato viene a contatto con ioni cloro. Una volta distrutto lo strato passivante, si può formare una cella galvanica tra differenti parti dei ferri d'armatura causando corrosione nella zona anodica.

La velocità di corrosione dipende dal tasso di umidità ed ossigeno trasportato nel calcestruzzo e la conduttività elettrica dello stesso calcestruzzo.

Quando la silice fume è utilizzata in sostituzione del cemento, il pH del calcestruzzo può decrescere poiché è presente una minore quantità di cemento.

La diminuzione della quantità di Ca(OH)_2 dovuta alla reazione pozzolanica della silice fume, e la eventuale riduzione della concentrazione di alcali - eventualmente presenti nel cemento - nell'acqua dei pori riduce ulteriormente il pH.

L'esposizione del calcestruzzo all'acqua del mare o ai sali disgelanti può provocare una penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo indurito. Il coefficiente di diffusione dei cloruri e quindi il loro contenuto nel calcestruzzo sono ridotti in presenza di silice fume o di altre aggiunte assimilabili.

Queste aggiunte migliorano la resistenza alla diffusione dei cloruri principalmente grazie al processo di raffinazione dei pori capillari dovuto alla loro azione di filler ed al C-S-H generato dalla reazione pozzolanica.

Grazie alla riduzione della penetrazione dello ione cloro, è attesa una maggiore resistenza alla corrosione dei ferri d'armatura nei calcestruzzi che contengono tali aggiunte (Berke, 1989).

1.1.13 Resistenza ai cicli ripetuti di Gelo e Disgelo

Nel momento in cui l'acqua liquida contenuta nei pori della matrice cementizia si trasforma in ghiaccio, si verifica un aumento di volume di circa il 9% che provoca un'azione dirompente nel calcestruzzo. Se questo fenomeno si verifica ciclicamente il materiale è sottoposto ad una sollecitazione di fatica che può danneggiare seriamente il materiale.

L'utilizzo della silice fume, creando una raffinazione dei pori, innalza il punto di congelamento dell'acqua presente nei piccoli pori capillari (Khayat et al., 1989).

Calcestruzzi ad alte resistenze realizzati con aggiunta di silice fume mostrano eccellente resistenza al gelo in presenza di sali disgelanti, anche in assenza di aerante ed anche quando il calcestruzzo aveva un solo giorno di stagionatura umida. Questi calcestruzzi erano stati realizzati con il 6% di silice fume ed un rapporto $a/(c+sf)$ tra 0,23 e 0,30 (Gagne et al., 1990).

1.1.14 Lavorabilità e Messa in Opera

Poiché l'uso strutturale del calcestruzzo ad alte prestazioni è solitamente accompagnato da un'elevata densità d'armatura, per assicurare un'appropriata posa in opera è necessario che il calcestruzzo sia altamente lavorabile. E' usuale specificare valori di abbassamento al cono superiori a 200 mm.

La lavorabilità ottenuta con alti dosaggi di superfluidificanti è a volte inferiore a quella risultante da contenuti d'acqua elevati, in quanto l'impasto tende ad essere alquanto tenace e quindi occorre, in tali casi, un più prolungato assestamento.

Il superfluidificante influisce sulla velocità di decadimento della lavorabilità. Per avere la lavorabilità desiderata al momento del getto è frequente il ricorso ad un ulteriore dosaggio di superfluidificante a piè d'opera.

Riguardo alla messa in opera le operazioni di getto, costipamento e maturazione del calcestruzzo ad alte prestazioni non differiscono essenzialmente da quelle normalmente attuate per i calcestruzzi di classi inferiori se non per la maggior cura con la quale dovranno essere considerati tutti i parametri e le fasi influenti sulle resistenze finali del prodotto.

Calcestruzzi con resistenza a compressione maggiore di 70 MPa sono stati e sono realizzati utilizzando materiali e metodi convenzionali.

1.1.15 Benefici prodotti dagli HPC

Offrendo gli HPC maggiori resistenze meccaniche e maggiore durabilità dei calcestruzzi ordinari possono essere utilizzati nella realizzazione di strutture ormai usuali, quali grattacieli, ponti, strutture offshore, etc., con un notevole aumento dello standard qualitativo.

Infatti le dimensioni degli elementi strutturali di queste costruzioni possono essere ridotte notevolmente a vantaggio della leggerezza, ottenendo così minori carichi, e della forma della struttura (snellezza). Un esempio può essere rappresentato dall'aumento delle luci delle travi precomprese nelle quali aumentano sempre i carichi di precompressione. Un calcestruzzo con elevate resistenze anche alle brevi stagionature facilita l'applicazione di elevati carichi di precompressione anche dopo brevi stagionature con notevoli vantaggi tecnici ed economici. La realizzazione di strutture poste in ambienti particolarmente aggressivi ha richiesto una maggiore durabilità del calcestruzzo, che con l'avvento degli HPC non è più un problema, anzi diminuisce la manutenzione delle strutture e allunga la vita utile delle stesse.

E' chiaro che per soddisfare tutte queste esigenze lo sguardo è stato rivolto verso materiali con diverse caratteristiche, nuove tecnologie, nuovi processi costruttivi, nuove forme. Dal punto di vista progettuale, è necessario utilizzare adeguate tecniche di progettazione che tengano conto di tutti questi fattori nel loro insieme. Infatti è importante avere un approccio nuovo nei confronti della progettazione strutturale, integrando i dati riguardanti:

- i materiali (possibile uso di HPC, HPC fibrorinforzati, HPC con aggregato leggero, armature con proprietà elastiche migliorate, cavi migliorati, etc.);

- le tecnologie (miglioramento della precompressione esterna per ottenere sezioni più snelle di maggiore resistenza e più leggere, sviluppo di costruzioni composite dove i problemi di connessione sono diversi con gli HPC, ripresa di strutture precomprese con nuovi mezzi per l'assemblaggio e la connessione, etc.);
- i processi costruttivi (appropriato uso della notevole lavorabilità di questo calcestruzzo per un completo sviluppo delle tecnologie di pompaggio, uso delle resistenze a breve stagionatura per un nuovo approccio, da un punto di vista economico, per le casseforme e la precompressione, uso delle possibilità di parziale precompressione a tempi molto brevi, etc.);
- gli effetti indotti (cura nella qualità della stagionatura appena l'HPC è messo in opera, o enfasi sulle caratteristiche specifiche dei problemi di diffusione della precompressione risultati dall'associazione di HPC e precompressione esterna;
- la forma della struttura (diminuzione di peso usando modelli di costruzione in acciaio come capriate, progressi nelle strutture bullonate leggere, etc.);
- le condizioni specifiche (durabilità in ambiente chimicamente aggressivo, impermeabilità totale all'aria, resistenza all'abrasione ed all'impatto);
- gli stadi nella manutenzione: l'alta durabilità degli HPC permetterà la giusta programmazione dall'inizio della sostituzione dei cavi di precompressione che certamente evolveranno tecnologicamente. Possibilità di riconciliare in una struttura il tempo di vita del calcestruzzo con la permanenza delle caratteristiche dei cavi.

1.1.16 Realizzazioni Strutturali con HPC

Nella produzione di calcestruzzi ad alte resistenze, ormai usualmente utilizzati nei paesi più industrializzati, è stata data finora particolare attenzione all'uso della silice fume come parziale sostituzione del cemento.

Inizialmente le maggiori applicazioni di questo materiale sono state destinate a opere di ingegneria infrastrutturale particolarmente sollecitate da carichi statici e dinamici in servizio o da azioni aggressive da parte di un ambiente particolarmente ostile

(piattaforme marine per estrazione del petrolio, ponti di grande luce, tunnel sottomarini, grattacieli in zone sismiche, ecc).

Tuttavia, oggi vi è la propensione ad impiegare il calcestruzzo HPC anche in opere di architettura o di ingegneria civile meno sollecitate per produrre calcestruzzi più durevoli, sfruttare le caratteristiche meccaniche attraverso una diversa progettazione e per sfruttare la rapidità produttiva in fase esecutiva grazie al velocissimo sviluppo della resistenza meccanica (Collepari et al., 1994).

Vengono di seguito riportati alcuni esempi di realizzazioni strutturali con calcestruzzi ad alte prestazioni (Coppola, 1996).

Un esempio di utilizzazione ottimale dei calcestruzzi ad alta resistenza riguarda il loro impiego negli elementi che risultano prevalentemente compressi, quali ad esempio i pilastri di edifici multipiano.

Un interessante applicazione in questo settore delle costruzioni ha riguardato la realizzazione di due edifici a Seattle di 58 e 44 piani (Two Union Square e Pacific First Center rispettivamente). Il calcestruzzo ad alta resistenza è stato impiegato per il riempimento di pilastri in acciaio circolari. Inizialmente, era stato richiesto un calcestruzzo con una resistenza di progetto di 70 MPa. Tuttavia, per l'esigenza di aumentare la rigidità dei pilastri venne utilizzato un calcestruzzo con una resistenza media di 115 MPa il cui modulo elastico si attestava intorno a 50000 MPa. Il calcestruzzo venne confezionato con un rapporto acqua-cemento = 0,25, dosato a 513 kg/m³ di cemento, con aggiunta dell'8 % di silice fume; superfluidificante 3,7% rispetto al peso del cemento; aggregati con D_{max}=10 mm.

Un'altra interessante applicazione del calcestruzzo ad alta resistenza riguarda la costruzione dell'edificio della "Grande Arche de la Defense a Parigi". L'edificio alto all'incirca 130 m e con una luce di 70 m fu costruito dall'impresa Bouygues, l'unica a proporre la realizzazione delle travi (a doppio T) al piano più alto, mediante il getto in opera di un calcestruzzo con una resistenza caratteristica di 60 MPa. Grazie all'impiego della silice fume (30 kg/m³) e di additivi fluidificanti ritardanti fu possibile pompare il calcestruzzo ad un'altezza di 130 m, ed a 400 m circa di distanza dal mescolatore con pressioni di pompaggio di circa 60 bar senza segregazione nell'impasto e con elevata uniformità di prestazioni, come è testimoniato dal ridotto valore dello scarto quadratico medio (circa 5 MPa).

Altre interessanti applicazioni del calcestruzzo ad alta resistenza riguardano la realizzazione di travi da ponte precomprese. Per queste strutture le elevate resistenze meccaniche possono essere imposte sia da considerazioni di carattere strutturale che da esigenze di durabilità al fine di garantire una vita utile di almeno 100 anni per queste infrastrutture particolarmente costose.

Ad esempio, nella costruzione del ponte Storebaelt in Danimarca le prescrizioni di capitolato imponevano per il rapporto acqua-legante un valore massimo di 0.35. A questo rapporto acqua-legante corrisponde generalmente una resistenza a compressione di circa 65 MPa indipendentemente dalle sollecitazioni meccaniche cui il ponte è sottoposto.

Simili requisiti richiesti per il ponte Bergosoysundet determinarono, per garantire la durabilità del calcestruzzo, l'impiego di un calcestruzzo con una resistenza di circa 95 MPa. Ancora un'applicazione del calcestruzzo ad alta resistenza è quella relativa al ponte Perthuiset che, con una luce di 132 m, attraversa il fiume Loira in Francia. I 33 elementi che costituiscono l'impalcato furono realizzati in opera con calcestruzzo la cui resistenza media a 28 giorni raggiungeva il valore di 80 MPa. Ulteriori campi di impiego del calcestruzzo ad alta resistenza riguardano la realizzazione di tunnel sottomarini, quali ad esempio quelli costruiti al di sotto del Canale della Manica per collegare la Francia all'Inghilterra. In questo caso la resistenza a compressione elevata è stata dettata maggiormente da esigenze di durabilità oltre che da esigenze legate al processo produttivo (necessità di raggiungere resistenze a compressione di 20 MPa in 6-8 ore per produrre economicamente i conci prefabbricati per il rivestimento del tunnel).

Interessanti applicazioni del calcestruzzo ad alta resistenza si segnalano, inoltre, nel settore dei contenitori per reattori nucleari, nei tubi e nelle piattaforme offshore dei mari del Nord.

Nella tabella 1.1 è riportata una classificazione delle principali opere realizzate nel mondo con calcestruzzi ad alte prestazioni, tra le quali anche quelle sopra menzionate, le quali sono state catalogate in base al tipo di struttura realizzata mettendo in evidenza inoltre le caratteristiche migliorate grazie all'utilizzo di tali calcestruzzi.

| TIPI DI STRUTTURE | CARATTERISTICHE MIGLIORATE | REALIZZAZIONI |
|-------------------|---|---|
| Ponti | Resistenza a breve stagionatura, lavorabilità, durabilità, deformazioni differenziate, resistenza | Joigny (F), Rance (F), Perthuiset (F), Louhans (F), Champs du Conte (F), Sylans (F), Ré (F), Auzon (F), |

| | | |
|--|---|---|
| | | Storebaelt (D), Bergsoysundet () |
| Strutture Offshore | Durabilità, compressione e taglio, lavorabilità, abrasione e impatto | Gullfaks B,C (N) Tere Neuve (CAN) Terre Adélie (F) |
| Edifici Molto Alti | Compressione e taglio, lavorabilità, resistenze a brevi stagionature, vincolo | Nova Scotia Toronto (CAN) 2 Union Sq Seattle (USA) 225 Wacker Chicago (USA) 181 Wacker Chicago (USA) NW Hospital Chicago (USA) Petronas Tower (Malesia) Arche Paris (F) Chibune R.S. Osaka (JAP) |
| Tunnel | Durabilità, compressione, resistenze a brevi stagionature | Villejust (F) Manche (F and G.B.) La Baume (F) |
| Autostrade | Abrasione, impatto, gelo-disgelo, taglio, durabilità, lavorabilità | Valerenga Oslo (N) Highway E18-E6 (N) Highway 86 Paris (F) Paris Airport (F) |
| Precompressione di Elementi Strutturali | Resistenze a brevi stagionature, taglio, lavorabilità | Precast Joists (F) Precast floor slabs (F) |
| Costruzioni Composite Acciaio - Calcestruzzo | Taglio, compressione, lavorabilità, vincolo | La Roize (F) 2U Sq. Seattle (USA) |
| Rete Fognaria | Durabilità, abrasione, compressione, lavorabilità | Paris (F) |
| Fondazioni Particolari | Compressione, lavorabilità, resistenze a brevi stagionature, deformazioni differenziali | Hassan Mosque (MAR) |
| Strutture Nucleari | Durabilità, resistenza, pressione dell'acqua | Civeaux (research) (F) |

Tab. 1.1 - Esempi di strutture realizzate con HPC

1.2 Calcestruzzi autocompattanti (SCC)

1.2.1 Premessa

Sviluppato in Giappone alla fine degli anni'80 a seguito di studi sulla reologia dei calcestruzzi ad alta resistenza, il calcestruzzo autocompattante (Self Compacting Concrete, SCC) sta rapidamente diffondendosi in tutta Europa. Si definisce

“autocompattante” un calcestruzzo che possiede allo stato fresco fluidità particolarmente elevata in assenza di segregazione. Si tratta dunque di un calcestruzzo omogeneo che, una volta posto in opera, si autocompatta per effetto del proprio peso senza necessità di vibrazione.

Il calcestruzzo SCC si differenzia da un calcestruzzo tradizionale soprattutto per il grado di omogeneità, l'estrema fluidità, l'elevata deformabilità ed i lunghi tempi di mantenimento della lavorabilità.

Considerando la complessità e la struttura del settore delle costruzioni, non vi è alcun dubbio che lo sviluppo del calcestruzzo autocompattante è stato straordinariamente rapido.

Questo è vero sia in termini di generazioni di nuove conoscenze sia per la penetrazione della tecnologia nel mercato.

Il tempo trascorso dalle prime discussioni ed iniziative in Giappone verso la metà degli anni 80 al primo concetto di SCC come materiale è stato solo di alcuni anni. In altri 3-4 anni è stato possibile dimostrare che il processo per produrre il materiale su scala reale era possibile.

Durante i successivi dieci anni i progetti in scala reale sono stati portati a termine. Applicazioni di routine in condizioni di concorrenza sono avvenuti in molti dei paesi dove la tecnologia si era sviluppata nel giro di 5-10 anni dall'inizio delle prime ricerche.

1.2.2 Requisiti prestazionali

1.2.2.1 Reologia

Le specifiche proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti allo stato fresco sono :

- Capacità di riempimento
- Resistenza alla segregazione
- Capacità di scorrimento.

La *Capacità di riempimento* (scorrimento senza vincoli) è la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco di scorrere senza segregare sotto l'azione del solo peso proprio;

La *Resistenza alla segregazione* è la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco di mantenere la propria composizione omogenea ed invariante sia in movimento sia in riposo durante il trasporto e la messa in opera;

La *Capacità di scorrimento* (passare attraverso gli ostacoli) è la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco di cambiare forma e passare attraverso le armature o gli ostacoli e riempire gli spazi disponibili senza segregazione e senza bloccaggio.

L'importanza della comprensione del comportamento reologico per lo sviluppo dell'SCC ha portato ad un crescente interesse alla reologia del calcestruzzo. Tuttavia, l'utilizzazione di un approccio reologico nella ricerca destinata alle costruzioni non è stata finora largamente messa in atto, salvo poche eccezioni.

La ricerca ha, invece, utilizzato metodi di prova della lavorabilità come strumenti per la valutazione dando, così, un considerevole contributo alle relazioni di carattere qualitativo mentre il lavoro sulla comprensione dei fenomeni è stato meno frequente.

Tuttavia, ora sembra stia emergendo una maggiore attenzione alla reologia nella ricerca sull'SCC. Essa viene sempre più usata nel delineare i meccanismi, nell'ottimizzare le materie prime, nel comprendere la relazione tra tixotropia e pressione idraulica sulle casseforme e nell'affrontare problemi nella meccanica dei fluidi per modellare matematicamente il flusso. L'utilizzo dei parametri reologici sembra non solo essere adottato dai laboratori di ricerca ma anche dai laboratori di alcuni fornitori.

1.2.2.2 Compattabilità

Il calcestruzzo gettato all'interno dei casseri della struttura armata è inevitabilmente meno compattato di quello gettato all'interno della cassaforma utilizzata per confezionare i provini cubici o cilindrici per la determinazione della R_{ck} (resistenza cubica) o della f_{ck} (resistenza cilindrica) rispettivamente.

Questa differenza aumenta con la difficoltà di getto nella struttura (forma geometricamente complicata, di spessore sottile, molto armata), ma diminuisce con la maggiore lavorabilità del calcestruzzo fresco.

Se per misurare la differente compattazione del calcestruzzo si adotta la diversa massa volumica o densità della struttura (d_s) determinata sulla carota e di quella misurata sul provino (d_p) cubico e cilindrico (fig. 1.9), si arriva alla definizione del cosiddetto grado di compattazione (g_c) attraverso l'equazione:

$$g_c = d_s / d_p$$

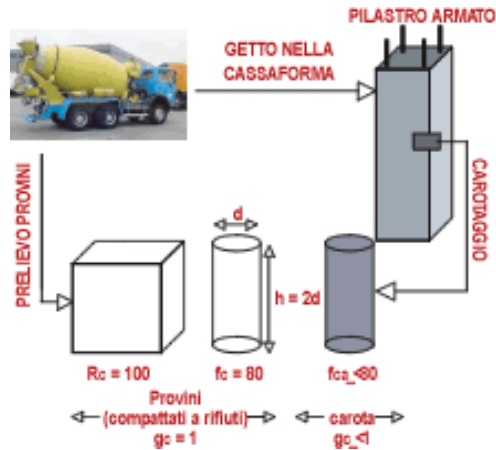


Fig. 1.9 - Confronto nella resistenza meccanica dei provini compattanti a rifiuto e della carota estratta dalla struttura. la resistenza meccanica del provino cubico è stata posta eguale a 100.

La differenza tra la densità del conglomerato messo in opera nella struttura (d_s^*), e quella del calcestruzzo nel provino (d_p^*) compattato “a rifiuto”, cioè alla massima densità possibile fino a rimuovere tutta l’aria intrappolata, come specificato dalla norma UNI EN 12390/2, è proprio dovuto al fatto che difficilmente il calcestruzzo dentro la struttura viene compattato alla massima densità possibile.

Sulla stessa carota e sullo stesso provino, dopo aver determinato la densità, si può misurare la resistenza meccanica a compressione: f_{ca}^{**} sulla carota riferita alla struttura, R_c sul provino cubico o f_c sul provino cilindrico.

Se le due porzioni di calcestruzzo contenuto nella carota e nel provino cilindrico possedessero la stessa densità, cioè se fossero state compattate alla stessa maniera ($g_c=1$), si verificherebbe:

$$f_{ca} = f_c = 0,80 R_c \quad \text{se } g_c = 1$$

Per giustificare la equazione su indicata occorre ricordare che, a parità di composizione di calcestruzzo e di modalità di confezionamento (compattazione, stagionatura, temperatura di maturazione), il valore di resistenza meccanica misurata su provini cilindrici o su carote (anch’esse cilindriche) con rapporto altezza/diametro di 2 è circa pari all’80% di quella misurata su provini cubici con lato uguale al diametro dei provini cilindrici: l’effetto è dovuto alla maggiore “snellezza” dei provini cilindrici rispetto alla forma più “tozza” dei provini cubici. Se però il calcestruzzo messo in opera nella

struttura è stato meno compattato di quello gettato nelle casseforme di provini (cubici o cilindrici), cioè se $g_c < 1$, l'equazione precedente diventa :

$$f_{ca} < f_c = 0,80 R_c \quad \text{se } g_c < 1$$

La nuova equazione è correlata con la maggiore macro-porosità del conglomerato in opera (questo è, in sostanza, il significato di $g_c < 1$) e che, in casi estremi, può arrivare alla formazione di vespai facilmente visibili o di nidi di ghiaia interni non visibili direttamente, e per questo indubbiamente più insidiosi per la sicurezza della struttura.

Il calcestruzzo autocompattante è la proposta per evitare le cadute di resistenza meccanica nella struttura rispetto a quella teorica raggiungibile nei provini, per garantire cioè un grado di compattazione g_c eguale a 1.

Naturalmente anche altre importantissime proprietà come la permeabilità, la durabilità, le deformazioni elastiche e viscosi, tutte penalizzate dalla macroporosità interna derivante da una compattazione incompleta ($g_c < 1$), traggono giovamento dall'impiego dell'SCC. In pratica, si tratta di un calcestruzzo caratterizzato da mobilità e coesione al tempo stesso; esso è talmente mobile (Fig. 2.2) che si può mettere in opera senza necessità di intervenire con una compattazione esterna (vibrazione interna con aghi o a parete sulle casseforme) e che, ciò nonostante, per le sue particolari proprietà reologiche nello stato fresco, garantisce il raggiungimento di un grado di compattazione g_c eguale a 1.

1.2.2.3 Lavorabilità

La capacità del calcestruzzo fresco di comportarsi adeguatamente nel processo produttivo è definita: *lavorabilità*.

La lavorabilità può essere descritta considerando il diametro della focaccia di calcestruzzo ottenuta dopo il sollevamento del cono; quando il flusso del conglomerato si è arrestato, ed il tempo necessario alla focaccia di calcestruzzo per spandersi e raggiungere un determinato diametro e la posizione finale.

La misura del diametro finale è da considerarsi proporzionale al limite di scorrimento del conglomerato e, quindi, alla deformabilità/lavorabilità dello stesso per effetto del peso proprio: maggiore sarà il diametro finale e più elevata sarà la deformabilità/lavorabilità del calcestruzzo allo stato fresco.

Un altro metodo per descrivere la lavorabilità consiste nel misurare il tempo impiegato da un volume noto di calcestruzzo a fuoriuscire da un imbuto a forma di V o di O di

dimensioni standardizzate. Il tempo di svuotamento del calcestruzzo dall'imbuto è direttamente correlato con la sua viscosità plastica: minore risulta il tempo di svuotamento, meno viscoso e quindi più lavorabile sarà il conglomerato cementizio.

La lavorabilità è finalizzata a descrivere il flusso, la capacità di passare attraverso ostacoli e la resistenza alla segregazione; pertanto essa è finalizzata a dare un quadro complessivo delle condizioni e dei requisiti nelle applicazioni pratiche.

I metodi di prova della lavorabilità devono essere rigorosamente standardizzati ed essere il più possibile indipendenti dalla manualità dell'operatore.

1.2.2.4 Resistenza meccanica

I miglioramenti microstrutturali nella tecnologia dell'SCC si trasformano in miglioramenti di resistenza meccanica.

Una riduzione nella resistenza meccanica attraverso una riduzione del contenuto dei materiali cementizi non è sempre possibile, in quanto i requisiti sul rapporto acqua/cemento sono ancora utilizzati come requisiti per le proprietà di durabilità.

1.2.2.5 Deformazione

Le misure deformazionali dell'SCC non sono state studiate estensivamente e la maggior parte degli studi sono di natura parametrica.

I risultati di queste prove indicano che talvolta l'SCC ha deformazioni maggiori e talvolta ha deformazioni minori rispetto al calcestruzzo tradizionale.

1.2.2.6 Durabilità

La microstruttura fisica e la composizione chimica indicano che la durabilità dell'SCC può essere significativamente migliorata rispetto a quella del calcestruzzo tradizionale.

Questo è stato verificato in studi che mettevano in relazione le caratteristiche microstrutturali con i processi di trasporto, i processi di idratazione, ecc. La migliorata durabilità dell'SCC è ancora usata solo come un "bonus", ma è probabile che in futuro contribuirà all'ottimizzazione ed al risparmio dei costi.

1.2.3 Classificazione dei Calcestruzzi Autocompattanti

Anche se l'SCC è tutto sommato un materiale nuovo ed innovativo, sono state fatte già delle classificazioni, tra cui quella formulata dalla Japan Society of Engineers, realizzata in funzione della percentuale d'armatura presente nel calcestruzzo. La classificazione prevede tre diverse classi di autocompattabilità:

- Classe 1 (rank 1) ⇒ autocompattabilità all'interno di elementi strutturali aventi sezioni complicate e/o sottili, con una spaziatura minima tra le armature di 35-60 mm;
- Classe 2 (rank 2) ⇒ autocompattabilità all'interno di elementi strutturali armati, con una spaziatura minima tra le armature di 60-200 mm;
- Classe 3 (rank 3) ⇒ autocompattabilità all'interno di elementi strutturali con sezioni grandi o poco armate, con spaziatura minima di 200 mm.

Ad ogni livello di autocompattabilità si possono ricercare altri ulteriori 3 livelli di diversa prestazione meccanica:

- Normal Self-Compacting Concrete (NSCC) o Self-Levelling-Concrete (SLC), che include i calcestruzzi autocompattanti prodotti presso le centrali di betonaggio da utilizzare in getti dove si richiede una resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo (R_{ck}) compresa tra 25 e 40 N/mm²;
- Precast Self-Compacting-Concrete (PSCC) destinati al settore della prefabbricazione per la realizzazione di elementi strutturali in c.a. e c.a.p. in cui si richiede una R_{ck} variabile tra 45 e 60 N/mm²;
- High-Strength Self-Compacting-Concrete (HSSCC) caratterizzati da una R_{ck} superiore a 65 N/mm² e quindi usati dove è richiesta una prestazione meccanica particolare agli elementi resistenti in calcestruzzo.

1.2.4 Mix Design dell'SCC

1.2.4.1 Materiali componenti

Il calcestruzzo autocompattante è ottenibile tramite un giusto mix degli elementi che lo costituiscono. A differenza dei calcestruzzi ordinari è molto più importante saper comporre nei tipi e nelle quantità giuste i vari costituenti e verificarne il funzionamento in termini di fluidità e autocompattabilità.

Per capire la tipologia, il ruolo ed il comportamento di tutti gli elementi si decide di ricordare, per grandi linee, quali siano questi singoli costituenti ed il ruolo che interpretano nella formazione del risultato finale.

- *Cemento*: Nei calcestruzzi autocompattanti possono essere usati tutti i tipi e classi di cemento conformi alla UNI EN 197-1, in seguito ad una verifica sperimentale di compatibilità con gli additivi che si useranno negli impasti.

Tuttavia la scelta del cemento viene effettuata in funzione delle caratteristiche prescritte dell'SCC.

- *Aggiunte, filler e finissimo*: Le aggiunte sono materiali finemente suddivisi usati nella preparazione del calcestruzzo allo scopo di migliorare alcune proprietà o di ottenere proprietà speciali. Le aggiunte più diffuse sono quelle che aumentano la viscosità e che contribuiscono ad evitare la segregazione del calcestruzzo.

Tra questi materiali si hanno in genere i filler calcarei, le ceneri volanti, le pozzolane naturali finemente macinate, le loppe basiche d'altoforno finemente macinate, i fumi di silice da valutare di volta in volta in funzione delle prestazioni da raggiungere e le zeoliti di cui se ne stanno ancora studiando le proprietà e le interazioni all'interno dell'impasto.

Da quest'ultimo materiale si sono trovati, in laboratorio, dei risultati molto incoraggianti sia in termini di resistenze prodotte, sia in merito alla lavorabilità e sia in relazione ai costi economici da sopportare. Il filler è quell'aggregato i cui granuli passano almeno per il 70% allo staccio 0,063mm. Filler, aggiunte, cemento e finissimo dell'aggregato insieme formano il cosiddetto finissimo.

Si consiglia di non usare finissimo in cui il diametro massimo sia maggiore di 0,125mm e di cui il comportamento reologico non sia stato verificato, in quanto potrebbero richiedere una quantità maggiore d'acqua d'impasto e compromettere eventualmente alcune caratteristiche dell'SCC.

- *Aggregati*: Negli SCC non ci sono particolari prescrizioni rispetto ai calcestruzzi ordinari se non la raccomandazione ad usare aggregati in cui il diametro massimo sia limitato dalla soglia dei 25mm. Però per tutte le frazioni utilizzate si devono definire le caratteristiche geometriche (granulometria ed indici di forma) e la natura.

- *Additivi*: In genere nei calcestruzzi autocompattanti si utilizzano superfluidificanti con la funzione di rendere più fluido l'SCC e ridurre notevolmente l'acqua di impasto (minimo del 25%) e modificatori di viscosità che diminuiscono la segregazione da

utilizzarsi dopo la verifica di compatibilità con gli impasti nei confronti di resistenza e durabilità.

1.2.5 Progettazione

I metodi di progettazione di un calcestruzzo autocompattante sono diversi da quelli dei calcestruzzi ordinari: la miscela va progettata per soddisfare i requisiti di autocompattabilità, oltre a quelli di resistenza e durabilità. Secondo l'approccio proposto dalla Japan Society of Civil Engineers (JSCE) il progetto si sviluppa in tre fasi:

- valutazione delle esigenze
- selezione dei materiali e proporzionamento della miscela
- verifica sperimentale della miscela

Le esigenze strutturali sono:

- interfero e copriferro minimo;
- dimensioni del getto;
- complessità architettonica delle casseforme;
- presenza di sezioni a facciavista;
- particolari di progetto che potrebbero influire sullo scorrimento del calcestruzzo (variazioni di sezione e spessore, spigoli, ecc.).

Le esigenze operative sono:

- modalità di getto (con pompa, benna, canala, ecc...);
- velocità e durata del getto;
- messa in sicurezza dei getti;
- visibilità del calcestruzzo nelle casseforme durante il getto;
- distanze di scorrimento dell'autocompattante;
- massima altezza di getto;
- accessibilità delle autobetoniere;
- posizionamento dei mezzi di pompaggio;
- ecc...

Le esigenze ambientali sono:

- clima e temperatura dell'ambiente al momento del getto;

- temperatura dei casseri;
- durata del trasporto;
- eventuali situazioni di traffico critico.

Le esigenze prestazionali sono:

- classe di esposizione ambientale;
- resistenza caratteristica;
- altri requisiti prescritti dal progettista o dall'impresa.

Per quanto riguarda la selezione dei materiali ed il proporzionamento della miscela, bisogna individuare:

- tipo, classe e quantità del cemento;
- tipo, caratteristiche e quantità di filler;
- quantità di finissimo;
- tipo e quantità di additivo superfluidificante;
- tipo e quantità di additivo modificatore di viscosità;
- tipo, classi granulometriche e quantità dell'aggregato misto.

Per quanto riguarda la verifica sperimentale, essa consiste nella:

- realizzazione delle miscele di prova;
- verifica delle caratteristiche reologiche e delle prestazioni del calcestruzzo;
- prove di produzione.

Proporzionamento preliminare

Si opera come segue:

- si effettua una valutazione complessiva delle prescrizioni relative al calcestruzzo autocompattante da progettare, che, come abbiamo già detto, sono: strutturali, operative, ambientali e prestazionali;
- si determina il contenuto di cemento e del rapporto a/c in modo da soddisfare i requisiti di resistenza meccanica, durabilità, impermeabilità all'acqua e di protezione dei ferri d'armatura previsti in sede progettuale; il contenuto di cemento dovrebbe in generale risultare non minore di 350 kg/m³;

- si determina il contenuto di filler per ottenere un totale di finissimi (cemento, aggiunte e finissimi da aggregati) pari a 500-600 kg/m³;
- si verifica che il volume di pasta (cemento, aggiunte, additivi ed acqua) risulti di almeno 400 litri/m³;
- si individua il contenuto unitario in acqua ed il rapporto acqua/finissimi compreso tra 0,28-0,38, in modo da ottenere deformabilità necessaria in un impasto stabile nei confronti della segregazione;
- si determinano le quantità degli aggregati grossi con un rapporto ponderale sulla sabbia di 1;
- si calcolano le quantità degli additivi in percentuale sul peso totale dei finissimi, in base alle indicazioni dei rispettivi produttori ed alle proprietà ottenute nelle prove di qualifica;
- si aggiunge, secondo necessità un additivo modificatore della viscosità in modo da ottenere un calcestruzzo fresco e stabile, una minor sensibilità degli impasti nei riguardi del contenuto d'acqua per quanto riguarda la segregazione e l'essudamento, limitando l'effetto delle variazioni nel contenuto d'acqua indotto dall'umidità degli aggregati.

1.2.6 Metodologie di prova

1.2.6.1 Slump Flow

La fluidità è indicata in termini di spandimento mediante la prova UNI 11041. La prova (slump flow test) stabilisce un metodo per la determinazione della consistenza dell'SCC fresco mediante la misura dello spandimento e del tempo necessario a raggiungere il diametro di 500mm. Da norma la prova è valida su calcestruzzi autocompattanti con aggregati aventi dimensione massima di 25mm. La prova si svolge versando del calcestruzzo fresco in uno stampo a forma di cono (cono di Abrams) per poi sfilarlo e misurare la consistenza e il tempo impiegato dal calcestruzzo per espandersi fino a raggiungere il diametro desiderato. Bisogna osservare la distribuzione degli aggregati grossi valutando se risulta omogenea tra la periferia e la parte centrale e se risulta presente dell'acqua di bleeding. Si misura anche lo spandimento massimo valutato come media rispetto ad almeno due direzioni ortogonali.

La prova è accettata se :

- Spandimento massimo $> 600\text{mm}$
- Tempo di spandimento per raggiungere i $500\text{mm} \leq 12$ secondi

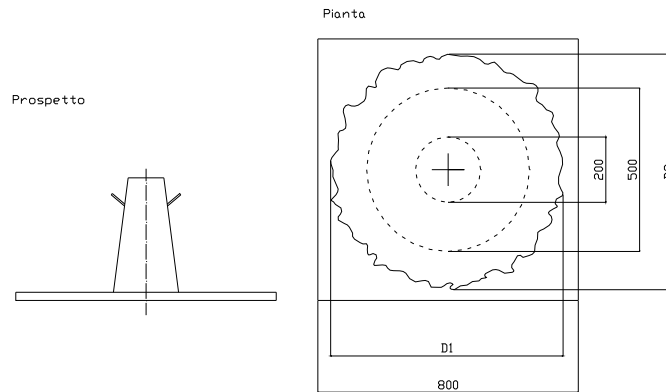


Fig. 1.10 - Dispositivo per effettuare lo slump flow test.

1.2.6.2 J-Ring

La capacità dell'SCC nello scorrimento confinato è valutabile tramite la prova con la scatola ad L (UNI 11043), ad U (UNI 11044) o con l'anello a J (UNI 11045). Nelle esperienze progettuali eseguite si è fatto ricorso alla prova ad anello a J (J ring). Si versa il calcestruzzo autocompattante in uno stampo troncoconico poggiante su una piastra dove è disposta in posizione centrata l'anello a J. Sollevando lo stampo il calcestruzzo inizia a scorrere superando l'ostacolo rappresentato dall'anello a J. Quando il movimento dell'SCC si è arrestato si rilevano due misure del diametro in direzioni ortogonali tra loro e si osserva se l'altezza all'interno dell'anello è visibilmente più alta del calcestruzzo all'esterno che deve essere di entità contenuta. La prova è accettabile se la variazione di diametro rispetto allo slump flow test risulta ≤ 50 mm.

L'anello a J è costituito da un profilato metallico circolare a sezione rettangolare 30 mm x 25 mm di diametro medio pari a 300 mm. Lungo tale circonferenza sono fissate trasversalmente delle barre cilindriche aventi diametro nominale di 10 mm e lunghezza di circa 100mm. Il passo delle barre è di 48 ± 2 mm.

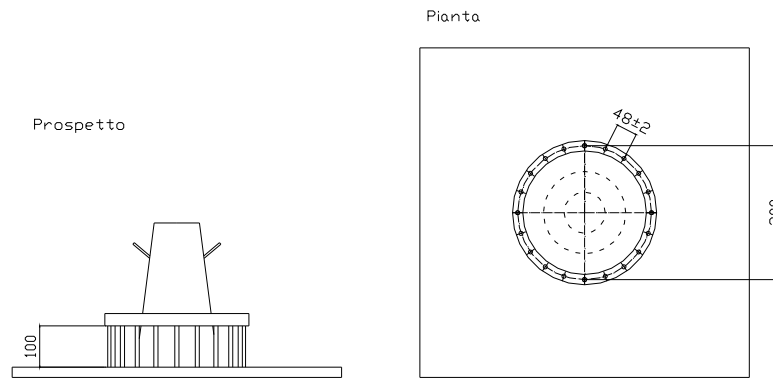


Fig. 1.11 - Dispositivo per effettuare il test J ring

1.2.6.3 V-Funnel

La resistenza alla segregazione si valuta visivamente nella prova di spandimento facendo attenzione nel valutare che le particelle di aggregato grosso non siano concentrate al centro ma distribuite uniformemente e che non si formi ai bordi il fenomeno dell'acqua di bleeding. La stabilità alla sedimentazione si determina misurando il tempo di efflusso dall'imbuto a V prima e dopo 5 minuti seguendo la prova descritta nella UNI 11042. Questa prova, eseguibile su calcestruzzi avente diametro massimo di 25 mm, si svolge riempiendo l'imbuto con il calcestruzzo fresco, per poi svuotarlo dopo un tempo massimo di 10 secondi dal termine del riempimento. Si misura il tempo di svuotamento dell'imbuto dal momento in cui si apre la valvola fino a quando tutto l'impasto esce fuori dallo strumento.

La prova viene rieseguita dopo 5 minuti senza che l'imbuto sia ripulito o umidificato ed ha esito positivo se la differenza tra il secondo valore di tempo registrato ed il primo è intorno a 3 secondi. L'imbuto è fatto in acciaio ed è montato su un supporto che costituisce parte integrante dell'apparecchiatura. La sua capienza in termini di capacità è di 10 litri.

La sezione di efflusso ha una superficie di 65 mm x 75mm e procede verso l'alto con questa sezione per 150 mm; dopo di che la sezione tende via via ad allargarsi fino a raggiungere la superficie in sommità di 510 mm x 75 mm. Lo sviluppo totale in altezza è di 600 mm. L'orifizio di efflusso dell'imbuto è corredato di una valvola a tenuta in grado di essere aperta completamente ed istantaneamente.

Il bordo superiore dello strumento deve avere bordi lisci e rinforzati per permettere il livellamento del calcestruzzo dopo il riempimento.

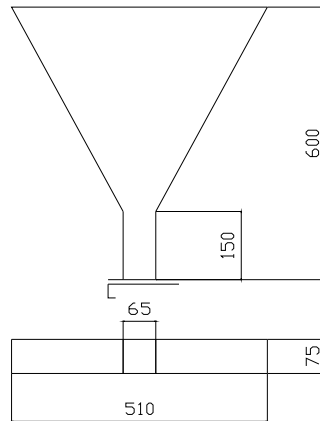


Fig. 1.12 - Dispositivo per effettuare il V funnel test.

1.2.6.4 L-Box

La norma UNI 11043 stabilisce un metodo per determinare l'attitudine del calcestruzzo autocompattante fresco a scorrere entro spazi confinati ed a verificare l'eventuale tendenza del calcestruzzo al bloccaggio. Il metodo si applica a calcestruzzi con aggregati aventi dimensione massima dei granuli non maggiore di 25 mm.

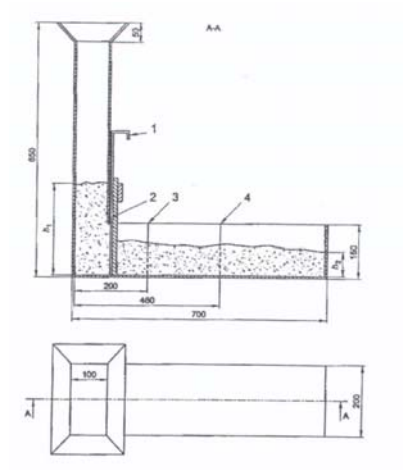


Fig. 1.13 - Dispositivo per effettuare il test L-Box

La norma UNI 11044 stabilisce un metodo per determinare l'autocompattabilità del calcestruzzo autocompattante fresco rilevando, mediante un recipiente ad U, l'altezza di risalita del calcestruzzo per azione della sola forza di gravità.

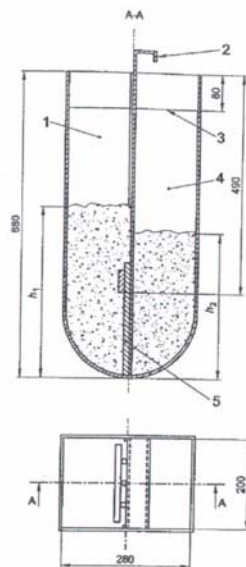


Fig. 1.14 - Dispositivo per effettuare il test U-box

1.2.7 Normativa

La norma italiana riguardante il Calcestruzzo Autocompattante è la UNI 11040, elaborata dall'UNICEMENTO e risale al marzo 2003.

E' complementare alla UNI EN 206-1 e riguarda la definizione, le caratteristiche, i materiali, la formulazione, la produzione ed il controllo della qualità del calcestruzzo autocompattante destinato alle costruzioni.

Ai fini della presente norma abbiamo la seguente definizione:

CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE: Calcestruzzo omogeneo che viene messo in opera e compattato senza intervento di mezzi esterni (vibrazione) ma per effetto della sola forza gravitazionale.

Il calcestruzzo autocompattante, oltre a soddisfare i requisiti di classe di resistenza e di esposizione definiti dalla UNI EN 206-1, ha la specifica proprietà, allo stato fresco, di un'elevata fluidità con assenza di segregazione.

Nella presente norma vengono definiti i requisiti prestazionali dei calcestruzzi autocompattanti (tab. 1.2).

| Caratteristica | Intervallo di Accettazione | Metodo di prova |
|---|--|-----------------|
| Fluidità | > 600 mm | UNI 11041 |
| Tempo di Spandimento(per raggiungere il diametro di 500 mm) | ≤ 12 secondi | UNI 11041 |
| Deformabilità (tempo di efflusso dall'imbuto a V) | (4 – 12) secondi | UNI 11042 |
| Scorrimento confinato (attraverso l'anello a J) | Diametro ≤ 50 mm rispetto allo scorrimento senza anello | UNI 11045 |
| Scorrimento confinato (scatola ad L) | $H_2 / H_1 > 0,80$ | UNI 11043 |
| Scorrimento confinato (scatola ad U) | $H \leq 30$ mm | UNI 11044 |
| Stabilità alla sedimentazione (imbuto a V dopo 5 minuti) | Valore iniziale + 3 secondi | UNI 11042 |

Tab. 1.2 - Caratteristiche dei calcestruzzi autocompattanti allo stato fresco e relativi valori di accettazione

I calcestruzzi autocompattanti si differenziano dai calcestruzzi ordinari per le seguenti proprietà allo stato fresco:

- Scorrimento libero in assenza di vincoli: fluidità;
- Scorrimento confinato, capacità di attraversare gli ostacoli;
- Resistenza alla segregazione ed alla sedimentazione.

Per *fluidità* si intende la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco di deformarsi liberamente, ed è valutabile indirettamente in termini di spandimento, mediante prova di cedimento al cono.

Per *capacità di riempimento* (scorrimento senza vincoli) si intende la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco a scorrere senza segregare sotto l'azione del solo peso proprio.

Per *capacità di passare attraverso gli ostacoli* (scorrimento confinato o deformabilità) si intende la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco di cambiare forma e passare attraverso le armature o gli ostacoli e riempire gli spazi disponibili senza

segregazione e senza bloccaggio; è valutabile sperimentalmente mediante la prova con la scatola ad L, con la scatola ad U o con l'anello a J.

Per *resistenza alla segregazione* si intende la capacità del calcestruzzo autocompattante fresco di mantenere la sua composizione omogenea ed invariante sia in movimento sia in riposo durante il trasporto e la messa in opera; è valutata visivamente nel corso della prova di spandimento analizzando che:

- le particelle di aggregato grosso non siano concentrate al centro, ma distribuite uniformemente entro l'area di spandimento del calcestruzzo;
- non si noti presenza d'acqua o eccesso di pasta al bordo del calcestruzzo;

Si può valutare anche tramite la prova del V-Funnel.

La normativa dà anche la definizione di finissimo, l'elemento peculiare nella realizzazione dei calcestruzzi autocompattanti: si definisce *finissimo* un materiale minerale (somma di cemento, filler, aggiunte e finissimi dell'aggregato) passante allo staccio da 0,125 mm.

1.3 Calcestruzzi con aggregati riciclati

1.3.1 Premessa

Le ultime norme europee hanno previsto per i diversi tipi di impiego degli aggregati, cioè calcestruzzi, malte, conglomerati bituminosi, miscele stradali legate e non legate, massicciate ferroviarie e pietrame per scogliere, i parametri che devono essere indagati, e di conseguenza inclusi nella dichiarazione di conformità, se compresi nelle norme tecniche di settore nazionali. Da un utilizzo fai-da-te, mal regolato e ricco di soggettive interpretazioni delle scarse norme in materia, si sta passando ad uno posato su una base tecnica di elevato livello che costringe i produttori, ma anche i progettisti e gli utilizzatori a compiere un salto di qualità nella propria attività professionale.

È necessario oggi conoscere le principali caratteristiche dell'aggregato, che si noti bene non viene più distinto in base alla sua origine (sia essa naturale, riciclata o artificiale), perché da esse dipendono le prestazioni che devono essere richieste dal progettista e garantite dal produttore.

Al produttore viene richiesto di passare da una fase artigianale ad una industriale dotata di un sistema di gestione e di un controllo della produzione.

Le tecnologie impiegate per la produzione degli aggregati riciclati dovranno anch'esse essere riconsiderate. Il processo di frantumazione, vagliatura e selezione utilizzato fino a ieri in molti casi dovrà essere abbandonato o pesantemente integrato per poter garantire le prestazioni che vengono richieste oggi dalle nuove norme europee.

Al fine di studiare le potenzialità di impiego come aggregato del calcestruzzo riciclato e di definire le caratteristiche prestazionali nel 1976 la RILEM (Réunion Internazionale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Coustructions et Ouvrages) istituì un gruppo di studio che produsse un primo rapporto nel 1993 sullo stato dell'arte per il confezionamento di nuovi conglomerati con aggregati riciclati da demolizioni strutturali (RILEM TC 121, 1993).

In Europa le norme Olandesi e quelle Danesi sembrano orientate a consentire l'impiego degli aggregati riciclati anche per confezionamento di calcestruzzi destinati a strutture armate e precomprese. Altri paesi, quali la Russia e la Gran Bretagna, ritengono la ricerca e la sperimentazione in questo settore ancora non sufficientemente approfondite, e limitano pertanto l'utilizzo degli aggregati riciclati solo alla produzione di calcestruzzi per pavimentazioni stradali e industriali o per opere di sottofondazione e rivestimento non particolarmente impegnative dal punto di vista statico.

In Italia attualmente si registra l'impiego di calcestruzzo riciclato esclusivamente per la realizzazione di sottofondi per pavimentazioni stradali e industriali, anche se il Decreto del 14 Settembre 2005 attesta quanto segue:

*“Sono idonei alla produzione di conglomerato cementizio gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, ovvero provenienti da processo di riciclo conformi alla parte ammortizzata della norma europea **UNI EN 12620**”.*

Il sistema di attestazione della conformità degli aggregati, ai sensi del DPR 246/93 è indicato nella seguente tabella 1.3:

| Specifiche Tecniche Europee di riferimento | Uso previsto | Sistema di Attestazione della Conformità |
|---|------------------------|---|
| Aggregati per calcestruzzo UNI EN 12620-13055 | Calcestruzzo Struttur. | 2+ |
| | Uso non Strutturale | 4 |

Tab. 1.3 - Conformità degli aggregati secondo il DPR 246/93

Il sistema 2+ (certificazione di controllo di produzione in fabbrica) è quello specificato all'art. 7, comma 1 lettera B, Procedura 1 del DPR n° 246/93, comprensiva della

sorveglianza, giudizio ed approvazione permanenti del controllo di produzione in fabbrica.

Il sistema 4 (autodichiarazione del produttore) è quello specificato all'art. 7, comma 1 lettera B, Procedura 3, del DPR n°. 246/93.

E' consentito l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti di cui alla tabella 1.4, a condizione che la miscela di conglomerato cementizio confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente qualificata e documentata attraverso idonee prove di laboratorio.

| Origine del materiale da riciclo | Rck del calcestruzzo (N/mm²) | Percentuale di impiego |
|---|--|-------------------------------|
| Demolizioni di edifici (macerie) | <15 | fino al 100% |
| Demolizione del solo calcestruzzo e c.a. | ≤35 | ≤30% |
| | ≤25 | fino al 60% |
| Riutilizzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati | ≤55 | fino al 5% |

Tab. 1.4 - Materiali da riciclo

Per tali aggregati, le prove di controllo di produzione in fabbrica di cui ai prospetti H1, H2 e H3 dell'annesso ZA della norma europea UNI EN 12620, per le parti rilevanti, devono essere effettuate ogni 100 tonnellate di aggregato prodotto e, comunque, negli impianti da riciclo, per ogni giorno di produzione.

Il progettista, nelle proprie prescrizioni, potrà fare utile riferimento alla norma UNI 8520 parti 1 e 2 al fine di individuare i requisiti chimico-fisico, aggiuntivi rispetto a quelli fissati per gli aggregati naturali, che gli aggregati riciclati devono rispettare, in funzione della destinazione finale del calcestruzzo e delle sue proprietà prestazionali (meccaniche, di durabilità e pericolosità ambientale, etc.), nonché quantità percentuali massime di impiego per gli aggregati da riciclo, o classi di resistenza del calcestruzzo, ridotte rispetto a quanto previsto nella tabella sopra esposta. Una situazione analoga a quella italiana si rileva in Germania.

Anche il Giappone ha emanato una specifica legislazione per l'impiego degli aggregati riciclati. L'associazione dei costruttori giapponesi ha definito con precisione i requisiti fisico - meccanici ed il contenuto massimo di sostanze pericolose (gesso, argilla, materiale plastico, bitume, ecc.) per l'aggregato riciclato. Inoltre, la normativa giapponese ha proposto l'impiego differenziato degli aggregati riciclati.

1.3.2 Proprietà degli aggregati riciclati.

1.3.2.1 Massa volumica

La massa volumica degli aggregati dipende dalla porosità aperta o chiusa che caratterizzano il materiale. A seguito del processo di frantumazione, l'aggregato riciclato si presenta in forma di elementi lapidei (granuli di sabbia o di pietrisco) avvolti da uno strato più o meno spesso di malta di cemento (fig 1.15). Essendo la porosità della malta di cemento maggiore di quella degli elementi lapidei naturali, ne consegue che la massa volumica dell'aggregato riciclato risulta, nella totalità dei casi, sempre inferiore a quella dell'aggregato naturale. La tabella 1.5 mostra i valori massimi e minimi registrati per aggregati riciclati grossi e fini (questi ultimi con granuli di dimensioni inferiori a 4 mm). Come si può notare la riduzione di massa volumica, rispetto a quella dell'aggregato naturale, è più marcata per gli aggregati fini riciclati che non per quelli grossi a causa di una maggiore percentuale di pasta di cemento che avvolge il materiale fine di riciclato rispetto all'aggregato grosso riciclato.



Fig. 1.15 - Confronto visivo tra aggregati naturali (a sinistra) e riciclati (a destra).

| Aggregato | Massa Volumica s.s.a. (kg/m ³) |
|------------------|---|
| Grosso riciclato | 2300-2500 |
| Fine riciclato | 2150-2350 |
| Naturale | 2600-2700 |

Tab. 1.5 - Massa volumica s.s.a. (satura a superficie asciutta) per aggregati naturali e riciclati grossi e fini

1.3.2.2 Assorbimento dell'acqua

La presenza della malta aderente agli elementi lapidei naturali determina per gli aggregati riciclati un assorbimento dell'acqua di gran lunga superiore rispetto a quello degli

aggregati naturali. L'assorbimento dell'aggregato grosso riciclato, infatti, varia tra il 4 e il 9% circa per pezzatura compresa tra 4 e 32 mm e sembra essere indipendente dalla qualità del calcestruzzo di origine; per l'aggregato naturale, invece, i valori di assorbimento si attestano tra 0.5 e 2.5%. L'assorbimento degli aggregati fini riciclati, può raggiungere valori dell'ordine del 12% per la maggior porosità che contraddistingue le frazioni più piccole degli aggregati riciclati. L'assorbimento di acqua è tanto maggiore quanto minore è la massa volumica dell'aggregato riciclato fig. 1.16.

Gli elevati assorbimenti d'acqua registrati per gli aggregati riciclati impediscono un corretto controllo dell'acqua d'impasto e del rapporto a/c durante il confezionamento del calcestruzzo. A causa degli elevati valori di assorbimento, infatti, gli aggregati riciclati necessitano di tempi lunghi per portarsi in condizione satura a superficie asciutta (s.s.a.). La velocità di assorbimento dell'acqua degli aggregati, inoltre, varia sensibilmente da un tipo all'altro soprattutto nei primi minuti che seguono la miscelazione dell'impasto. Questa situazione rende estremamente difficoltoso il controllo della lavorabilità, dell'effettivo rapporto a/c, e quindi dalla qualità del calcestruzzo. Oltre al difficile controllo iniziale dell'acqua d'impasto, l'assorbimento elevato di acqua dell'aggregato riciclato può determinare un'eccessiva perdita di lavorabilità del calcestruzzo durante il trasporto e soprattutto sotto la pressione esercitata sul conglomerato durante il pompaggio. Se si vogliono evitare questi inconvenienti è indispensabile provvedere ad una pre-saturazione degli aggregati mediante bagnatura. Dopo la bagnatura è opportuno lasciare drenare l'acqua in eccesso per 2-3 ore prima del confezionamento del calcestruzzo.

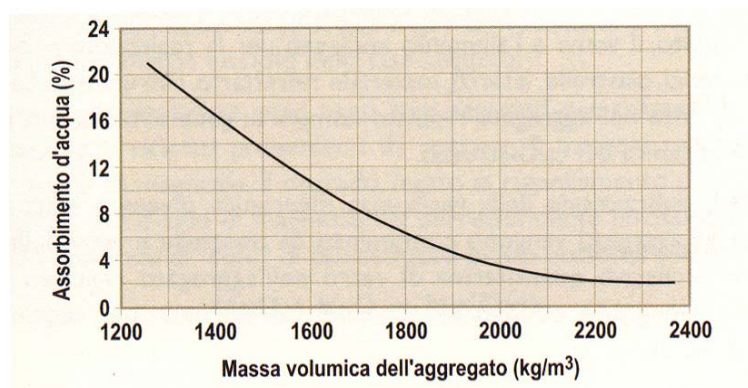


Fig. 1.16 - Assorbimento d'acqua in funzione della massa volumica dell'aggregato riciclato.

1.3.2.3 Sostanze non desiderabili

Un problema molto importante nella produzione degli aggregati riciclati riguarda la decontaminazione da sostanze pericolose presenti nelle macerie che possono risultare deleterie per la durabilità del calcestruzzo confezionato con gli aggregati riciclati. Queste sostanze non desiderabili appartengono anch'esse ai materiali da costruzione che, assieme al calcestruzzo, vengono impiegati per il completamento del manufatto e per la realizzazione delle finiture. Queste sostanze includono le malte di calce e gesso impiegate come intonaco o come giunti tra i mattoni, l'asfalto, il vetro e l'alluminio impiegati per la realizzazione degli infissi, materiali organici, piastrelle, laterizi, materiale refrattario, cloruri, ecc.. La presenza di queste sostanze nell'aggregato riciclato comporta generalmente una perdita di resistenza meccanica del calcestruzzo. Nessuna penalizzazione della resistenza meccanica, invece è stata registrata allorché gli aggregati vengono contaminati da piastrelle e vetri delle finestre. Tuttavia, un eccessivo quantitativo di vetro nell'aggregato riciclato potrebbe determinare il degrado a lungo termine del calcestruzzo per reazione alcali-aggregato. La presenza del bitume nell'aggregato riciclato può penalizzare fortemente la resistenza meccanica del nuovo calcestruzzo. Alcune sostanze organiche, come il legno per esempio, se presenti negli aggregati riciclati, possono rallentare il processo di idratazione del cemento oppure accentuare il problema dell'instabilità dimensionale del calcestruzzo sottoposto a cicli alternati di asciutto/bagnato. Altre sostanze organiche, come ad esempio le vernici, possono favorire l'inglobamento di eccessivi quantitativi di aria nel calcestruzzo con la conseguenza di penalizzare fortemente le prestazioni meccaniche del conglomerato. Per questo motivo è opportuno limitare la presenza di sostanze organiche negli aggregati riciclati a valori esigui e comunque non superiori all'1%.

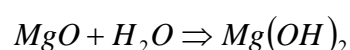
La presenza di terreno vegetale e di frazioni argillose finissime è indesiderabile per gli aggregati riciclati al pari di quanto avviene per gli elementi lapidei naturali: le sostanze limo-argillose, infatti, possono ridurre notevolmente l'aderenza della matrice cementizia alla superficie dell'aggregato determinando penalizzazioni sulla resistenza meccanica a compressione del conglomerato.

I solfati degli inerti sono sostanze notoriamente pericolose per il calcestruzzo in quanto essi possono reagire con gli alluminati idrati prodotti dall'idratazione del cemento determinando espansioni distruttive per il conglomerato associate alla formazione di

ettringite e thaumasite. Per questo motivo il contenuto di solfato negli elementi lapidei naturali destinati al confezionamento del calcestruzzo viene limitato allo 0.2% (come SO₃) rispetto alla massa dell'aggregato; questo limite al tenore di solfato dovrebbe essere ovviamente esteso agli aggregati provenienti dal calcestruzzo riciclato, anche se esistono alcune proposte di portare ad 1% il tenore di solfati con questi aggregati.

Un eccesso di cloruri nell'aggregato riciclato può innescare la corrosione delle armature annegate nel conglomerato confezionato con questi inerti. Essendo i cloruri sali molto solubili, essi dopo la miscelazione degli aggregati si trovano immediatamente disciolti nella fase acquosa.

Problemi particolarmente gravi sono stati segnalati per calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati provenienti da rottami di mattoni refrattari ad alto tenore di ossido di magnesio. Il degrado, legato al rigonfiamento per effetto della trasformazione dell'ossido di magnesio nel corrispondente idrossido, si manifesta in forma di espulsione di "coni" di calcestruzzo molto profondi (oltre 30 cm).



Per comodità di lettura nella tabella 1.6 vengono riassunti i suggerimenti proposti dalla RILEM relativamente alle caratteristiche degli aggregati grossi riciclati da destinare al confezionamento del calcestruzzo. Gli aggregati vengono classificati in tre tipi (I, II e III) il cui pregio aumenta dal Tipo I al Tipo III.

| Requisiti obbligatori | Aggregato grosso | | |
|--|------------------|---------|----------|
| | Tipo I | Tipo II | Tipo III |
| Massa volumica delle particelle asciutte (kg/m ³) | > 1500 | > 2000 | > 2400 |
| Assorbimento d'acqua (%) | < 20 | < 10 | < 3 |
| Materiale con massa volumica s.s.a. < 2200 kg/m ³ (%) | — | < 10 | < 10 |
| Materiale con massa volumica s.s.a. < 1800 kg/m ³ (%) | < 10 | < 1 | < 1 |
| Materiale con massa volumica s.s.a. < 1000 kg/m ³ (%) | < 1 | < 0,5 | < 0,5 |
| Contenuto di materiali estranei: vetro, bitume, ecc. (%) | < 5 | < 1 | < 1 |
| Contenuto di metalli (%) | < 1 | < 1 | < 1 |
| Contenuto di materiale organico (%) | < 1 | < 1,5 | < 0,5 |
| Contenuto di filler (%) < 0,063 mm | < 3 | < 2 | < 2 |
| Contenuto di sabbia (%) < 4 mm | < 5 | < 5 | < 5 |
| Contenuto di solfato: SO ₃ (%) | < 1 | < 1 | < 1 |

Tab. 1.6- Raccomandazione per gli aggregati grossi riciclati da impiegare per il confezionamento del calcestruzzo (RILEM: "Specification concrete with recycled aggregate", TC 121,1993)

1.3.3 Il calcestruzzo allo stato fresco

La presenza della malta originale che avvolge gli elementi lapidei dell'aggregato riciclato, come anche la presenza di granuli di cemento parzialmente idratati e la tessitura ruvida della superficie del materiale riciclato, determinano una maggiore richiesta d'acqua per confezionare un calcestruzzo con aggregato riciclato di pari consistenza rispetto ad un conglomerato confezionato con elementi lapidei naturali di pari granulometria. L'aumento dell'acqua di impasto si attesta mediamente intorno al 5% per calcestruzzi confezionati con solo aggregato grosso riciclato un maggior incremento (circa 15%), si registra quando il conglomerato viene confezionato con aggregati grossi e fini (sabbie) entrambi riciclati.

1.3.4 Il calcestruzzo allo stato indurito.

A causa della maggior porosità, della minore massa volumica e, quindi, di una minore resistenza meccanica degli aggregati riciclati rispetto agli elementi lapidei naturali, le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi con aggregati riciclati risultano sempre più basse rispetto a quelle dei conglomerati tradizionali. Inoltre, a causa di una minore rigidità dell'aggregato riciclato, i calcestruzzi confezionati con questo materiale posseggono un più basso modulo di elasticità rispetto ai calcestruzzi con aggregati naturali. La diminuzione di rigidità dell'aggregato riciclato rispetto a quello naturale è anche responsabile di una minore stabilità dimensionale del calcestruzzo con soli aggregati lapidei naturali, sia in assenza di carico (ritiro idrometrico) che in presenza di carichi costanti agenti su una determinata struttura (deformazione viscosa). Il ritiro dei calcestruzzi con solo aggregati grossi riciclati risulta mediamente superiore di circa il 50% rispetto a quello registrato per i conglomerati naturali. Valori notevolmente maggiori si registrano, invece, per calcestruzzi confezionati sia con sabbia che con aggregato grosso riciclato. Per quanto attiene alla deformazione viscosa i valori registrati per i calcestruzzi con soli aggregati grossi riciclati risultano maggiori di quelli del calcestruzzo naturale del 25-50%. Nel calcestruzzo riciclato la permeabilità del conglomerato oltre a dipendere dal rapporto a/c è influenzata anche dalla qualità e dalla quantità di pasta di cemento presente nell'aggregato riciclato. Poiché la permeabilità della pasta di cemento è superiore a quella dell'aggregato lapideo, in linea di massima ci

si deve attendere per il calcestruzzo riciclato una permeabilità maggiore del corrispondente calcestruzzo di pari a/c confezionato con soli aggregati naturali.

La resistenza al gelo dei calcestruzzi riciclati dipende fortemente dalla percentuale di sabbia riciclata presente nell'impasto. Qualora si debba confezionare calcestruzzi resistenti al gelo, occorre porre una particolare cura ed attenzione nella scelta dell'aggregato riciclato che deve essere privo della frazione passante a 4 mm

1.3.5 Campi d'utilizzo dei materiali riciclati.

I materiali di riciclo dell'edilizia opportunamente trattati possono trovare un largo campo d'impiego dalle costruzioni stradali, ferroviarie ed aeroportuali, alle costruzioni civili (magroni e calcestruzzi armati e non) e della prefabbricazione (elementi strutturali e d'arredo stradale od ambientale). Per ognuno di questi impieghi occorrerà garantire determinati requisiti, proprio a garanzia di ciò sono stati fatti numerosi studi sulla caratterizzazione dei materiali in uscita dagli impianti di frantumazione e sono in atto ricerche sulla possibilità di realizzare calcestruzzi strutturali con aggregati da costruzione e demolizione.

1.3.5.1 Materiale sciolto per rilevati stradali e ferroviari

Nel caso di costruzione di sottofondazioni stradali e ferroviari gli aggregati riciclati sono normalmente utilizzati come aggregati non legati senza particolari trattamenti o correzioni.

Il principale requisito prestazionale che tali aggregati devono soddisfare è quello di garantire che le sollecitazioni prodotte dal passaggio di mezzi ferroviari o stradali non provochino cedimenti tali da compromettere l'integrità e la regolarità della pavimentazione stradale o del binario.

In questi strati si utilizzano generalmente materiali naturali, l'indefornabilità si ottiene mediante un adeguato costipamento dei materiali granulari, infatti, avvicinandosi tra loro gli elementi favoriscono l'ottimale riempimento fra i vuoti, si moltiplicano i punti di contatto e si riduce lo spazio a disposizione per eventuali spostamenti, con migliore e più omogenea ripartizione dei carichi, e una migliore resistenza al taglio.

Poiché tutti i materiali reperibili in natura presentano tali caratteristiche il legislatore ha previsto dei criteri d'accettabilità per questi materiali basati su alcune caratteristiche

intrinseche, composizione granulometrica e mineralogica, sensibilità all'acqua ed al gelo, inoltre è prevista la prova C.B.R.¹ prova di carico con piastra.

La classificazione dei materiali granulari da utilizzarsi per il corpo del rilevato e del sottofondo è quella dell'AASHO-CNR¹³, che si basa su alcune caratteristiche del materiale, limite liquido, granulometria indice di plasticità. Sono reputate idonee le terre appartenenti ai gruppi A1- a, A1- b, A3, A2 - 4, A2 - 5.

La classificazione AASHO-CNR è applicabile a qualsiasi tipo di materiale quindi anche agli scarti dell'edilizia che trovano un'ottima collocazione (gruppi A1 ed A3) in questa classificazione grazie alla loro buona curva granulometrica ed all'assenza di plasticità del fino.

Per il sottofondo va effettuata anche una prova C.B.R. per la verifica delle capacità portanti del materiale a costipamento avvenuto. Da questo punto di vista gli aggregati riciclati hanno mostrato risultati equiparabili se non superiori ai materiali naturali.

Queste prove sono reputate sufficienti, anche a livello internazionale, per la messa in opera del materiale.

Per una maggiore sicurezza può essere condotta una prova aggiuntiva, essa consiste nella ripetizione del costipamento, secondo la procedura normalizzata, per più volte sullo stesso campione, e nella determinazione della curva granulometrica dopo ogni costipamento, da risultati sperimentali si è potuto vedere che mentre la curva granulometrica tende ad una progressiva attenuazione il CBR è crescente, a conferma di un assortimento granulometrico sempre più adatto ad avere qualità portanti. La messa in opera del materiale va effettuata cercando di ottenere la massima compattezza. A tal proposito si deve controllare che il grado di costipamento (rapporto percentuale tra la massa volumica del secco in opera e la massa volumica del secco massima ottenuta con la prova AASHO modificata) sia a seconda della posizione dello strato, superiore al minimo prescritto dal capitolato (dal 90 al 95% man mano che si avvicina al sottofondo, e fino al 98% per il supercompattato dei rilevati ferroviari).

¹CBR (California Bearing Ratio) – E' il più noto e diffuso dei metodi di misura della portanza; consiste nel misurare la pressione massima da esercitare sul piano in esame per fare affondare di 2,5 mm in 2 min. un pistone cilindrico di 20 cm² e nel rapportare questa pressione al valore di 70 kg/cm² che è quella relativa alla stessa prova del materiale "campione" (graniglia e pietrischetto ≤ 20 mm). La prova non può essere effettuata se il materiale in esame ha particelle maggiori di 25 mm, come specificato nella norma italiana CNR UNI 10009. In genere si richiede che il campione da esaminare sia preventivamente saturato d'acqua. Per sottofondi discreti il valore CBR è circa pari a 10.

¹³ Classificazione delle terre AASHO, UNI 10006

I materiali di scarto edilizio, grazie al loro assortimento granulometrico ed all'insensibilità all'acqua della parte fina, hanno un comportamento ottimo per questo tipo d'impiego.

1.3.5.2 Misto per strato di fondazione

Per lo strato di fondazione stradale, che assolve funzioni più gravose rispetto agli altri strati, poiché si trova ad una distanza più ravvicinata rispetto al punto di applicazione dei carichi, vengono adottati criteri di selezione più rigidi.

Questo strato, infatti, deve fornire un appoggio stabile, rigido e indeformabile agli strati superiori, nonché impedire la risalita capillare dell'acqua. Riguardo al sottofondo deve garantire buon drenaggio e aerazione, in periodi di gelo deve assolvere la funzione coibente. Per quanto riguarda i materiali di scarto edilizio molto spesso soddisfano i requisiti richiesti per assolvere la funzione di strato di fondazione stradale. Vediamo nello specifico quali sono le caratteristiche necessarie per soddisfare la selezione:

- *Granulometria e classificazione secondo AASHO-CNR*

I risultati ottenuti dalle analisi granulometriche dei campioni di “macerie” e “calcestruzzi”, nelle diverse pezzature 0/30, 0/70, 0/140, dimostrano che trattasi di materiali dotati di buona continuità dimensionale. E' interessante, inoltre notare, come i prodotti derivanti da aggregati riciclati si situino all'interno o nell'immediata prossimità dei fusi granulometrici previsti dai capitolati per strati di fondazione stradale, il che consente di poterli utilizzare così come escono dall'impianto di trattamento senza ulteriori correzioni.

- *Frantumabilità*

La frantumabilità è una caratteristica intrinseca degli elementi lapidei, per quanto riguarda gli aggregati derivanti da C&D quest'elemento diviene di rilevanza fondamentale per la variabilità del materiale costituente.

La prova Los Angeles è volta ad analizzare la maggiore consistenza degli elementi (la parte più dura) dando per scontate le perdite dovute all'asportazione della malta meno resistente. Il materiale proveniente da alcune regioni (Emilia, Lombardia) ha mostrato valori della prova Los Angeles accettabili, minore di 30 per le “macerie” e intorno a 23 per i “calcestruzzi”; in altre regioni i materiali possono essere più friabili in relazione agli usi costruttivi.

- *Forma*

Per gli aggregati lapidei, si preferiscono grani di forma poliedrica che rispondono a criteri di regolarità e buona resistenza. La norma CNR 95/1984 costituisce un valido punto di riferimento per la determinazione degli indici di forma e appiattimento.

Da essa si evince che sia i calcestruzzi che le macerie sono nei limiti d'accettabilità.

- *Prove di caratterizzazione comportamentale*

Le prove di costipamento effettuate sul passante al crivello da 25mm sia delle “macerie” sia dei “calcestruzzi” hanno fornito valori che consentono di dedurre che non esistono problemi di messa in opera del materiale. Inoltre è da sottolineare che una volta costipato il materiale è caratterizzato da un'elevata portanza C.B.R.

1.3.5.3 Altri usi in via di sperimentazione

- *Misti cementati e calcestruzzi a bassa resistenza*

Un primo studio sperimentale rivolto a valutare la possibilità di impiego del materiale da riciclo nei misti cementati ha permesso di evidenziare che con modeste percentuali di cemento (dai 50 ai 100 kg/m³) possono facilmente ottenersi resistenze a compressione a 7 giorni comprese tra 40 e 70 daN/cm², con inerti provenienti da calcestruzzi, e tra 35 e 50 daN/cm² con le macerie. Anche i valori di resistenza a trazione a 7 giorni sono risultati accettabili rispetto ai minimi richiesti dal Capitolato ANAS. Nel corso delle prove relative all'impiego nei magroni e nei calcestruzzi di bassa resistenza, il lavaggio preventivo del materiale al setaccio 0.075 mm ed una particolare cura posta nella temporizzazione dell'aggiunta di acqua hanno però permesso di raggiungere resistenze anche superiori a 250 daN/cm², con il dosaggio ordinario di 250 kg/m³.

Per contro, la lavorabilità è risultata essere un fattore critico, così penalizzante da rendere problematico un impiego nella pratica costruttiva dei calcestruzzi armati.

Si è proceduto pertanto all'esame ed alla selezione di additivi capaci di migliorare, per un tempo sufficiente, la lavorabilità, garantendo anche una buona resistenza meccanica finale.

- *Misti bitumati*

I misti granulari impiegati nelle stabilizzazioni a bitume sono ordinariamente poveri di fino, in modo da non richiedere eccessive ed antieconomiche quantità di legante idrocarburico. Pertanto, nell'impiego del materiale riciclato in misti bitumati é opportuno effettuare fin dall'inizio, all'impianto, prelievi carenti della frazione fina.

Conseguentemente, entrambi i materiali, macerie e calcestruzzo, vengono prelevati da cumuli caratterizzati da una composizione granulometrica costituita prevalentemente dalla frazione tra 5 e 40 mm.

In ambedue i materiali, il passante a 0.075 mm risulta presente in quantità superiore al massimo valore indicato dalla norma italiana (1%), ma occorre precisare che tale "fino" non é costituito da limo o argilla, bensì, trattasi di filler costituito dalla polvere del frantoio, e come tale, non é assoggettato a limitazioni, secondo quanto esplicitamente indicato dalla stessa norma CNR.

Il suo dosaggio opportuno può comunque essere calibrato da una semplice riduzione della frazione di minori dimensioni: così come l'eccedenza della dimensione massima dei grani, per le "macerie", può risolversi semplicemente con una vagliatura.

CAPITOLO 2

MATERIALI E PER I CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI (HPC), AUTOCOMPATTANTI (SCC) E PER I CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI

2.1 Premessa

I calcestruzzi ad alte prestazioni sono caratterizzati da basso rapporto in peso acqua/legante (a/l), da alto dosaggio di legante, dall'impiego di aggiunte minerali attive (silica fume, ceneri volanti, loppa granulata d'altoforno macinata, argille calcinate, quali il metacaolino, e pozzolane naturali) e di additivi chimici superfluidificanti, spesso combinati con ritardanti.

| Calcestruzzo con $f_c > 80$ MPa a 28 gg. di maturazione | | | |
|---|--|--|--|
| | Azione | Effetto | Caratteristiche microstrutturali |
| Superfluidificante | Efficace disperdente del cemento e della microsilice | riduzione del rapporto a/c ($\leq 0,35$) | <ul style="list-style-type: none"> eliminazione porosità capillare minore quantità di prodotti idrati alto volume di nuclei anidri di cemento minori difetti nella zona di transizione aggregato-matrice legante |
| Microsilice | Microfiller | <ul style="list-style-type: none"> riduzione effetto parete riduzione essudazione interna ed esterna | <ul style="list-style-type: none"> scomparsa pressoché totale della zona di transizione aumento porosità nanometrica |
| | Reattività con l'idrossido di calcio | <ul style="list-style-type: none"> riduzione della quantità e grandezza dei cristalli di idrossido di calcio aumento del grado di addensamento | <ul style="list-style-type: none"> omogeneità strutturale grande compattezza |

Fig. 2.1 - Aggiunte ed Additivi tipici di un calcestruzzo ad Alta Resistenza

Il dosaggio del legante varia da 400 a 550 Kg/m³ e rappresenta il totale del cemento Portland più le aggiunte minerali attive. Il rapporto a/l è generalmente nell'intervallo 0,25 – 0,35 ma sono stati prodotti impasti con rapporto inferiore a 0,25; spesso al rapporto a/l si abbina quello fra acqua e cemento Portland, a/c .

Affinché ai bassi valori del rapporto a/l il legante possa essere omogeneamente disperso nell'impasto, è indispensabile l'uso di un efficace superfluidificante. Inoltre, quando l'abbassamento al cono dell'impasto fresco (slump, indice della lavorabilità) decade così velocemente da compromettere la regolarità delle operazioni di trasporto e posa in opera, il problema è di frequente risolto con l'impiego di ritardanti e programmando i tempi di aggiunta degli additivi.

Poiché non è ancora possibile basare la progettazione degli impasti sulle caratteristiche dei materiali componenti, ne sono del tutto accettabili le regole seguite nella progettazione degli impasti di calcestruzzo a resistenza normale, i materiali e i rapporti di composizione per il calcestruzzo ad alte prestazioni sono scelti sulla base di prove di laboratorio.

Lo studio degli impasti di prova per la determinazione dei rapporti ottimali richiede lavoro sperimentale. Nella scelta dei materiali localmente disponibili (cemento, aggregato, aggiunte minerali, additivi) l'obiettivo è la ricerca dei componenti che manifestino il massimo della compatibilità.

Tale compatibilità può essere valutata attraverso la "resa" di resistenza meccanica a compressione (cioè la resistenza per unità di peso cemento - o di legante - ad una assegnata stagionatura), e/o in termini di slump, e di mantenimento di un dato livello di slump per un prefissato periodo di tempo.

La compatibilità tra i componenti dell'impasto non è garantita solo dalla rispondenza alle norme di accettazione, essendo questa condizione necessaria ma non sufficiente perché la resa di resistenza per kg di cemento (o di legante) risulti ottimale o perché la lavorabilità desiderata possa essere ottenuta e mantenuta per il tempo prefissato.

Individuati, quindi, i materiali ed i rapporti ottimali di composizione, occorre accertare che i risultati di laboratorio possano essere riprodotti nella particolare situazione di cantiere, e soltanto dopo che tutte le procedure siano state definite si compila il dettaglio del piano di assicurazione della qualità.

Si può pertanto dire che mentre le proprietà del calcestruzzo normale sono influenzate solo da quelle della malta, nel calcestruzzo ad alte prestazioni giocano ruoli importanti sia la malta che l'aggregato: la resistenza a compressione aumenta al diminuire del rapporto a/c fino a quando la resistenza allo schiacciamento dell'aggregato non diventi l'anello debole del sistema.

A questo punto per aumentare ulteriormente la resistenza a compressione attraverso la diminuzione del rapporto a/c occorre cambiare aggregato ed usarne uno più resistente.

Segue nei prossimi paragrafi un approfondito esame dei materiali che si utilizzano per la produzione dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

I calcestruzzi autocompattanti rappresentano una categoria di conglomerati che non necessita, durante la posa in opera, di alcuna forma di compattazione o vibrazione in quanto sono in grado di riempire completamente la cassaforma, consentendo nel contempo una efficace espulsione dell'aria intrappolata in eccesso rispetto a quella fisiologica e, quindi, capaci di garantire valori della resistenza in opera sostanzialmente coincidenti con quelli conseguibili sui provini prelevati a "bocca di betoniera" e compattati a "rifiuto". Da questo punto di vista, quindi, i calcestruzzi autocompattanti possono ritenersi una naturale evoluzione di quelli superfluidi (classe di consistenza S5) e sono stati sviluppati per esasperare la possibilità di rendere la qualità del conglomerato in opera sostanzialmente indipendente dalle operazioni di posa e compattazione oltre che per accelerare le operazioni di betonaggio per la realizzazione di strutture in cui siano rilevanti i volumi di calcestruzzo impiegati. Il presente articolo è dedicato all'esame delle proprietà reologiche e meccaniche di questi conglomerati e alle possibilità che essi offrono di modificare anche le tradizionali tecniche di realizzazione delle strutture in c.a. e c.a.p. Per la produzione di un calcestruzzo autocompattante, tuttavia, è necessario associare all'utilizzo degli additivi sopramenzionati un corretto proporzionamento degli ingredienti del calcestruzzo. A questo proposito il conglomerato dal punto di vista reologico può essere schematizzato come un sistema costituito da due fasi di cui una la pasta (acqua, cemento e polveri finissime di dimensioni inferiori a 0.125 mm) costituisce il fluido trasportatore; l'altra, invece, costituita dagli aggregati lapidei, rappresenta la fase trasportata. Pertanto, la reale 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/m³ circa. Un volume così rilevante di materiale finissimo non può essere ottenuto ricorrendo all'impiego del solo cemento in quanto occorrerebbero dosaggi di legante di circa 500-600 Kg/m³ improponibili per gli inevitabili rischi di fessurazione dei getti conseguenti sia ai gradienti termici che al ritiro idraulico. Pertanto,

il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti si basa sull'utilizzo combinato di cemento e di materiale finissimo con lenta o pressoché nulla velocità di idratazione quali la cenere volante, il calcare macinato, la loppa d'altoforno e il fumo di silice.

Relativamente a queste aggiunte occorre tener presente che la cenere volante può determinare un incremento della coesione e una riduzione della suscettibilità dell'impasto ad eventuali variazioni di composizione¹. Per contro, eccessivi dosaggi di cenere possono aumentare la viscosità del calcestruzzo e penalizzare, conseguentemente, la capacità di scorrimento del materiale.

I filler calcarei vengono correntemente utilizzati per la produzione del calcestruzzo autocompattante. I requisiti richiesti per queste aggiunte inerti sono squisitamente di tipo granulometrico: essi debbono possedere passante a 0.125 mm di almeno il 70%. Rispetto ad altre aggiunte, le polveri di calcare offrono il vantaggio di una maggiore costanza di qualità in termini di granulometria e, quindi, consentono un più agevole controllo della richiesta d'acqua d'impasto e, conseguentemente, delle proprietà di scorrimento del calcestruzzo. Per contro, rispetto alla cenere volante, conferiscono all'impasto una minore resistenza alla segregazione.

Accanto al requisito relativo al volume di finissimo (160-190 l/m³) è opportuno affiancare un ulteriore provvedimento legato al volume di acqua complessivo nel calcestruzzo il quale deve risultare compreso tra 170 e 210 litri/m³. Il volume di complessivo di pasta, inoltre, deve essere compreso tra 350 e 380 litri/m³ e il rapporto in volume acqua/ finissimo² tra 0.85 e 1.10. Questi provvedimenti finalizzati ad ottimizzare volume e reologia della pasta debbono essere integrati da quelli relativi a limitare il volume dell'aggregato grosso che deve risultare inferiore a 360 l/m³. Inoltre, occorrerà porre delle limitazioni anche al diametro massimo dell'aggregato che dovrà essere scelto in funzione delle caratteristiche di autocompattabilità da conseguire.

Infine per la realizzazione dei calcestruzzi con aggregati di riciclo si utilizzano tutti i componenti di un calcestruzzo tradizionale con l'aggiunta degli aggregati da riciclo in parziale sostituzione degli aggregati tradizionali. I rifiuti da costruzione e demolizione

¹ La cenere volante da questo punto di vista ha effetti simili a quelli derivanti dall'impiego degli additivi modificatori di viscosità. Essa, cioè, consente di evitare (robustezza) che modeste oscillazioni dell'acqua di impasto producano variazioni significative della reologia del calcestruzzo. Le Linee Guida europee a questo proposito richiedono che i calcestruzzi autocompattanti non subiscano variazioni della classe di proprietà reologica per oscillazioni di acqua rispetto al valore nominale di 5-10 litri/m³.

² 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.

provengono essenzialmente dalle operazioni di costruzione e demolizione delle opere edili, dalle infrastrutture stradali e ferroviarie, da attività estrattive, ecc.

Tali rifiuti sono per la maggior parte costituiti da frazioni inerti quali: calcestruzzo, laterizi, ceramiche, terre di scavo, ecc., che posseggono di per sé grandi potenzialità di recupero e riutilizzo, potenzialità che però vengono in larga misura disperse poiché questi rifiuti, per la maggior parte, vengono smaltiti in discarica, se non addirittura abbandonati abusivamente, prodotti in quantità sempre maggiori e tali da non poter essere più smaltiti in maniera tradizionale e quindi necessitano di un intervento mirato a favorire il loro riciclo. Tale fenomeno ha riguardato anche il settore delle costruzioni.

2.2 Cemento

L'esperienza attuale si basa sull'impiego dei cementi Portland tipo I (UNI-EN 197/1), classe di resistenza 52,5 e 42,5, per i calcestruzzi ad alte prestazioni, mentre per i calcestruzzi autocompattanti ed i calcestruzzi realizzati con aggregati da riciclo si utilizzano tutti i tipi di cemento classificati in una delle seguenti classi di resistenza: 32.5, 32.5R; 42.5; 42.5R; 52.5 e 52.5R. secondo la norma UNI-EN 197/1.

Le caratteristiche del cemento determinanti per le proprietà di resistenza meccanica del calcestruzzo indurito sono: il contenuto di silicati, il rapporto in massa tra silicato tricalcico e silicato bicalcico, e la finezza di macinazione.

Il silicato tricalcico si idrata rapidamente liberando una notevole quantità di calore, mentre il silicato bicalcico si idrata più lentamente e di conseguenza il rilascio del calore di idratazione avviene entro un esteso intervallo di tempo. Pertanto i cementi ad alto contenuto di silicato tricalcico permettono un rapido guadagno di resistenza, e ciò provoca, nel caso di elementi strutturali di grande sezione (basso rapporto superficie esposta/volume), una sensibile crescita della temperatura che può raggiungere e superare i 50°C. Al contrario un cemento che contenga sostanziali quantità di silicato bicalcico sviluppa resistenza più lentamente, raggiungendo resistenze finali altrettanto soddisfacenti, ma la punta di temperatura nel corso dell'idratazione risulterà senz'altro inferiore.

Tuttavia, raramente la temperatura massima raggiunta rappresenta un problema, in quanto i calcestruzzi ad alte prestazioni sono caratterizzati da rapporti acqua/cemento

molto bassi, così come negli altri due tipi di calcestruzzo studiati, e quindi la quantità di cemento coinvolta nell'idratazione trova un limite nella poca acqua disponibile.

Di maggiore interesse pratico è invece il gradiente di temperatura tra centro e periferia dell'elemento strutturale, in quanto la superficie del getto è di solito a temperatura molto più bassa.

Si ritiene che il rischio di fessurazione causata da raffreddamento differenziale sia minimo quando il gradiente termico non supera i $20^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Lo sviluppo della resistenza meccanica iniziale è anche favorito dalla finezza di macinazione del cemento, perché all'aumentare della sua superficie specifica aumenta la velocità di reazione con l'acqua.

In generale i cementi Portland della classe 52,5 sono caratterizzati da un alto contenuto di silicato tricalcico e da una maggiore finezza di macinazione; il loro impiego non ha alternativa quando si richiede elevata resistenza meccanica alle stagionature di 1 – 3 giorni.

Per i cementi Portland della classe 42,5, il contenuto in silicati totali e in silicato tricalcico e la finezza di macinazione variano, a seconda della provenienza, entro intervalli meno ristretti rispetto a quanto avviene per i cementi Portland della classe 52,5. Nello studio degli impasti di prova, una fase laboriosa è la scelta dell'abbinamento cemento Portland – superfluidificante in quanto occorre garantire il massimo della compatibilità. Tale proprietà è valutata in base al dosaggio di additivo necessario ad ottenere una data fluidità e a conservarla per un periodo di tempo sufficiente per il corretto svolgimento della posa in opera.

La compatibilità tra cemento Portland e superfluidificante è di interesse per l'economia del calcestruzzo: l'additivo è sì componente indispensabile, ma aumenta i costi effettivi del calcestruzzo.

Il modo di interazione tra cemento ed additivi è piuttosto complesso e non del tutto chiarito. Numerosi sono i parametri chimici e fisici che controllano l'efficacia dell'abbinamento: del cemento sono importanti la velocità di rilascio degli ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} nell'acqua dell'impasto, e la reattività dell'alluminato tricalcico; dell'additivo interessa il grado di attività ed il contenuto di sostanza attiva nel formulato.

La velocità di rilascio degli ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} dipende dalla forma di solfato di calcio contenuto nel cemento e dall'eventuale presenza di solfati alcalini nel clinker.

Quest'ultimi, altamente solubili nell'acqua, si formano durante il processo di cottura del clinker, per reazione tra gli ossidi alcalini e l'anidride solforica derivante dall'ossidazione dello zolfo presente nel combustibile.

La reattività dell'alluminato di calcio C_3A è intesa con riferimento alla formazione del trisolfo-alluminato, e dipende dalla finezza di macinazione e dalla forma cristallina dello stesso alluminato di calcio.

Quando la velocità di rilascio degli ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} non è adeguata alla reattività dell'alluminato, i gruppi solforici del superfluidificante interagiscono con l'alluminato stesso e di conseguenza una parte dell'additivo non è più disponibile per permettere il raggiungimento della lavorabilità desiderata.

L'uso dei cementi Portland a basso contenuto di alluminato o il posticipo in fase d'impasto dell'aggiunta di additivo non risolvono il problema della compatibilità. I cementi Portland del tipo sopra menzionato sono ad alto tenore di fase ferrica e la loro velocità di indurimento non risulta adeguata per un calcestruzzo ad alte prestazioni; ricorrere all'aggiunta dell'additivo (dopo una prima fase di mescolamento) aumenta la probabilità di errore nei dosaggi dell'acqua e dell'additivo, oltre a complicare l'operazione d'impasto.

Nella situazione descritta appare indispensabile che la composizione e la finezza del cemento, così come il suo grado di reattività e il contenuto dell'additivo nel formulato, siano, per quanto possibile, uniformi durante il corso della fornitura.

Recentemente alcuni autori (Mehta ed Aitcin, 1997) hanno ipotizzato l'utilizzo di cementi di miscela a base di loppa d'altoforno al fine di migliorare le prestazioni del conglomerato sia allo stato fresco che indurito, oltre che una produzione di HPC più economici.

Nei calcestruzzi autocompattanti le caratteristiche del cemento che influenzano la reologia del calcestruzzo sono sostanzialmente la finezza e il contenuto di C_3S . Cementi fini e ricchi di C_3S aumentano il limite di scorrimento e la viscosità. Per contro, i cementi di tipo II al calcare e quelli alla loppa d'altoforno e ancor più i cementi d'altoforno sono caratterizzati, a pari classi di resistenza, da una minore coesione, ma anche da una minore viscosità. Pertanto, ai fini del soddisfacimento dei requisiti di autocompattabilità sarà opportuno preferire cementi di alta classe di resistenza e ricchi in clinker quando l'obiettivo è quello di migliorare la resistenza alla segregazione dell'impasto e aumentare

la viscosità del sistema. Per contro, l'impiego di cementi al calcare o d'altoforno può essere previsto se è più importante esaltare le capacità di scorrimento del materiale.

2.3 Acqua

La funzione dell'acqua di impasto è quella di idratare il legante, di bagnare l'inerte in modo da favorire l'aderenza con la pasta legante e di portare la massa alla consistenza voluta così come è richiesto dalle condizioni di trasporto, di getto e di costipamento.

La presenza di impurezze nell'acqua di impasto può causare effetti nocivi quali: variazioni dei tempi di presa, riduzione delle resistenze finali, efflorescenze e macchie superficiali e, non ultima per importanza, corrosione delle armature nelle strutture in calcestruzzo armato.

Si può asserire che la maggior parte delle acque naturali è ritenuta idonea all'utilizzo come acqua di impasto.

Fra tutte le sostanze comunemente presenti nell'acqua, quelle che al disopra di certe concentrazioni possono modificare lo sviluppo delle resistenze meccaniche sono i carbonati, i solfati ed i cloruri; questi ultimi sono importanti anche ai fini della corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo armato.

E' da ritenersi tollerabile una quantità di carbonati e bicarbonati fino a 2000 ppm senza danno eccessivo; gli effetti delle due sostanze sono diversi tra di loro e per differenti tipi di clinker, nel caso dei carbonati si può avere, a seconda delle quantità, azione accelerante o ritardante sull'indurimento. È buona norma effettuare una prova di resistenza meccanica e la misura del tempo di presa quando nell'acqua di impasto il contenuto di una delle due sostanze superi i 1000 ppm.

I solfati ed i cloruri possono essere tollerati in quantità eccezionalmente elevata senza che le resistenze meccaniche debbano risentirne; il cloruro sodico non ha influenza sino a concentrazioni del 2,0% mentre ne ha molto poca in concentrazioni del 5%.

Dai dati della letteratura si desume che, ai fini della resistenza meccanica, si può ritenere idonea un'acqua nella quale la concentrazione globale dei cloruri e dei solfati sia pari a 10.000 ppm cioè 1% in peso.

La presenza di solidi sospesi può aumentare in modo indesiderabile il tempo di presa del calcestruzzo, e un'acqua che abbia una torbidità superiore a 2000 ppm dovrebbe esser lasciata decantare in apposite vasche prima dell'uso.

Nei calcestruzzi autocompattanti L'influenza del rapporto a/c sulle proprietà del calcestruzzo fresco sono identiche a quelle esercitate dalla finezza e dal contenuto di cemento: diminuendo il rapporto a/c aumenta la coesione e anche la viscosità plastica. Da questo si intuisce che per soddisfare le esigenze di autocompattabilità è necessario adottare rapporti acqua /cemento non troppo bassi se non si vuole pregiudicare le capacità di scorrimento dell'impasto. Come meglio verrà specificato nel paragrafo che segue sarà necessario adottare un rapporto tra il volume di acqua e quello dei materiali finissimi che consenta di ottimizzare sia la capacità di scorrimento che la resistenza alla segregazione dell'impasto.

2.4 Aggregati

L'inerte ricopre, almeno dal punto di vista quantitativo, un ruolo di primaria importanza giacché occupa mediamente i due terzi del volume del calcestruzzo. Ma, come si mostrerà più avanti, anche da un punto di vista qualitativo l'aggregato è destinato a giocare un ruolo di fondamentale importanza, soprattutto nei calcestruzzi ad alta prestazione.

La più evidente caratteristica dell'aggregato è la sua granularità, cioè il fatto che si presenta sotto forma di granuli sciolti. Quando la dimensione dei singoli granuli non supera i 4-5 mm l'aggregato prende il nome di sabbia; se, invece, è formato da granuli più grossi di 4-5 mm è chiamato ghiaia³, pietrisco⁴, o più genericamente aggregato grosso. Il termine "aggregato", senza alcuna precisazione, include sia la frazione fine, sabbia, che quella grossa, ghiaia o pietrisco.

La granularità dell'aggregato è strettamente connessa con il suo assortimento granulometrico, cioè con la presenza o meno delle varie frazioni: da quelle più fini a quelle più grosse passando per quelle intermedie. In linea di massima, con qualche rara eccezione, l'inerte deve essere bene assortito, in modo tale che i granuli più fini si possano allocare nei vuoti interstiziali presenti tra quelli dei granuli più grossi. Ciò contribuirà alla formazione di uno scheletro di elementi lapidei con un contenuto di vuoti interstiziali relativamente ridotto. Questi vuoti dovranno essere riempiti dalla pasta di cemento che, una volta indurita, trasformerà l'inerte, cioè un insieme di granuli sciolti, in un conglomerato monolitico.

³ Di origine alluvionale e di forma tondeggiante.

⁴ Proveniente dalla frantumazione della roccia e di forma irregolare.

Le ragioni dell'aggiunta dell'inerte sono molteplici: esiste innanzitutto un motivo di carattere economico, in quanto l'inerte è molto meno costoso della pasta cementizia, per cui risulta essere economicamente più vantaggioso disperdere un considerevole volume di aggregati in una matrice legante costituita dalla pasta di cemento.

Esistono, però, altre ragioni di carattere tecnico che giustificano e legittimano l'impiego degli inerti in un conglomerato cementizio.

La più importante, forse, riguarda il ritiro della pasta cementizia che, per aggiunta dell'aggregato, diminuisce in maniera proporzionale. Un altro motivo tecnico, non meno importante e sottovalutabile, riguarda la durabilità del conglomerato, che può essere migliorata sostituendo gran parte della pasta cementizia, materiale relativamente aggredibile dall'ambiente, con un materiale più durevole, qual è l'aggregato, qualora questo venga scelto in base a determinati requisiti di carattere fisico e chimico.

Esistono molte altre proprietà del calcestruzzo indurito (resistenza meccanica, modulo elastico, scorrimento viscoso, resistenza all'abrasione) che dipendono dalle qualità dell'inerte e possono essere sensibilmente migliorate introducendo nell'impasto cementizio un'adeguata quantità di aggregato.

Tra tutte, l'unica proprietà che risulta essere peggiorata, rispetto alla pasta di cemento è la lavorabilità dell'impasto fresco. Tutti gli aggregati provengono da una massa rocciosa più grande che a seguito di numerosi processi naturali⁵ o artificiali, come la frantumazione, è stata trasformata in frammenti lapidei.

Per cui, gli aggregati posseggono tutta una serie di proprietà, come composizione chimica e mineralogica, caratteristiche petrografiche, peso specifico, porosità, resistenza meccanica, colore, ecc., che dipendono da quelle della roccia a cui appartengono. Per i calcestruzzi confezionati con aggregati da riciclo si tiene conto degli aggregati riciclati specificati tramite il reperimento dei dati avvenuto in sede di smaltimento (4 impianti di riciclaggio nell'Italia settentrionale) e non in fase d'effettiva produzione dei rifiuti (cantiere). Pertanto il valore dell'indice di produttività specifica ottenuto risulta sottostimato rispetto al reale perché non tiene conto della differenza fra il volume di rifiuti prodotto e quello effettivamente conferito agli impianti .

Si è fatto specifico riferimento al Catalogo Europeo dei Rifiuti (nel seguito CER) ed in particolare sono stati censiti i soli codici CER 170501 e CER 170701 (rispettivamente

⁵ Erosione, abrasione, dilavamento, ecc.

definite dal Catalogo Europeo dei Rifiuti "terra e rocce" e "rifiuti misti di costruzione e demolizione") per i seguenti motivi:

- trascurare dal gruppo dei codici CER 17 le restanti categorie di rifiuto permette di trascurare quelle legate a realtà locali (è il caso, ad esempio dei prodotti dell'industria ceramica, delle terre di dragaggio o dei pali di calcestruzzo, etc.);
- le tipologie di rifiuto relative ai codici CER 170701 e i 170501 sono quelle più correlate alla popolazione residente pertanto, per queste, ci si può attendere una omogeneità di produzione; oltre ad essere i più rappresentativi del gruppo CER 17 (per quantità sono pari a circa l'80% del totale del gruppo e al 70% del totale conferito agli impianti), sono quelli che con la massima probabilità, provengono effettivamente dal comparto edilizio, supposto che gli inerti terrosi provengano essenzialmente dalle nuove costruzioni e i rifiuti dalle microristrutturazioni e dalle demolizioni [Piacentini, 1989].

L'attenzione si è concentrata sul comparto delle microristrutturazioni che è quello che contribuisce quasi integralmente alla produzione di rifiuti. Infatti, a tale comparto corrisponde una fetta del mercato delle demolizioni pari al 92% [CRESME, 1996] mentre solo l'8% dei rifiuti prodotti proviene dalla fase di costruzione [Jakobsen, 1992].

Si è correlato il quantitativo di rifiuti prodotti (espresso in peso) alla popolazione residente (indice di produttività) sia perché è l'effettiva produttrice di rifiuti inerti sia per permettere un confronto con i risultati di studi simili a livello europeo (essendo questo il metodo più diffuso per quantificare i rifiuti).

2.4.1 Idoneità degli Aggregati

Non tutti gli aggregati, naturali o provenienti da roccia frantumata, sono necessariamente idonei alla produzione del calcestruzzo. Esistono alcuni requisiti fondamentali⁶ in assenza dei quali il calcestruzzo rischia di essere degradato anche se esposto in ambienti non particolarmente aggressivi. Questi requisiti prevedono l'assenza, innanzi tutto, di sostanze nocive alla durabilità del calcestruzzo.

La lista (High Research Record, n.411, 1973) delle sostanze nocive include il cloruro, il solfato, la silice alcali-reattiva, i limi argillosi e le sostanze organiche. Inoltre, deve essere assente il comportamento gelivo degli inerti, cioè la caratteristica di frantumarsi

⁶ Criteri di idoneità o di accettazione.

quando, dopo essere stati saturati con acqua, sono esposti a temperature che favoriscono la formazione del ghiaccio.

La norma UNI 8520 parte 2a stabilisce i limiti per l'accettazione degli inerti, mentre le norme UNI 8520 parte 4a - 22a illustrano i metodi di prova per la determinazione di questi limiti. Queste prove debbono essere effettuate una tantum su materiali che debbono essere impiegati per la prima volta come inerti per calcestruzzo o per i quali non esiste comunque una consolidata esperienza del passato.

Una volta accertata l'idoneità degli inerti, non è necessario ripetere sistematicamente queste prove a meno che non esistano specifici motivi per sospettare che sia intervenuta qualche variazione nella fonte di approvvigionamento degli inerti e quindi nel loro comportamento.

2.4.1.1 Cloruri

Il limite nel contenuto di cloruro negli inerti (0.05%) è correlato con il rischio di corrosione dei ferri d'armatura. Nei calcestruzzi privi di armature metalliche la presenza di cloruro nell'aggregato non comporta alcun rischio di degrado, ma solo un danno di carattere estetico per la formazione di depositi salini sulla superficie dei manufatti esposti a cicli alternati di bagnatura e asciugamento.

Con qualche rara eccezione, gli inerti inquinati da cloruro sono di fatto identificabili con la sabbia del mare. Questa potrebbe anche essere impiegata come frazione fine di un aggregato per calcestruzzo, purché il sale (NaCl) idrosolubile venga rimosso attraverso un preliminare trattamento in un impianto di lavaggio.

2.4.1.2 Solfati

Il solfato può essere presente nell'aggregato in forma di gesso biidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o anidro (CaSO_4). La presenza di solfato nell'aggregato oltre un certo limite (0.2%) comporta il rischio di fessurazione del calcestruzzo per formazione di ettringite espansiva a seguito della reazione con gli alluminati del cemento.

Ci si potrebbe chiedere perché il gesso è tollerato, anzi indispensabile, nel cemento, mentre è guardato come fonte di degrado se presente nell'aggregato. Il gesso del cemento è macinato nel mulino insieme al clinker e per la sua elevata finezza reagisce immediatamente con gli alluminati del clinker formando una pellicola protettiva di

ettringite (primaria) sui granuli di cemento impedendo una presa troppo rapida: esso agisce da regolatore della presa del cemento senza che l'espansione, associata alla formazione di ettringite, abbia ripercussioni negative in quanto avviene nelle prime ore di idratazione all'interno di un sistema plastico o comunque deformabile.

Mentre, il gesso eventualmente presente nell'aggregato è granulometricamente grossolano, si scioglie molto lentamente nell'acqua che riempie i pori capillari e reagisce, quindi, molto più lentamente con gli alluminati del cemento⁷. Questa ettringite, detta secondaria, che si forma all'interno di un calcestruzzo ormai indurito, quindi molto rigido, è in grado di provocare pericolose tensioni per il carattere espansivo della reazione che porta alla formazione dell' ettringite stessa.

La distribuzione non uniforme del gesso nell'aggregato aggrava il rischio di fessurazione visto che l'espansione risulta localizzata solo in prossimità dei granuli di gesso con conseguenti tensioni differenziali all'interno del calcestruzzo.

A differenza delle sabbie marine, che possono essere eventualmente private dal cloruro con un trattamento di lavaggio con acqua potabile, gli inerti inquinati da gesso non possono essere bonificati con alcun trattamento e debbono essere assolutamente scartati dalla produzione di calcestruzzi a base cementizia.

Debbono essere osservati con altrettanta sospetto gli aggregati contenenti minerali a base di solfuri⁸, in quanto sia pure con tempi molto lunghi si possono, per ossidazione, trasformare in solfati e generare fenomeni espansivi e dirompenti correlati con la formazione di ettringite secondaria.

2.4.1.3 Silice Alkali-Reattiva

Alcune forme di silice presenti nell'aggregato lapideo, quelle amorfe e poco cristallizzate o comunque deformate ancorchè cristalline, possono reagire con gli alcali del cemento (sodio e potassio) per formare silicati alcalini idrati dal carattere espansivo e fortemente dirompente nei confronti della circostante matrice cementizia.

⁷ Dopo mesi e anche anni.

⁸ Ne è un esempio la pirite FeS_2 .

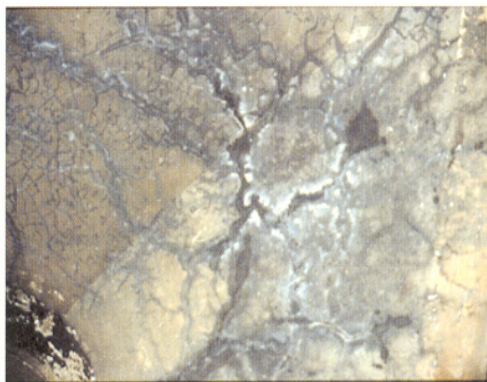


Fig. 2.2 - Fessure da reazione alcali-aggregato evidenziate dalla presenza del silicato idrato alcalino di colore biancastro

Questa reazione, nota come ASR (Alcali-Silica Reaction), si manifesta attraverso fessurazioni irregolari o espulsioni localizzate di materiale (pop-out) che possono pregiudicare seriamente la durabilità delle opere in calcestruzzo (Fig. 2.2).

Attualmente la presenza di silice reattiva nell'aggregato rappresenta la più insidiosa e mutevole forma di degrado del calcestruzzo. Ciò dipende dal concorso di più cause:

La presenza di silice reattiva in un aggregato, a differenza della presenza di cloruro o solfato rilevabile con una semplice e rapida analisi chimica, può essere accertata con molta difficoltà e tempi lunghi.

La silice reattiva è distribuita in forma discreta, per esempio, è presente in qualche granulo d'aggregato, ma è completamente assente negli altri: ciò comporta il rischio di non evidenziare la sua presenza se il campione d'aggregato sotto esame non contiene alcun granulo di silice reattiva e di considerare, quindi, accettabile un aggregato che dovrebbe, invece, essere scartato.

La reazione alcali-silice dipende dal contenuto di alcali nel calcestruzzo: un contenuto di alcali oltre il limite di 3 kg per metro cubo di calcestruzzo è considerato pericoloso; a causa della variazione del contenuto di alcali, da cemento a cemento, con il dosaggio di cemento, e talvolta da un periodo all'altro per lo stesso cemento, la reazione alcali-silice presenta una certa mobilità e si può manifestare o meno in condizioni apparentemente eguali.

La reazione alcali-silice può decorrere solo in presenza di umidità e si verifica, quindi, più frequentemente in ambienti esterni, ma anche in ambienti chiusi⁹ esposti alla risalita capillare di acqua dal terreno.

La reazione alcali-silice è in generale molto lenta ed è accelerata alle temperature più elevate; tuttavia, a seconda delle circostanze, grado di reattività della silice, umidità e temperatura ambientale, contenuto di alcali, il fenomeno può richiedere da qualche mese ad una decina di anni per potersi manifestare.

A causa della mutevolezza e della mobilità del fenomeno e della difficoltà di diagnosticare preliminarmente la reattività della silice, il miglior modo per affrontare il problema è quello di prevenire il fenomeno con l'impiego sistematico di cementi di miscela alla cenere o alla loppa oppure di cementi pozzolanici, d'altoforno o compositi in presenza dei quali la reazione alcali-silice è fortemente ridotta o addirittura eliminata.

Questa strategia, dovrebbe essere adottata in quelle aree, per esempio lungo la fascia adriatica, dove maggiore si è rivelato il rischio di questo degrado.

2.4.1.4 Sostanze Limo-Argillose

La presenza di limi e argille, o fango, negli inerti può influenzare negativamente il giunto adesivo tra la superficie degli elementi lapidei e la matrice cementizia. Se ciò dovesse avvenire le prestazioni meccaniche del conglomerato risulterebbero inferiori senza però alcun rischio di degrado per la struttura.

Da questo punto di vista, quindi, la presenza di limi e argille non può essere messa sullo stesso piano delle altre sostanze nocive, cloruri, solfati, silice reattiva che possono, invece, pregiudicare la durabilità dell'opera.

Inoltre, un aggregato inquinato da limi e argille può essere sottoposto a lavaggio e decantazione per essere trasformato in un materiale idoneo anche dal punto di vista delle prestazioni meccaniche.

2.4.1.5 Sostanze Organiche

Le sostanze organiche in un aggregato (per lo più di origine vegetale) possono interagire negativamente con il processo di idratazione del cemento e rallentare o ridurre lo sviluppo delle resistenze meccaniche. Anche in questo caso, come per i limi e le argille,

⁹ Pavimenti di capannoni non protetti con barriera a vapore.

si tratta più di un inconveniente che riduce le prestazioni del calcestruzzo senza un vero e proprio pregiudizio per la durabilità dell'opera. L'entità dell'abbattimento delle prestazioni meccaniche, e quindi l'accettabilità o meno dell'aggregato inquinato da sostanze organiche, può essere valutata attraverso le prestazioni del calcestruzzo in confronto con quelle ottenute con un aggregato privo di sostanze organiche e di comprovata qualità.

La presenza di frammenti di legno, o carbone o di altro materiale organico poroso, può comportare un rigonfiamento localizzato soprattutto in pavimenti esposti all'umidità: si possono manifestare espulsioni localizzate molto simili a quelle che si verificano nei pop-out provocati da aggregati reattivi.

2.4.1.6 Gelività

La gelività degli inerti, cioè la scarsa resistenza alla formazione del ghiaccio, è solitamente associata alla presenza di acqua nei pori dell'aggregato, seguita dalla creazione di una pressione idraulica che accompagna l'aumento di volume, circa il 9%, generato dalla formazione dei primi germi cristallini del ghiaccio al di sotto di 0°C.

La formazione di ghiaccio genera tensioni dirompenti solo se dentro i granuli dell'aggregato sono presenti micropori con diametro di qualche μm . Infatti, nei micropori più piccoli la formazione di ghiaccio non può avvenire¹⁰ per la mancanza di spazio sufficiente alla crescita dei cristalli di ghiaccio.

D'altra parte, negli inerti con pori più grossi la crescita dei cristalli di ghiaccio può avvenire, ma le conseguenze non sono molto gravi perché l'acqua non ancora congelata, sotto l'effetto della pressione idraulica generata dall'aumento di volume associato alla formazione dei primi germi cristallini, può essere facilmente drenata verso la matrice cementizia allentando così la tensione nella fase lapidea degli inerti.

Gli inerti gelivi non sono ovviamente accettabili per strutture in calcestruzzo esposte ai cicli di gelo-disgelo anche se s'impiegano additivi aeranti capaci di proteggere la matrice cementizia, ma non gli inerti, dall'azione del gelo.

¹⁰ Oppure richiede temperature molto al di sotto di 0°C.

2.4.2 Umidità degli Aggregati

L'umidità dell'aggregato è il parametro che presenta la maggiore incidenza sulla qualità del calcestruzzo, in termini di R_{ck} e di slump.

Infatti essa può radicalmente modificare l'acqua di impasto (a) realmente immessa nel calcestruzzo e quindi, attraverso questa variazione, può provocare modifiche nella lavorabilità che dipende proprio dal valore di a e può condizionare la R_{ck} attraverso la variazione del rapporto a/c .

L'influenza dell'umidità dell'inerte sulle proprietà del calcestruzzo, attraverso le variazioni di a e di a/c , è piuttosto complessa e deve tener conto dell'umidità capace di saturare la porosità aperta dell'aggregato definita come assorbimento.

L'umidità (u) viene determinata misurando la diminuzione percentuale di massa, a seguito del riscaldamento a 110°C per essiccare completamente il materiale, rispetto alla massa dell'aggregato completamente secco:

$$u = \frac{m - m_o}{m_o} \cdot 100$$

dove m ed m_o sono rispettivamente la massa dell'aggregato così come disponibile e quella dell'aggregato completamente essiccato. L'assorbimento è quella particolare umidità (u_a) che si trova nell'aggregato quando si trova ad essere saturo a superficie asciutta (s.s.a.):

$$u_a = \frac{m_{s.s.a.} - m_o}{m_o} \cdot 100$$

dove $m_{s.s.a.}$ è la massa dell'aggregato conservato sotto acqua fino a completa saturazione ed asciugato in superficie.

Nella pratica di cantiere l'aggregato si troverà spesso nella situazione di insaturo, qualche volta, dopo un pioggia, in quello di bagnato, raramente in quella di asciutto, dopo lunga permanenza in clima secco, caldo e ventilato, ed ancor più raramente, e solo transitoriamente, in quella di s.s.a..

La condizione di s.s.a., tuttavia, è di grande importanza pratica oltre che teorica, perché è quella in cui vengono a trovarsi gli inerti all'interno del calcestruzzo subito dopo l'impasto, ed è anche la situazione in cui si calcola la massa volumica (peso specifico)

della sabbia e della ghiaia per tramutare i volumi dei singoli inerti nelle corrispondenti masse.

Per cui un inerte bagnato cede l'acqua in eccesso ($u > u^a$) rispetto alla situazione di s.s.a. che va a sommarsi all'acqua introdotta in betoniera, facendo aumentare il valore dell'acqua totale d'impasto (a).

D'altra parte, un inerte insaturo ($u < u^a$) ed ancor più un inerte asciutto ($u = 0$) comporterà una suzione di acqua da parte dell'inerte cosicché questo si porta in condizione di s.s.a. con conseguente diminuzione della effettiva acqua d'impasto.

Per prevenire queste oscillazioni nelle prestazioni del calcestruzzo (R_{ck} e slump) è necessario compensare le variazioni di umidità apportate o sottratte dall'inerte rispettivamente con minori o maggiori aggiunte di acqua in betoniera.

A tale scopo è necessario controllare quotidianamente l'umidità (u) degli inerti, soprattutto in relazione alle variazioni igrometriche dell'ambiente, e tenere sotto controllo il valore dell'assorbimento (u^a) soprattutto in relazione ai cambi di cava e quindi di porosità della roccia minerale caratteristica dell'inerte.

2.5 Additivi

Attualmente il calcestruzzo è il materiale più impiegato nella realizzazione di un gran numero di costruzioni. Questo primato è attribuito soprattutto al basso costo di costruzione e di manutenzione rispetto ad altri materiali utilizzati per la realizzazione delle stesse strutture.

Pertanto l'evoluzione tecnologica del calcestruzzo deriva dalla riduzione dei tempi esecutivi, atti ad abbassare i costi di costruzione, e dal miglioramento della durabilità per contenere le spese manutentive di restauro.

Nel periodo tra il 1940 e il 1970 la disponibilità di cementi Portland puri, ad elevata resistenza meccanica, consentì l'uso di alti quantitativi di acqua di impasto senza grandi penalizzazioni per la resistenza meccanica del calcestruzzo. Però, l'elevata porosità, in conseguenza dell'elevato rapporto a/c, comportò seri problemi per la durabilità delle opere, soprattutto per quelle esposte ad ambienti aggressivi.

Si è capito nel frattempo che, oltre alla velocità esecutiva ed alla durabilità delle opere, lo sviluppo tecnologico del calcestruzzo andava verso la disponibilità del legante (cemento)

e/o del calcestruzzo stesso ad ospitare altri ingredienti¹¹, provenienti da altri processi industriali, che favorivano prestazioni qualitative migliori.

Un ulteriore miglioramento qualitativo del calcestruzzo si è avuto con l'avvento degli additivi chimici.

Gli additivi, aggiunti in modeste quantità negli impasti, migliorano le proprietà del calcestruzzo, ricoprendo notevole interesse dal punto di vista tecnologico e scientifico.

Il miglioramento derivante dall'utilizzo degli additivi può realizzarsi, potenzialmente, variando la composizione del calcestruzzo e la sua tecnologia di applicazione.

Per cui l'aggiunta degli additivi viene giustificata dal fatto che il miglioramento di una determinata proprietà deve risultare più vantaggiosa, dal punto di vista tecnico-economico, di qualsiasi altra soluzione (Malhotra et al., 1998; Ramchandran, 1995; Collepari et al., 1994).

A seconda della funzione coinvolta nel miglioramento gli additivi possono essere classificati in vari tipi, i più importanti dei quali sono:

- Acceleranti
- Ritardanti
- Superfluidificanti (e fluidificanti)
- Aeranti

Gli additivi acceleranti (accelerators) e quelli ritardanti (retarders) hanno la funzione di modificare il grado d'idratazione (α) del cemento solo alle brevi stagionature e modificano, quindi, le prestazioni del calcestruzzo in corso d'esecuzione ma non le prestazioni delle strutture in esercizio. Gli acceleranti, in particolare, aumentano il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature in modo da accorciare i tempi di presa, acceleranti di presa, o di incrementare la resistenza meccanica nei primi giorni, acceleranti di indurimento, sopra tutto nei climi invernali quando la bassa temperatura rallenta il decorso della reazione iniziale tra l'acqua ed il cemento.

L'effetto accelerante serve, per esempio, all'impresa costruttrice per stagionare e rifinire più in fretta un pavimento in calcestruzzo che presenta tempi di presa troppo lunghi, o per scasserare più in fretta i getti di calcestruzzo senza immobilizzare troppo a lungo le casseforme.

¹¹ Ceneri, scorie, ecc.

Gli acceleranti non modificano la resistenza meccanica del calcestruzzo alle lunghe stagionature, cioè in servizio, pertanto le prestazioni delle strutture in opera non risentono beneficamente della eventuale presenza di acceleranti¹².

Particolarmente interessanti, sempre per ragioni esecutive, sono gli acceleranti per il calcestruzzo proiettato (shotcrete, o spritz beton), detto anche gunita dall'inglese to gun, che significa "parare".

Essi consentono di accelerare l'indurimento nelle prime 24 ore senza penalizzazione delle prestazioni meccaniche in servizio, purché s'impieghino acceleranti privi di alcali (alkali-free). Difatti gli acceleranti alcalini, a base di silicato o alluminato o carbonato di sodio, poiché sono molto caustici, provocano danni all'epidermide ed alle mucose degli operai, penalizzano le resistenze meccaniche alle lunghe stagionature, cioè le prestazioni in servizio.

Gli acceleranti alkali-free, a base di solfato ferrino o di alluminio, invece, non riducono le prestazioni in servizio e, proprio per l'assenza di alcali, non creano problemi agli utilizzatori del calcestruzzo spruzzato.

Gli additivi ritardanti riducono il grado d'idratazione (α) del cemento nelle prime ore dopo l'impasto, vengono utilizzati soprattutto in presenza di climi caldi quando l'alta temperatura accelera l'idratazione del cemento ostacolando il trasporto del calcestruzzo, perdita di lavorabilità, le operazioni di getto e quelle di finitura.

L'utilizzo di questi additivi permette all'impresa costruttrice di risolvere qualche problema esecutivo in fase di realizzazione, ma non modifica sostanzialmente le prestazioni del materiale in servizio.

Gli additivi aeranti (air-entraining agents, AEA), invece, modificano le prestazioni del calcestruzzo in servizio migliorandone la resistenza in presenza di ghiaccio.

Gli additivi superfluidificanti (superplasticizers) ed in minor misura gli additivi fluidificanti (plasticizers), modificano, a seconda del loro impiego, le prestazioni del calcestruzzo in corso di esecuzione e/o quelle in esercizio (durabilità, resistenza meccanica, ritiro, ecc.).

L'impiego dei superfluidificanti ha rivoluzionato il mondo delle costruzioni in c.a. e c.a.p.. E' possibile, infatti, a seconda della modalità di impiego:

¹² In passato l'impiego di acceleranti a base di cloruri ha provocato fenomeni di corrosione delle armature quando si eccedeva nel dosaggio di questi.

- migliorare la lavorabilità e l'affidabilità delle strutture in opera (a pari rapporto a/c);
- aumentare Rck e durabilità riducendo l'acqua (a) e quindi il rapporto a/c (a pari lavorabilità);
- ridurre il ritiro igrometrico, il gradiente termico e la deformazione viscosa riducendo sia l'acqua (a) che il cemento (c), a pari rapporto a/c e pari lavorabilità.

Gli additivi superfluidificanti sono costituiti da polimeri idrosolubili capaci di essere adsorbiti sulla superficie dei granuli di cemento. Questi ultimi, in assenza di additivo superfluidificante, tendono ad agglomerarsi in grossi flocculi per la presenza di cariche elettrostatiche.

In presenza di additivo superfluidificante i granuli di cemento sono dispersi per la presenza di additivo sulla superficie del cemento. La mancata flocculazione del cemento rende il sistema più fluido. La trasformazione di un sistema flocculato in uno disperso provoca un aumento significativo nella fluidità della pasta cementizia.

Conseguentemente, il calcestruzzo con additivo superfluidificante diventa molto più lavorabile ancorché confezionato con basso rapporto a/c.

I superfluidificanti più diffusi sono a base di naftalina o melammina o polimeri acrilici e, più recentemente di eteri policarbossilici (Damtoft et al., 1999; Collepardi et al., 1994). Qualche formulazione può contenere ritardanti o acceleranti di presa.

Gli additivi, quindi, esplicano sulle proprietà reologiche influenze diverse a seconda della loro natura.

Gli additivi maggiormente utilizzati per la produzione degli SCC sono quelli superfluidificanti. Essi vengono impiegati, generalmente, per aumentare la fluidità mantenendo invariato il dosaggio di cemento (pari rapporto a/c). Pertanto, essi consentono di ridurre la viscosità del sistema lasciando sostanzialmente invariata la resistenza alla segregazione del calcestruzzo. Per migliorare questa proprietà nel confezionamento degli SCC si fa ricorso all'utilizzo di additivi modificatori di viscosità.

Molto utilizzati sono negli SCC gli additivi modificatori della viscosità; il termine di additivi modificatori della viscosità (Viscosity Modifying Agent: VMA) individua una categoria di prodotti cellulosici modificati o polimeri ad alto peso molecolare utilizzati già in passato per rendere pompabili i calcestruzzi magri (con dosaggi di cemento inferiori a 260 Kg/m³). Gli agenti modificatori di viscosità impiegati per la produzione

dei calcestruzzi autocompattanti, invece, includono, oltre ai polimeri idrosolubili a base di cellulosa, anche quelli a base di glicole e i bio-polimeri. Indipendentemente, dalla loro natura gli agenti modificatori di viscosità destinati al settore del calcestruzzo autocompattante debbono possedere i seguenti requisiti:

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

2.6 Aggiunte Minerali Attive

Le aggiunte minerali attive impiegate con successo nella produzione di calcestruzzo ad alte prestazioni sono la silice fume, le ceneri volanti (fly ash), le argille calcinate (ad esempio metacaolino), le pozzolane naturali, la cenere di pula di riso e la loppa granulata d'altoforno finemente macinata.

Silice fume e ceneri volanti sono dotate, nell'ordine, di spiccata e moderata attività pozzolanica; la loppa granulata d'altoforno è al riguardo meno attiva, ma possiede discrete proprietà idrauliche, definite latenti perché si manifestano soltanto in ambiente alcalino.

In linea generale l'efficacia di una aggiunta minerale, destinata a sostituire parte del cemento in un calcestruzzo ad alte prestazioni, va valutata in riferimento al modo ed alla intensità di azione della silice fume.

I parametri alla base del confronto sono la granulometria, il contenuto e la reattività della fase attiva. La granulometria è un parametro effettivo di confronto soltanto se le particelle sono piccole al punto da potersi inserire negli spazi vuoti tra i granuli di

cemento. La reattività è intesa come capacità di reagire più o meno velocemente con l'idrossido di calcio, separato durante l'idratazione del cemento, per formare composti cementanti.

La silice fume presenta al massimo grado le tre caratteristiche citate, mentre le altre due aggiunte sono poco o nulla efficaci come riempitivi (filler) nel senso sopra indicato. Questa loro insufficienza è in pratica superata usandole in miscela con la silice fume.

Studi recenti suggeriscono che un sostituto valido della silice fume è il metacaolino, che si ottiene per decomposizione termica della caolinite nell'intervallo 500-600°C.

2.6.1 Silica fume

La silice fume è un sottoprodotto della fabbricazione del silicio e delle leghe ferro-silicio. Presenta una morfologia di tipo sferico, di diametro variabile da meno di 0,1 μm a 1-2 μm (Fig. 2.3), di colore tendente al grigio e costituita da silice amorfa (85-98%) molto reattiva.

Il diametro medio delle particelle è di 100 volte inferiore a quello delle particelle di cemento; l'area superficiale specifica misurata mediante adsorbimento con azoto varia tipicamente da 15.000 a 25.000 m^2/kg mentre quella di un cemento Portland ordinario è intorno a 1.500 m^2/kg . Il peso specifico è 2200 kg/m^3 , la densità in mucchio può variare da 160 a 320 kg/m^3 .

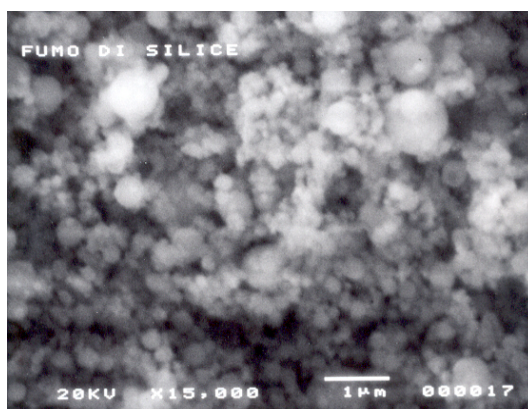


Fig. 2.3 - Micrografia al microscopio elettronico delle sfere di silice fume (<1 μm)

E' disponibile in polvere, così come raccolta sui filtri, in sospensione acquosa al 50% oppure in forma di polvere addensata con peso in mucchio di 400-500 kg/m^3 .

All'aumentare del peso unitario, il trasporto diventa meno oneroso e la manipolazione meno problematica; l'utilizzo della sospensione acquosa richiede l'uso d'apparecchiature speciali.

Non è del tutto vero, come molti ritengono, che per ottenere calcestruzzo ad alte prestazioni sia indispensabile usare silice fume. Quanto finora acquisito, sia nella pratica costruttiva che negli studi di laboratorio, indica che si possono raggiungere resistenze di 90-100 N/mm², e/a volte oltre, anche in assenza dell'aggiunta di silice fume.

E' invece innegabile che l'impiego di silice fume costituisca il mezzo più semplice per conseguire la resistenza e la lavorabilità desiderate, e il modo più efficace per ridurre la permeabilità dell'impasto indurito (Fig. 2.4).

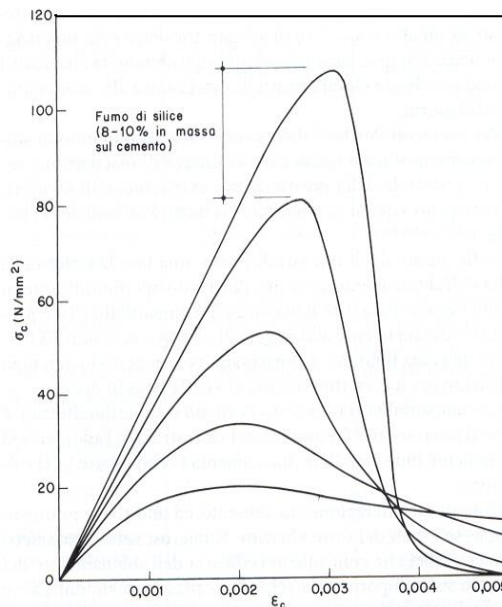


Fig. 2.4 - Effetti dell'introduzione di silice fume per ottenere resistenze a compressione superiori a 80 MPa

Gli effetti peculiari che distinguono la silice fume dagli altri tipi d'aggiunta sono sostanzialmente da attribuire alla sfericità e finezza delle particelle che, se adeguatamente deflocculate mediante un appropriato dosaggio di superfluidificante, si disperdono uniformemente nell'impasto disponendosi nei vuoti tra le particelle di cemento.

Pertanto, migliora l'impaccamento generale e in particolare quello all'interfaccia con l'aggregato.

I dati di laboratorio e della pratica costruttiva hanno mostrato che se l'aggiunta di silice fume scende al di sotto del 5% in massa sul cemento, l'impaccamento risultante è

insufficiente; quando vi è troppo silice fume, oltre il 15%, i vuoti tra le particelle di cemento non sono sufficienti ad accoglierla tutta.

Ricordando che il costo del silice fume è 5-10 volte maggiore di quello del cemento, in Italia si aggira intorno ad 1€/kg, occorre evitare ogni spreco; normalmente il contenuto tipico per conseguire il massimo beneficio in termini di resistenza e di durabilità (= bassa permeabilità) è 8-10%, in massa sul cemento.

Percentuali maggiori comportano soprattutto un aumento del rapporto costo/benefici poiché l'incremento delle proprietà desiderate risulta limitato o marginale.

Nella sua funzione d'aggiunta per eliminare i vuoti più fini, la silice fume comporta numerosi effetti positivi:

- diminuzione dell'adesività, e miglioramento della coesività e della fluidità della pasta nel calcestruzzo fresco;
- diminuzione drastica dell'essudazione dell'acqua (bleeding) sia in superficie, che all'interno;
- separazione dell'idrossido di calcio in cristalli dispersi perché le piccole particelle di silice fume agiscono da centri di germinazione. Quest'effetto mantiene alta la velocità della reazione pozzolanica e accelera l'idratazione dei silicati di calcio del cemento;
- eliminazione quasi totale della discontinuità microstrutturale rappresentata dalla zona di transizione all'interfaccia con l'aggregato grosso;
- miglioramento complessivo dell'aderenza pasta/aggregato, con maggiore collaborazione statica fra le due fasi. A questo risultato contribuiscono la formazione di cristalli d'idrossido di calcio più piccoli, la migliore reazione pozzolanica e il migliore impaccamento della frazione particellare fina;
- miglioramento netto dell'omogeneità microstrutturale della matrice legante lontano dall'aggregato, con porosità costituita da pori molto fini.

L'eliminazione, totale o quasi, della zona di transizione e l'affinamento dei pori determinano un significativo aumento della resistenza a compressione a tutte le stagionature, e una netta diminuzione della permeabilità. Il massimo incremento della resistenza a compressione, mediamente valutabile nel 20-25%, è raggiunto tra 7 e 28 giorni, periodo nel quale la silice aggiunta è consumata nella reazione con l'idrossido di

calcio. In assenza di silice fume, lo stesso impasto difficilmente raggiungerebbe resistenza a compressione maggiore di 80-85 MPa.

Con la diminuzione della permeabilità, migliora decisamente la durabilità ai solfati, alle acque dilavanti ed alla carbonatazione, ed aumenta di alcune volte la resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro, mentre la durabilità ai cicli di gelo e disgelo è tuttora oggetto di controversia in relazione alla necessità o meno di incorporare aeranti.

Considerata l'incidenza della silice fume e degli additivi sul costo del calcestruzzo, la ricerca del rapporto ottimale costo/benefici attraverso lo studio accurato degli impasti e la conferma sperimentale sono una necessità.

2.6.2 Loppa granulata d'altoforno

Le loppe sono sottoprodotti dell'industria metallurgica, in particolare della fabbricazione della ghisa che si forma per reazione del fondente con la ganga del minerale di ferro e con le ceneri del coke.

Esse variano nella loro composizione chimica, struttura e proprietà. Per esempio le loppe prodotte negli altiforni della produzione del ferro hanno proprietà idrauliche, mentre quelle derivanti dalla produzione del nichel e del rame hanno solo proprietà pozzolaniche.

La loppa granulata d'altoforno è il materiale comunemente più utilizzato per la produzione di cementi di miscela (Thomas, 1979; Smolczyk, 1980). Le loppe d'altoforno sono le scorie spillate allo stato liquido, a temperature variabili tra i 1400÷1550 °C, secondo la composizione della loppa stessa.

Mediamente si producono 0,3 tonnellate di loppa per tonnellata di ghisa. Questo dato può dare un'idea dell'imponente massa di loppa prodotta annualmente, e quindi degli sforzi necessari a trovare delle utili applicazioni per questo materiale. Esso può essere impiegato, per esempio, come aggregato ordinario o leggero, a seconda che il raffreddamento della loppa fusa sia effettuato lentamente all'aria oppure iniettando minime quantità di d'acqua nella massa fusa per favorire la formazione di un materiale poroso. Nel primo caso si ottiene un materiale denso impiegato principalmente come inerte per calcestruzzi ordinari ed in particolare per sottofondi stradali. Nel secondo caso, può trovare utile impiego quale inerte poroso per calcestruzzi leggeri.

L'applicazione più interessante della loppa riguarda la produzione di cemento d'altoforno. Per quest'impiego si richiede che la loppa fusa sia raffreddata il più rapidamente possibile immergendola in grandi masse d'acqua, oppure iniettandola con quantità rilevanti d'aria ed acqua sotto pressione all'uscita dell'altoforno. L'obiettivo è in ogni caso quello di raffreddare bruscamente la loppa fusa in modo da prevenire al massimo il processo di cristallizzazione del liquido, e di favorire, invece, la solidificazione sotto forma vetrosa.

Il materiale raffreddato bruscamente si presenta sotto forma di granuli vetrosi e per questo prende il nome di loppa granulata d'altoforno.

Le loppe utilizzate in cemenzeria devono contenere almeno l'85% di particelle "vetrose" (Higgins, 1988), ma maggiore è il contenuto di sostanze vetrose e maggiore sarà l'attività idraulica della scoria, se la composizione chimica è mantenuta all'incirca uguale (Runzhang et al., 1985).

Calcestruzzi realizzati con elevato contenuto di loppa d'altoforno (> 65 % del contenuto di cemento) mostrano una maggiore resistenza alla reazione alcali - aggregati, rispetto a calcestruzzi realizzati con ordinario cemento Portland (Sivasundaram et al., 1992). Miscele del 70 % o più di scorie con cemento Portland possono essere usati in ambienti solfatici (Reeves, 1985). Maggiore resistenza all'attacco solfatico è stata dimostrata quando la percentuale di scoria macinata supera il 70% del materiale cementizio totale (Sivasundaram et al., 1992).

Considerevoli benefici sono stati ottenuti in costruzioni massicce con significative riduzioni di incrementi di temperatura del calcestruzzo a brevi stagionature, con l'uso di loppa granulata d'altoforno senza danni sullo sviluppo delle resistenze a lungo tempo (Dewar, 1984).

Attualmente la loppa d'altoforno è utilizzata spesso in unione con la silice fume in percentuale del 20% di silice fume. La loppa, come la silice fume, riduce drasticamente la formazione di idrossido di calcio ad ogni stadio di idratazione: questo aumenta la resistenza meccanica.

Il ruolo dei due materiali cementizi è complementare: la silice fume contribuisce allo sviluppo della resistenza iniziale (7 giorni) mentre la loppa gioca un ruolo fondamentale nella resistenza a lungo termine.

2.6.3 Ceneri volanti

Le ceneri volanti (o fly ash) sono costituite dal solido particellare separato dai fumi di combustione delle centrali termiche di potenza, alimentate a polverino di carbone.

Il fly ash è prodotto dalla combustione del carbone finemente macinato, passante allo staccio da 75 μm , iniettato ad alta velocità con un flusso d'aria calda nella camera di combustione della caldaia della centrale termoelettrica. Come entra nella camera di combustione, dove la temperatura è di circa 1500 °C, il contenuto carbonaceo del carbone in sospensione è bruciato immediatamente. Il rimanente materiale presente nel carbone, come scisto ed argilla (consistenti essenzialmente di ossidi di silicio, alluminio e ferro), fondono, e nel raffreddarsi rapidamente, si formano piccole particelle sferiche che vengono portate fuori dal flusso dei gas.

Circa l'80% della cenere volante è portata fuori dalla camera di combustione, dal flusso dei gas, e deve essere rimossa prima che i gas vengano scaricati nell'atmosfera. Le piccole particelle sono rimosse dai gas con diversi metodi e diverse sono le qualità di cenere prodotta.

Generalmente la polvere raccolta dai filtri meccanici è di dimensioni maggiori di quella raccolta con i filtri elettrostatici. E' proprio quest'ultima che viene scelta per essere utilizzata nella produzione di calcestruzzi.

La qualità di una cenere volante come aggiunta minerale dipende dal tipo di carbone, dalle caratteristiche della caldaia e dalle procedure di combustione. Considerato il numero e la specificità dei fattori coinvolti, nonché la possibilità che situazioni contingenti influiscano sulla storia termica del materiale, le caratteristiche delle ceneri volanti possono variare entro limiti molto ampi, in relazione sia alla loro provenienza, sia all'omogeneità del materiale nell'ambito della stessa partita.

Il fly ash è prodotto in grandi quantità nelle centrali termoelettriche. Per un carbone di alta qualità, è stato stimato che si producono 0,03 kg di cenere per ogni kWh prodotto.

In generale, e particolarmente riguardo al loro uso nei calcestruzzi, la cenere volante può essere divisa in due grosse categorie:

a basso contenuto di calce, con proprietà pozzolaniche ma con necessità di essere attivata per sviluppare proprietà cementanti;

ad alto contenuto di calce, con qualche proprietà cementante in aggiunta a quella pozzolanica.

I requisiti chimici e fisici, nonché le procedure per il controllo di qualità delle ceneri volanti da utilizzare nella produzione dei cementi di miscela e del calcestruzzo, sono oggetto della norma UNI-EN 450.

Parametri importanti di valutazione sono la perdita al fuoco (che è indicativa del contenuto di residuo carbonioso), la granulometria e il grado di attività pozzolanica.

Porosità e potere assorbente sono le caratteristiche per le quali il residuo carbonioso sottrae all'impasto fresco acqua e additivi di natura organica, in particolare aeranti.

Con la sottrazione di acqua la lavorabilità diminuisce e di conseguenza aumenta l'acqua necessaria per ottenere una data lavorabilità.

Sono invece fattori di riduzione della domanda di acqua (acqua necessaria per garantire la lavorabilità) la forma sferoidale delle particelle e il fatto che nelle fasi iniziali del processo di idratazione la cenere agisca principalmente come diluente del cemento.

La UNI-EN 450 stabilisce che la perdita al fuoco non deve essere maggiore del 5% in massa. Tuttavia a causa della datazione delle centrali termoelettriche, del volume delle ceneri prodotte e di altri fattori, si possono accettare, su scala nazionale, ceneri volanti con perdita al fuoco fino al 7%.

Va osservato però che le norme ACI 363 R-92 raccomandano per i calcestruzzi ad alte prestazioni la scelta di ceneri con perdita al fuoco non superiore al 3%.

Per essere di granulometria appropriata ai fini della domanda di acqua e del grado di attività pozzolanica, la percentuale in massa del residuo dopo setacciatura umida sul setaccio di maglia 0,045 mm non deve superare il 40% della massa iniziale. Il valore della finezza non deve variare di ± 10 punti percentuali rispetto al valore medio, che viene calcolato in base al numero di prove riferite ad un dato periodo di produzione (UNI-EN 450 punto 6.2).

Il grado di attività pozzolanica ha riflessi sullo sviluppo sia della resistenza iniziale, che di quella finale, così come sulla durabilità agli attacchi chimici. Entro certi limiti la reattività può essere migliorata mediante macinazione.

Una cenere volante avente buone prestazioni nel calcestruzzo ordinario può essere usata con successo per ottenere calcestruzzi di resistenza fino a 70-75 MPa, anche in assenza di silice fume.

Nei calcestruzzi di resistenza maggiore è prassi ordinaria associare alla cenere volante la silice fume.

In generale occorre diminuire il dosaggio di cenere volante a favore della silice fume se si desidera aumentare la resistenza, ma la quantità effettiva da usare per la cenere volante dipende dal suo grado di reattività e dal rapporto minimo a/l compatibile con le esigenze di lavorabilità. Mediamente il dosaggio è del 15% con massimi del 25-30% e minimi del 10% in peso del cemento.

L'effetto del fly ash sulla consistenza del calcestruzzo in alcuni casi dipende anche dal cemento utilizzato. La finezza del cemento pare sia uno dei principali fattori. Con il decrescere della superficie specifica, l'effetto plastificante è più pronunciato, specialmente con il cemento Portland. Con il cemento d'altoforno l'effetto della finezza si manifesta in modo meno chiaro (Frigione, 1986; Sybertz, 1988b).

Gli effetti positivi dell'utilizzo delle ceneri volanti si manifestano alle brevissime stagionature (12 ore), ma non influiscono in modo significativo sulle resistenze alle stagionature più prolungate.

2.6.4 Pozzolane naturali

Esistono materiali pozzolanici naturali sotto forma di pomice, ceneri vulcaniche, tufi, argille, scisti argillosi, ecc., in vasti depositi. Le pozzolane naturali richiedono generalmente un processo di macinazione. Tuttavia, alcuni materiali vulcanici possiedono una adeguata finezza nel loro stato naturale.

La pozzolana è un materiale che non possiede di per sé proprietà cementanti, ma, sotto forma di polvere ed in presenza di acqua, reagisce chimicamente, a temperature ordinarie, con l'idrossido di calcio liberato durante l'idratazione del cemento Portland ed acquista una certa resistenza, producendo così un composto cementizio.

Le pozzolane aggiunte separatamente alla miscela, in quantità dal 15 al 25 % circa rispetto al cemento Portland, aumentano considerevolmente la vita presunta del calcestruzzo in ambiente solfatico, poiché i composti prodotti dalla reazione tra pozzolane, calce idrata ed acqua conferiscono doti di impermeabilità al calcestruzzo, riducendo la tendenza del calcestruzzo ad autodistruggersi.

La valutazione dell'attività pozzolanica è stata oggetto di diversi studi e tutti i metodi proposti puntano sostanzialmente alla valutazione delle proprietà meccaniche di miscele di pozzolana con calce o cemento Portland con determinazioni chimiche, fisiche o meccaniche.

I metodi chimici sono basati sulla misura della quantità di calce fissata dal materiale, come funzione del tempo o della quantità di $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ presente nella pozzolana, che diventa solubile dopo la reazione con l'idrossido di calcio o di sodio (Suruma et al., 1988).

I metodi fisici, il calore sviluppato durante la dissoluzione della pozzolana naturale in una miscela di $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ o l'incremento della superficie specifica delle paste idrate di calce e pozzolana, come funzione del tempo, oppure il contenuto di fase vetrosa, come determinato dalla diffrazione ai raggi X, sono stati usati come indice di reattività di questi materiali.

I metodi meccanici sono basati sulla misura delle resistenze meccaniche di malte calce-pozzolana e cemento-pozzolana.

Va posta molta attenzione nella scelta e nell'uso delle pozzolane poiché alcune loro proprietà apportano benefici effetti sui calcestruzzi mentre altre producono reazioni negative, come l'eccessivo ritiro idraulico e la riduzione delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature.

L'accettazione e lo specifico impiego di una pozzolana devono essere supportate da prove effettuate in combinazione con il cemento e con l'aggregato con i quali si confezionerà un determinato calcestruzzo allo scopo di determinare i vantaggi e/o gli svantaggi concernenti gli aspetti economici e qualitativi del calcestruzzo stesso.

Le pozzolane ed i tufi litici sono delle rocce piroclastiche di buona costanza qualitativa (Massazza, 1980-81). Le variazioni presenti nel medesimo giacimento, o in giacimenti della stessa origine, riguardano stratificazioni differenti che possono differenziarsi per il tenore di vetro, il grado di diagenesi o la presenza di materiale estraneo, depositatosi tra due diverse eruzioni del vulcano.

Invece, per le argille e le marne diatomitiche, dette anche impropriamente pozzolane sedimentarie, le variazioni di composizione e di struttura possono essere considerevoli. A causa del loro tenore in argilla questi materiali non dovrebbero essere utilizzati come aggiunte secondarie ai cementi e/o ai calcestruzzi.

Per le pozzolane italiane si è visto che le resistenze a lungo termine possono essere dovute al contenuto di silice ed allumina, ma quelle iniziali (meno di 7 giorni) e la reattività con la calce sono maggiormente legate alla superficie specifica.

Il principale problema dell'utilizzo di pozzolane naturali per la realizzazione di HPC è dovuto alla difficoltà di ridurre le pozzolane ad una finezza dello stesso ordine di grandezza di quella della silica fume. Questo è dovuto alle difficoltà ed all'enorme energia dissipata sotto forma di calore durante il processo di macinazione.

Ciò nonostante, sono stati effettuati dei tentativi: in particolare, con l'utilizzo di zeoliti naturali (Poon et al., 2000) è stato notato un incremento della resistenza a compressione rispetto al calcestruzzo senza alcuna aggiunta, ma in ogni caso le resistenze sono risultate inferiori a quelle ottenute in calcestruzzi analoghi con aggiunta di silica fume.

2.6.5 Cenere di pula di riso

In agricoltura i residui sono composti da costituenti organici come cellulosa, lignite, fibre e piccole quantità di proteine crude e grasso. Contengono anche una quantità di minerali che includono ossidi di silicio, alluminio e ferro. Non possono essere utilizzati i residui in sostituzione del cemento o come aggiunta idraulica, ma si adoperano le ceneri ottenute dal processo di combustione dei residui stessi, infatti queste ultime destano particolare interesse per applicazioni inerenti i calcestruzzi.

Quindi, per poter utilizzare la pula di riso nella produzione di calcestruzzi è richiesta la trasformazione della stessa in cenere e la macinazione di queste in particelle di dimensioni opportune.

Da una tonnellata di riso si ricavano 200 kg di pula di riso e da questi circa 40 kg di cenere. Per cui depositare la pula, dopo la lavorazione del riso, diviene un problema di non facile soluzione perché essa possiede una densità molto bassa e richiede ampi spazi per la conservazione.

Inoltre a causa dell'irrilevante contenuto proteico non può essere utilizzata come cibo per gli animali. L'elevato contenuto di lignite e di polvere non la rende vantaggiosamente utilizzabile per la produzione di cellulose.

Nella conversione della pula di riso in cenere, il processo di combustione rimuove il materiale organico e lascia un residuo ricco di silice. Alcuni trattamenti termici della silice presente nella pula provocano trasformazioni strutturali che influenzano sia la capacità pozzolanica della cenere che la sua macinabilità.

Nella silice è individuato il maggior costituente chimico della cenere che, grazie a particolari condizioni del processo di combustione, può reagire con la calce per produrre silicati di calcio idrati.

Al fine di ottenere silice amorfa, normalmente la cenere di pula di riso necessita di una cottura della pula ad una temperatura relativamente bassa, 500-700 °C, che è sufficiente per bruciare il carbonio presente nella pula. Essa contiene l'80-95% di SiO₂ in forma non cristallina ed ha una microstruttura caratteristica a nido d'ape (microporosa) derivante dalla pula stessa.

Amalgamando la cenere di pula di riso con cemento Portland e gesso si possono realizzare cementi di miscela, ottenendo aumenti di resistenza a compressione all'aumentare della finezza della cenere.

E' stato osservato che malte e calcestruzzi realizzati con cementi di miscela e cenere di pula di riso hanno maggiore resistenza in ambienti acidi rispetto a quelli realizzati con cemento Portland o altri cementi di miscela (Mehta, 1978).

L'aggiunta di cenere di pula di riso al cemento Portland favorisce una migliore rifinitura dei pori della pasta cementizia e/o una trasformazione dei pori, larghi e permeabili, in pori più piccoli ed impermeabili.

A causa dell'elevata superficie specifica della cenere di pula di riso, il calcestruzzo contenente cenere di pula di riso richiede maggiori dosaggi di superfluidificante e di additivo aerante, rispetto ai calcestruzzi di riferimento a base di cemento Portland e silica fume, per assicurare lo stesso slump e lo stesso contenuto d'aria.

I calcestruzzi a base di cenere di pula di riso hanno resistenze a compressione a 180 giorni minori rispetto a quelli con la silica fume. I calcestruzzi a base di cenere di pula di riso mostrano eccellenti comportamenti a cicli di gelo e disgelo. La resistenza ai sali disgelanti è simile a quella dei calcestruzzi a base di cemento Portland (Zhang et al., 1996).

2.6.6 Metacaolino

Le argille sono costituite da piccole particelle (per definizione più piccole di 2 µm) sulla cui superficie sono legate molecole d'acqua per mezzo di cariche superficiali. Le particelle sono costituite principalmente da minerali argillosi provenienti dalla decomposizione di componenti meno stabili delle rocce originarie.

L'argilla reagendo con la calce sviluppa una certa resistenza e stabilità, che però è talmente piccola da precludere l'utilizzo della stessa argilla in sostituzione del cemento Portland. Tuttavia, la calcinazione ad opportuna temperatura può promuovere significativamente l'attività pozzolanica dell'argilla.

I componenti reattivi delle argille calcinate derivano dall'eliminazione delle molecole d'acqua. Questo processo porta alla formazione di un materiale collassato quasi amorfo dotato di una certa reattività in presenza di calce.

La reattività dell'argilla calcinata con la calce dipende dalla natura quasi amorfa della struttura collassata; esiste, perciò, una temperatura ottimale di calcinazione per ogni tipo di argilla. Oltre alla temperatura, si è visto che influisce sull'attività pozzolanica anche il tempo di calcinazione.

Sembra che l'esposizione prolungata alle alte temperature promuova la ricristallizzazione e quindi diminuisca l'attività pozzolanica.

Il metacaolino è una pozzolana reattiva prodotta dall'attivazione termica del minerale caolino (Caldarone et al., 1994). La temperatura ottimale di calcinazione è di 700 °C. Esso è disponibile con un alto grado di purezza (maggiore del 90%) e può reagire in un rapporto maggiore di 1:1 con idrossido di calcio per formare composti cementizi.

Quando il metacaolino è utilizzato in parziale sostituzione del cemento nel calcestruzzo, anche se diminuisce la lavorabilità, produce significativi incrementi delle resistenze a brevi stagionature ed aumenta le resistenze a lungo termine (Zhang et al., 1995; Wild et al., 1996).

Questo perché agisce sia da filler, accelerando l'idratazione iniziale del cemento, sia consumando rapidamente, nel primo periodo di stagionatura, l'idrossido di calcio, prodotto dall'idratazione del cemento, per produrre prodotti cementizi aggiuntivi. Inoltre il metacaolino incrementa la resistenza alla reazione alcali aggregato, previene efflorescenze e favorisce un progressivo accrescimento della resistenza agli attacchi acidi e solfatici (Khatib et al., 1998).

Per la sua particolare colorazione bianca il metacaolino viene utilizzato nella realizzazione di calcestruzzi ad alte prestazioni a base di cemento bianco allo scopo di ottenere ottimi risultati estetici oltre che elevate resistenze meccaniche.

2.6.7 Filler Calcareo

Il calcare finemente macinato, viene utilizzato per il confezionamento dei calcestruzzi come filler, cioè materiali che, grazie alla loro granulometria, vengono utilizzati come inerti finissimi i quali vanno ad occupare gli spazi lasciati liberi dai granuli di cemento rendendo la matrice cementizia molto compatta.

I fillers possono essere inerti o leggermente reattivi. Il calcare finemente macinato fa parte del I tipo.

Come tutti i fillers, il calcare macinato per essere utilizzato per il confezionamento di calcestruzzi non deve far aumentare la richiesta di acqua in maniera sostanziale, e non deve contenere sostanze capaci di ridurre il grado di durabilità del calcestruzzo armato.

Nello specifico il filler calcareo deve avere i seguenti requisiti.

- tenore di carbonato di calcio $\geq 75\%$ in massa,
- tenore di argilla (adsorbimento del blu di metilene) ≤ 1.20 g/100g;
- tenore di materiale organico (TOC) $\leq 0,20\%$ in massa.

I calcare macinato può essere utilizzato ad esempio per produrre cementi Portland a ridotto tenore di clinker, al fine per esempio di ridurre il calore di idratazione (minor tenore di alluminato tricalcico e silicato tricalcico), o la sensibilità all'attacco solfatico (minor tenore di alluminato tricalcico) e al dilavamento (minor tenore di calce).

2.6.8 Zeoliti

Le zeoliti sono dei materiali appartenenti ad un gruppo di alluminosilicati idrati di metalli alcalini o alcalini-terrosi, caratterizzati dal fatto che le molecole d'acqua contenute (acqua zeolitica) sono debolmente legate e possono venire eliminate con il riscaldamento, senza che il reticolo cristallino si deformi e poi venire riassorbite. Si presentano in cristalli monometrici, rombici o monoclini con abito cubico, lamellare o fibroso, o in masse pulverulente. Sono di colore variabile, dal bianco, al rosa, al rosso, al bruno e hanno un peso specifico basso. Fondono facilmente gonfiandosi e ribollendo per la perdita d'acqua (da cui il nome: dal greco zein, bollire e lithos, pietra), e sono facilmente attaccabile dagli acidi. Si trovano in geoidi o in spaccature di rocce eruttiveo metamorfiche, quali graniti e basalti, si formano direttamente da soluzioni acquose o per alterazione dei feldispadi e feldispatoidi. Sono denominati zeoliti artificiali quelle

sostanze amorfe o cripto cristalline che si ottengono per fusione di miscele di silicato di alluminio con soda ed eventualmente silice, aventi proprietà simili alle zeoliti naturali.

CAPITOLO 3

ZEOLITI NATURALI E SINTETICHE

3.1 Premessa

Nel 1756 Cronsted scoprì e descrisse un minerale appartenente alla famiglia degli allumino-silicati, la stilbite.

Durante i suoi studi osservò che tale minerale, in conseguenza di un rapido riscaldamento dava l'impressione di bollire con eliminazione dell'acqua di cristallizzazione. A questo minerale assegnò il nome di zeolite (dal greco ZEO: bollire e LITHOS: pietra) (Davis et al., 1992).

Tra la scoperta di Cronsted e la prima applicazione industriale delle zeoliti come catalizzatori (1959), sono passati circa due secoli. Questo periodo così lungo è dovuto principalmente alla relativa scarsità di zeoliti naturali, con particolari proprietà (Chen et al., 1988).

Le zeoliti naturali scoperte successivamente sono circa cinquanta. Molte di queste sono state poi sintetizzate in laboratorio accanto a molte altre che non trovano alcuna controparte in natura.

Le zeoliti sono tra i più importanti minerali silicati secondari formati nelle rocce sedimentarie di origine vulcanica (Ming et al., 1989). Si trovano comunemente nei suoli salini e/o alcalini, sedimenti marini profondi e vicino alla costa, depositi di laghi evaporati salini e/o alcalini, e suoli vulcanici idrotermali e/o alterati dall'acqua. I depositi sono così grandi che i Romani utilizzarono il risultante tufo come materiale da costruzione (Mumpton, 1978).

Il fatto che le zeoliti siano associate ad una varietà di ambienti geologici e che gli strati contenenti zeolite, forniscono sufficiente resistenza da essere usati come materiale da costruzione (Schuiling).

3.2 Zeoliti

Le zeoliti sono una famiglia complessa di allumino silicati aventi una struttura tridimensionale. Per definizione, esse sono tectosilicati. Tuttavia, a differenza di quarzo e feldspati, che sono anche essi dei tectosilicati, le zeoliti formano strutture molto aperte contenenti canali e cavità. Come risultato, le zeoliti hanno densità che variano da 2.0 a 2.2 g/ml rispetto alle strutture più compatte di quarzo e feldspati con densità di circa 2.6 g/ml (Ming et al., 1989). Le strutture aperte nelle zeoliti sono normalmente occupate da alcali e cationi alcalino-terrosi ed assorbono facilmente molecole d'acqua. Se i canali e le cavità sono continui (per esempio non isolati) i cationi sono detti essere scambiabili, e le molecole d'acqua possono essere sorbite/desorbite in modo reversibile. A causa di queste caratteristiche strutturali e chimiche, le zeoliti hanno proprietà uniche e ben note come scambio ionico, assorbimento selettivo e catalisi (Vaughan, 1978).

La cella unitaria della struttura tectosilicate è il tetraedro siliceo (SiO_4)⁴⁻. Ogni tetraedro può essere visto come un gruppo di quattro atomi di ossigeno impacchettati con un atomo di silicio occupante uno degli spazi al centro del gruppo. L'atomo di Si è invisibile nella figura 4.1 a) e b), ma si vede nella c). Se ogni atomo di ossigeno del tetraedro è messo in modo da formare un legame con un altro atomo di ossigeno di un tetraedro vicino, è possibile assemblare i tetraedri in una varietà di modi. Variando l'angolo di legame ed il grado di impacchettamento, è possibile ricavare le varie strutture silicee (SiO_2) (Evans, 1979). Per esempio, si possono vedere le strutture del quarzo α e quarzo β riportate in figura 4.2.

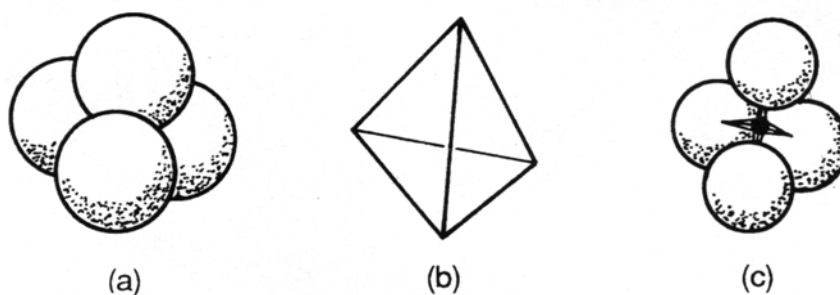


Fig. 3.1 - Schematizzazione del singolo tetraedro siliceo:
a) modello di struttura concettualmente chiusa dell'ossigeno; b) schema a linee; c) modello sfere ed aste.

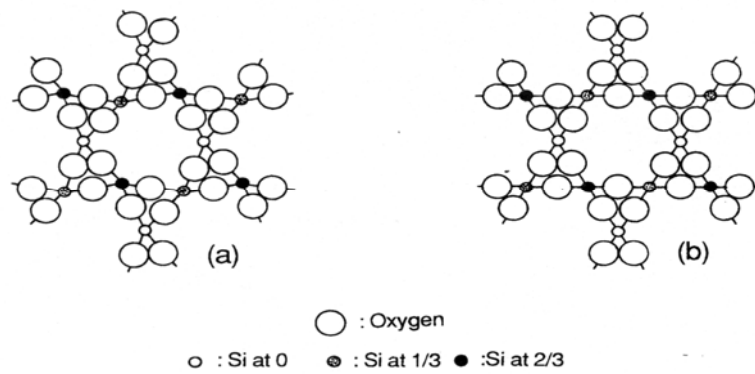


Fig. 3.2 - Rappresentazione schematica della relazione tra: quarzo a) a basse temperature e b) ad alte temperature.

Usando lo stesso approccio, è anche possibile vedere come sono ricavati i tectosilicati contenenti cationi aggiuntivi (per esempio, feldspati e zeoliti). Al fine di mantenere la neutralità di carica, un atomo di silicio può essere sostituito con una coppia di cationi di Al, lo ione alluminio occupa il sito tetraedrale ed il catione alloggia in un canale o in una cavità nella struttura. Poiché i cationi hanno diverse dimensioni e cariche, può essere derivata una vasta varietà di strutture. Buerger (1954) ha chiamato queste strutture: “strutture silicee imbottite (stuffed)”. I feldspati possono essere visti come derivati dalla silice nel seguente modo:

$4\text{SiO}_2 = \text{Si}_4\text{O}_8$. Sostituendo una coppia NaAl con un atomo di Si si ha $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, che è la composizione del comune feldspato noto come albite (Deer et al., 1967). La clinoptilolite $[(\text{Na},\text{K})_6\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}]$ è una delle più comuni zeoliti (Hay, 1978). Essa si può ricavare nel seguente modo: $36\text{SiO}_2 = \text{Si}_{36}\text{O}_{72}$. A questo punto, sei coppie di NaAl sostituiscono sei atomi di Si. Si noti che la formula della clinoptilolite contiene anche 20 molecole di acqua. Questa è acqua debolmente legata che è assorbita dalla struttura. L’acqua qui è altamente mobile ed è attratta dagli ioni alcali positivamente caricati che occupano i siti nei canali vicino al tetraedro di Al sostituito (Goliardi et al., 1985). Uno schema ad otto e dieci elementi in cerchio che formano i canali nella clinoptilolite è riportato nella figura 4.3.

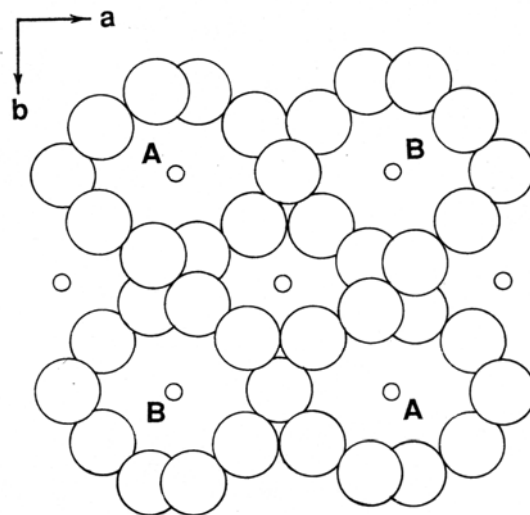


Fig. 3.3 - Schema ad otto e dieci elementi in cerchio che formano i canali nella clinoptilolite. Differente forma dei canali A e B

3.3 Caratteristiche pozzolaniche

In aggiunta alle precedentemente menzionate caratteristiche comuni alle zeoliti (scambio ionico, assorbimento e catalisi), le zeoliti sono state anche usate, per scelta o inavvertitamente, nei materiali a base cementizia sin dal tempo dei Romani. Due zeoliti molto comuni in Italia associati con i depositi di cenere vulcanica sono la chabazite $[\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}\cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ e la phillipsite $[\text{K}_2(1/2\text{Ca},\text{Na})_4\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ (Sersale, 1978). Sono entrambi prodotti dell'alterazione di ceneri vulcaniche ricche in alluminosilicati che sono state trasformate dalla pioggia e/o dall'acqua nel terreno durante diagenesi di lento grado. Il lieve aumento della temperatura e della pressione durante la bassa sepoltura ha convertito la cenere in un tufo ricco di zeolite (Sersale, 1958; Sersale, 1983). In aggiunta alle proprietà prima menzionate, il carattere aperto della loro struttura tende a dare zeoliti ad elevata superficie specifica con alta attività pozzolanica (Sersale et al., 1985a; Sersale et al., 1985b; Sersale et al., 1987). Sersale e Frigione hanno mostrato che l'uso di tufo zeolitico nel calcestruzzo aiuta ad eliminare l'espansione alcali-aggregati (Sersale et al., 1987). Infatti, le zeoliti sono così reattive che prontamente consumano l'eccesso di idrossido di calcio prodotto dall'idratazione del cemento Portland (Sersale, 1983).

Attualmente in Italia le zeoliti naturali sono utilizzate dalle cementerie come aggiunte per la produzione di cementi pozzolanici.

3.4 Proprietà di calcestruzzi contenenti zeoliti naturali

Ci sono due tipi di calcestruzzi zeolitici, uno è il calcestruzzo realizzato con cementi pozzolanici prodotti con zeolite naturale (circa il 30 % in peso), l'altro calcestruzzo è ottenuto utilizzando cemento Portland ed aggiungendo zeolite macinata all'atto della miscelazione. E' stato prodotto calcestruzzo con basso rapporto acqua/cemento ($a/c = 0,28-0,35$), dove il cemento Portland è stato parzialmente sostituito da zeolite naturale macinata (dal 5 al 10 % in peso). La resistenza del calcestruzzo così ottenuto è stata più alta di quella del calcestruzzo di riferimento di circa il 10-15 %. Anche le altre proprietà del calcestruzzo sono risultate migliorate (Naiqian et al., 1988; Naiqian et al., 1990).

In un'applicazione particolare, una zeolite naturale, opportunamente modificate, è stata utilizzata per prolungare l'azione di un agente fluidificante per la produzione di calcestruzzi HPC a base di *silica fume* (Sammy et al., 2000). Nei pori della zeolite, grazie al potere adsorbente-desorbente, sono state allocate opportune quantità di superfluidificante. L'aggiunta della zeolite così modificata ha mantenuto costante la lavorabilità del calcestruzzo HPC per circa 2 ore ed ha migliorato leggermente le proprietà meccaniche (Sammy et al., 2000).

3.4.1 Calcestruzzi con cementi pozzolanici a base di zeolite naturale

Come detto precedentemente, le zeoliti hanno una struttura con molte cavità e canali. Se nel calcestruzzo realizzato con cemento a base di zeolite è usata un'elevata quantità d'acqua, questa viene assorbita e mantenuta nel processo di trasporto, messa in opera e vibrazione. Invece, se il calcestruzzo con un alto rapporto acqua-cemento è realizzato con cemento Portland o cemento d'altoforno, si può avere segregazione e stratificazione.

Le densità dei cementi con zeolite, d'altoforno e Portland sono rispettivamente 2.65, 3.00 e 3.15 g/ml. Se la stessa quantità in peso di cemento è utilizzata nel calcestruzzo, il cemento con minore densità produce più volume di pasta cementizia e può legare meglio gli aggregati e riempire completamente i pori nel calcestruzzo. Allo stesso tempo la zeolite può assorbire l'acqua nella sua struttura ed espandersi, aumentando la viscosità della pasta di cemento e mantenendo l'omogeneità senza segregazione o stratificazione.

Da prove effettuate su calcestruzzi realizzati con cemento contenente il 40 % di zeolite e con cemento d'altoforno, è stato trovato che, a pari condizioni, le resistenze meccaniche a compressione del calcestruzzo realizzato con cemento con zeolite sono maggiori di

quelle del calcestruzzo realizzato con cemento d'altoforno, alle brevi e alle medie stagionature.

3.5 Zeoliti Sintetiche

Le zeoliti sono alluminosilicati di metalli alcalini ed alcalino-terrosi di aspetto cristallino e microporoso. La loro struttura è estremamente regolare e si presenta costituita da un reticolo ad estensione infinita di atomi di silicio ed alluminio tetraordinati con atomi di ossigeno¹.

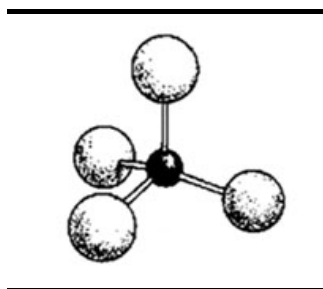


Fig. 3.4 - Unità tetraedrica.

L'ossigeno apicale è condiviso tra tetraedri adiacenti in maniera tale che il rapporto O/T, dove T rappresenta l'atomo tetraedrico, è sempre pari a due. I tetraedri così legati vanno a costituire le unità di costruzione secondaria (SBU)² e la flessibilità delle connessioni tra i tetraedri consente una grande varietà di strutture tridimensionali.

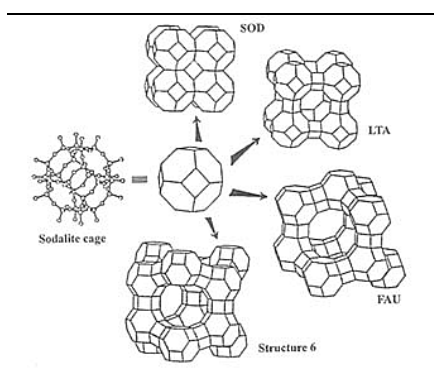


Fig. 3.5 - Costruzione delle unità di alcuni reticoli zeolitici.

¹ D. W. BRECK, *Molecular Sieves Zeolites*, New York, John Wiley & Sons, 1973.

² W. M. MEIER AND D. H. OLSON, *Atlas of Zeolite Structure Types*, Structure Commission of the international Zeolite Association, 4th revised edition, London, Elsevier, 1996, p. 5.

La sequenza di SBU dà luogo alle unità terziarie di costruzione ed il blocco poliedrico generato evidenzia le caratteristiche cavità, gabbie e canali della Zeolite³, di dimensioni confrontabili con quelle molecolari.

I reticoli cristallini sintetizzati in forma puramente silicea originano strutture elettricamente neutre, ma la presenza di atomi di alluminio al centro dei tetraedri, conferisce al reticolo una carica netta negativa dovuta alla minore valenza dell'alluminio stesso.

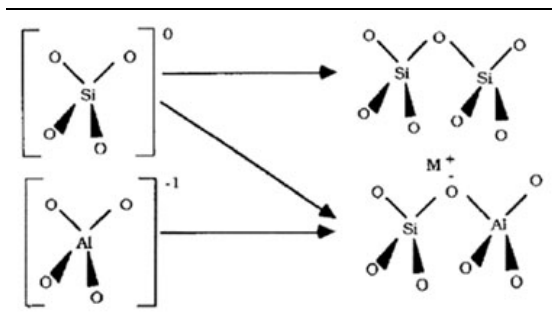


Fig. 3.6 - Bilanciamento elettronico di SiO_4 e $(\text{AlO}_4)^-$.

Tale carica negativa, una per ogni unità $(\text{AlO}_4)^-$, deve essere controbilanciata da specie cationiche, i cosiddetti controioni.

Generalmente i cationi utilizzati a tale scopo sono elementi del primo e secondo gruppo (metalli alcalini ed alcalino-terrosi), ma nelle zeoliti sintetiche tale ruolo può essere affidato ad altri tipi di cationi inorganici, come i metalli di transizione, od organici come sali di ammonio quaternari ed ammine.

I controioni presenti nella struttura non devono essere necessariamente isoelettronici con Si^{4+} e Al^{3+} , occupando siti tetraedrici e legandosi covalentemente al reticolo, ma possono posizionarsi nelle cavità della struttura in modo da interagire con l'ambiente in cui la zeolite è immersa per dare scambio ionico o reazione chimica.

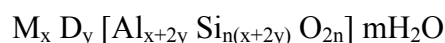
Le cavità ed i canali delle zeoliti sono generalmente occupati da molecole d'acqua, intrappolate e non stabilmente legate, pertanto l'acqua zeolitica può essere allontanata facilmente mediante riscaldamento (200-300 °C) e riassorbita se si pone la zeolite in ambiente umido. Il passaggio dalla fase idrata alla fase anidra non porta mutamenti nel reticolo e ciò conferma che l'acqua zeolitica è distribuita nei canali ma non partecipa all'edificio cristallino.

³ A. DYER, *An introduction to Zeolite Molecular Sieves*, Chichester, Wiley, 1988.

Gli studi di A. Damour portarono alle conclusioni che, una volta allontanata l'acqua, i canali della zeolite restano vuoti⁴ e successivamente Friedel osservò che la struttura della zeolite disidratata è aperta⁵. Di conseguenza una zeolite può essere considerata un setaccio molecolare poiché nella forma disidratata è capace di trattenere, al suo interno, molecole di dimensioni inferiori al diametro dei canali, separando così miscele fluide di componenti di diverse dimensioni molecolari.

3.5.1 Definizione chimica

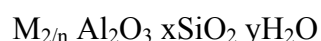
Le Zeoliti possono essere definite chimicamente attraverso la formula empirica⁶



in cui:

- n è il numero di tetraedri presenti nella cella unitaria,
- il gruppo $[Al_{x+2y} Si_{n(x+2y)} O_{2n}]$ costituisce l'intelaiatura del reticolo cristallino,
- M e D sono i controioni mono e bivalenti,
- m sono le molecole di acqua di costituzione.

In alternativa, la definizione espressa in termini di ossidi⁷, sempre in riferimento alla cella unitaria, è



in cui

- M è il catione e n la sua valenza.

Nella struttura delle zeoliti non sono mai presenti legami Al-O-Al perciò ogni tetraedro di alluminio è legato a quattro tetraedri di silicio.

Ciò conferisce alla struttura zeolitica un'ottima stabilità dovuta al mancato addensamento di cariche negative, inoltre, essendo il legame Si-O molto più forte del legame Al-O, la stabilità chimica e termica aumenta all'aumentare del rapporto SiO_2/Al_2O_3 passando dai 400-500°C per le zeoliti a basso e medio rapporto ai 1000°C per zeoliti siliciche.

⁴ A. DAMOUR, *Ann. Mines* 17, 1844, p. 191.

⁵ G. FRIEDEL, *Bull. Soc. Franc. Mineral. Cristallogr.* 19, 1896, pp. 94-118.

⁶ R. SZOSTAK, *Handbook of Molecular Sieves*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1984.

⁷ D. W. BRECK, *Molecular Sieve Zeolites*, cit.

Secondo la notazione di Flaningen⁸ si definiscono zeoliti a basso rapporto quelle con $1 < \text{Si/Al} < 2$, a rapporto intermedio quelle con $2 < \text{Si/Al} < 5$.

All'aumentare di tale rapporto aumentano proprietà quali l'acidità e l'idrofobicità mentre diminuisce la capacità di scambio ionico essendo essa legata alla quantità di atomi di alluminio presenti. In virtù di tali proprietà le zeoliti a basso e medio rapporto Si/Al sono utilizzate per rimuovere l'acqua da componenti organici e compiono efficienti separazioni e catalisi su correnti secche. Al contrario, le zeoliti ad alto rapporto, sintetizzate recentemente⁹, rimuovono componenti organici da correnti acquose e compiono catalisi in presenza di acqua¹⁰.

3.5.2 Proprietà ed applicazioni

In relazione alla loro struttura caratteristica, le zeoliti presentano proprietà peculiari, di cui vengono elencate le principali.

- La *microporosità*. I canali delle zeoliti, avendo dimensioni regolari, permettono il setacciamento molecolare accettando al loro interno molecole di dimensioni inferiori al diametro medio dei canali e rigettando le molecole più grosse. Tutta la superficie interna del materiale è disponibile alla catalisi quindi la microporosità offre una superficie maggiore rispetto ai catalizzatori convenzionali nei quali solo la parte esterna è accessibile ai reagenti.
- Lo *scambio ionico*. La mobilità dei controioni risulta utile sia per la modificazione delle proprietà delle zeoliti, tramite la variazione del diametro utile dei canali, sia per l'utilizzazione delle zeoliti in trattamenti delle acque basati su scambio ionico.
- La *stabilità termica*. Alcune zeoliti risultano stabili termicamente anche oltre gli 800°C.
- La *versatilità* delle zeoliti in termini *di composizione e struttura*. Sono state sintetizzate zeoliti in cui sia il silicio che l'alluminio sono stati sostituiti da altri atomi quali Ga, Ge, B, P, Ti, As, Fe, etc. ed i cationi inorganici con i cationi organici. I prodotti presentano strutture di dimensioni e geometrie molto diverse e di ampie applicazioni.

⁸ FLANINGEN, E. M., *In Proc. 5th Int. Conf. Zeolites Rees*, L. V. C. Ed., Heyden London, 1980, p. 760.

⁹ GROSE R. W., MIFLANGEN E., *U. S. Patent 4,061,724*, 1977.

¹⁰ DAVIS M., LOBO R. F., *Chemical Matter vol. 4 n.ro 4*, 1992, p. 756.

Come conseguenza delle loro proprietà le zeoliti presentano una vasta gamma di applicazioni. Nel settore della detergenza, per esempio, viene sfruttata la proprietà dello scambio ionico.

La zeolite A, infatti, presente nei detersivi sotto forma di microcristalli cubici con vertici arrotondati, scambia velocemente i propri ioni con Ca^{++} e Mg^{++} disciolti nell'acqua abbattendone la durezza. La phillipsite e la chabazite risultano particolarmente efficienti per l'abbattimento dell'ammonio¹¹ delle acque di rifiuto urbane e sempre allo scambio ionico è legato l'utilizzo delle zeoliti nel campo della fertilizzazione dei suoli.

Infine si possono annoverare gli impieghi di zeolite nello smaltimento di contaminanti radioattivi¹² e nell'abbattimento dei metalli pesanti presenti nelle acque di rifiuto industriali.

| Applicazioni | Vantaggi |
|---|--|
| Detergenza | <i>Rimozione di ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} attraverso Scambio selettivo.</i> |
| Rimozione di NH_4^+ da acque di rifiuto di acquacoltura | <i>Selettività per l'ammonio rispetto a cationi interferenti.</i> |
| Correzione e fertilizzazione dei suoli | <i>Scambio con nutrienti delle piante quali NH_4^+ e K^+ con rilascio lento.</i> |
| Integrazione della dieta di animali ruminanti. | <i>Riduzione della concentrazione di NH_4^+ attraverso scambio selettivo.</i> |
| Rimozione di Cs^+ e Sr^{2+} e radioisotopi; stoccaggio di rifiuti radioattivi | <i>Stabilità nei confronti delle radiazioni ionizzanti; bassa solubilità; alta selettività.</i> |
| Rimozione e recupero di metalli. | <i>Alta selettività per molti metalli.</i> |

*Tab. 3.1 - Applicazioni delle zeoliti basate sullo scambio ionico*¹³.

Il sistema regolare di canali e cavità è anche il motivo dell'uso delle zeoliti in vari processi industriali di separazione e purificazione. La purificazione dipende in generale dalla selettività delle zeoliti per molecole polari o polarizzabili, come acqua, CO_2 e composti dello zolfo mentre la separazione si basa sul principio del setacciamento molecolare.

¹¹ R. A. LEUADO, *Proc 6th Int. Zeolites*, Reno USA, Butterworths, , 1983.

¹² J. D. SHERMAN, *Zeolites: Science and Technology*, Nato Asi Series E: Applied Science N. 80, Martinus Nijhoff, 1980.

¹³ R. Aiello, *Le Zeoliti: nuovi materiali per le tecnologie avanzate*, Scienza e Governo, nuov. Tecn.1993.

La zeolite A nella sua forma potassica, dove il potassio ha un ingombro sterico maggiore, è principalmente utilizzata nei processi di essiccamento del gas di cracking al fine di prevenire il co-adsorbimento di etilene e di idrocarburi più pesanti insaturi.

La natura e la carica del catione scambiabile condizionano il potere adsorbente della zeolite in quanto influenzano l'apertura dei pori, così come la presenza di difetti reticolari costituisce un impedimento all'adsorbimento.

| Purificazioni | |
|-----------------------------------|--|
| Essiccamento | <i>Gas naturale</i> <i>Gas di cracking</i> <i>Vetro camera</i> |
| Abbattimento CO ₂ | <i>Gas naturale</i> <i>Impianti criogenici di separazione dell'aria</i> |
| Abbattimento composti dello zolfo | <i>Purificazione gas naturale e gas di petrolio liquefatto</i> |
| Controllo inquinamento | <i>Abbattimento di SO₂ e di NO₂ da effluenti gassosi</i> |
| Separazioni | |
| Normali/iso paraffine | Olefine |
| Xileni | O ₂ dell'aria |

Tab. 3.2 - Applicazioni delle zeoliti basate su adsorbimento e setacciamento molecolare¹⁴.

Anche il rapporto Si/Al può influenzare tale proprietà perché la presenza di alluminio nel reticolo aumenta l'idrofilicità e quindi la difficoltà di attivare la zeolite. La catalisi, infine, rappresenta l'applicazione industriale più studiata e consolidata. Le caratteristiche che giocano un ruolo importante sono la notevole selettività come setacci molecolari ed un'elevata superficie specifica.

La catalisi zeolitica trova largo impiego nell'industria petrolchimica per i processi di idrocracking, cracking catalitico e conversione del metanolo ad olefine leggere. Su essa si basano inoltre importanti reazioni organiche come l'alchilazione di areni, fenoli ed ammine aromatiche.

Le zeoliti sono in grado di dare origine a diversi tipi di catalisi : acida, metallica, basica e bifunzionale. La catalisi acida di Brönsted si verifica quando i cationi vengono sostituiti

¹⁴ R. Aiello, *Le Zeoliti: nuovi materiali per tecnologie avanzate*, cit. 31.

totalmente o parzialmente da protoni. L'attività catalitica dipende sia dalla qualità dei siti acidi che dal loro numero mentre la forza acida è in relazione alla natura dell'atomo trivalente.

La catalisi metallica si ha quando i cationi sono dei metalli e vengono introdotti nella struttura per scambio ionico od impregnazione. La catalisi basica segue la neutralizzazione dei siti acidi di Brønsted e l'immissione di idrossidi alcalini tramite impregnazione. Infine la catalisi bifunzionale è dovuta alla presenza contemporanea di un sito acido ed un sito metallico.

La selettività offerta dalle zeoliti è una selettività di forma e si basa sull'adattamento dei reagenti, degli stati di transizione e dei prodotti all'interno delle cavità e dei canali interni al cristallo.

La dimensione e la forma dei canali e delle gabbie intracristalline può infatti impedire l'ingresso a determinate molecole della miscela reagente, può impedire la diffusione di molecole di prodotto indesiderato formatosi all'interno delle cavità e può indirizzare la reazione verso precise configurazioni dello stato di transizione¹⁵.

3.5.3 Sintesi delle zeoliti

Le zeoliti vengono sintetizzate in ambiente idrotermale a temperature generalmente non superiori ai 350°C, in condizioni di pressione autogena ed in presenza di eccesso di acqua.

Alcuni particolari prodotti richiedono temperature maggiori come la ferrierite, 375°C, e la mordenite, 430°C¹⁶, ma la maggior parte delle zeoliti sintetizzate per interessi industriali si ottiene a circa 100°C.

La struttura e le proprietà delle zeoliti dipendono fortemente dalla natura chimica e fisica della miscela di reazione, dal tipo di catione o di templante organico, dalla temperatura e pressione del sistema di sintesi, dal tempo di reazione e di aging della miscela, dall'ordine di aggiunta dei reagenti e dall'agitazione.

¹⁵ S.M. CSICSERY, *ACS Monograph*, 171, 1976, p.680.

¹⁶ R. M. BARRER, *Hydrothermal Chemistry of Zeolites*, Academic Press, New York, 1982.

3.5.3.1 Natura e composizione della miscela reagente

La prima fase del processo di sintesi comprende la preparazione di un gel ottenuto combinando una fonte di silice ed una fonte di allumina in acqua e in condizioni di pH basici.

I costituenti principali possono essere silice solida e idrossido di alluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$ o silice solida e un alluminato solubile. Al gel vengono aggiunti additivi quali i cationi alcalini o alcalino-terrosi, introdotti sotto forma di ossidi, idrossidi o sali.

La miscela generata subisce la coprecipitazione delle specie allumino-silicalitiche e si forma un gelo costituito da una fase liquida dispersa in una fase solida in equilibrio con la fase liquida madre. La composizione della miscela iniziale influenza sia la velocità di crescita dei cristalli che la natura del prodotto finale.

I fattori principali da considerare sono:

- Il rapporto silice/allumina,
- la concentrazione di ioni OH^- ,
- la natura dei cationi organici ed inorganici,
- il contenuto di acqua.

Il rapporto silice/allumina della miscela di sintesi governa in modo diretto la quantità di silice e allumina del prodotto finale e la struttura del reticolo cristallino. Alcune zeoliti cristallizzano per intervalli ristretti di valori di tale rapporto, come la zeolite A o X ed Y ad alti contenuti di alluminio.

Altri materiali possono cristallizzare in ampi intervalli di composizione e solo la sodalite si ottiene per l'intero intervallo di variazione. L'aumento del rapporto silice/allumina comporta un aumento della resistenza acida, della stabilità termica e dell'idrofobicità. Di contro, diminuisce la capacità di adsorbimento di sostanze polari e la quantità di cationi introducibili nella struttura.

La concentrazione di ioni OH^- influenza la natura delle specie (monomeriche o polimeriche) presenti nella miscela di reazione, la concentrazione dei composti silico-alluminati disciolti, la carica di queste specie e la velocità di idrolisi o di scambio tra la fase solida e liquida. La quantità di ioni OH^- può influenzare il tempo di nucleazione poiché favorisce la dissoluzione dei reagenti e agisce da agente direzionante di struttura. Essa, inoltre, è responsabile del pH della soluzione, il quale può portare alla formazione di composti molto diversi.

In molti sistemi, la cristallizzazione della zeolite è accompagnata da una marcata variazione di pH che può essere utilizzata per monitorare il processo di cristallizzazione stesso e, generalmente, il pH della miscela aumenta durante la crescita dei cristalli.

Il catione inorganico aggiunto alla miscela di reazione ha un ruolo importante nel bilanciamento della carica del reticolo generata dall'incorporazione degli atomi di alluminio nella struttura. La diversa natura dei cationi inorganici può regolare il contenuto di alluminio¹⁷ nel prodotto finale e può variare la F. D. della zeolite. Gioca un ruolo importante come agente strutturante e può alterare la morfologia dei cristalli zeolitici favorendo la nucleazione di nuovi cristalli o favorendo la crescita lungo una direzione. Infine, influenzano notevolmente il tempo di induzione¹⁸ e la cristallinità del prodotto.

Il catione organico facilita il controllo della composizione delle fasi ottenute. Agisce come modificatore del gel reagente favorendo la formazione di prodotti a più alto rapporto Si/Al rispetto ad un sistema privo di catione organico. Le grandi dimensioni e la debole intensità di carica favoriscono, infatti, la presenza del silicio neutro rispetto all'alluminio carico.

La loro funzione di templanti consiste nel fornire al sistema una matrice attorno alla quale si dispongono i tetraedri, nella fase di nucleazione, che portano all'accrescimento della struttura zeolitica¹⁹.

Essi interagiscono chimicamente con gli altri componenti del gel alterando il carattere del gel stesso, per esempio variando l'alcalinità. Interagiscono fisicamente modificando i processi di dissoluzione, le proprietà di trasporto tra le fasi ed il loro comportamento.

3.5.3.2 Temperatura, pressione e condizioni del sistema di sintesi

La temperatura condiziona la sintesi agendo sulla natura della fase zeolitica. Le alte temperature favoriscono la formazione di prodotti a partire da fasi più dense. Influisce sulla cinetica di cristallizzazione ed in particolare sul tempo di induzione che diminuisce all'aumentare di T.

Inoltre essa velocizza il passaggio attraverso le fasi metastabili delle specie che si formano nel processo di sintesi.

¹⁷ R. M. BARRER, *Hydrothermal Chemistry of Zeolites*, Academic Press, London, 1982.

¹⁸ A. ARAYA, B. M. LOWE, *Zeolites*, 4, 280, 1984.

¹⁹ B. M. LOCK, T. R. CANNON, C. A. MESSINA, *Zeolites*, 3, 1988, p. 282.

La pressione non è molto importante, ma può influenzare i sistemi in cui sono presenti composti volatili variando il pH della miscela reagente e la concentrazione delle specie disciolte.

Il tempo di reazione diventa un parametro fondamentale quando il prodotto zeolitico desiderato è una specie metastabile.

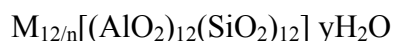
Ruolo importante ha l'ageing della miscela di reazione a temperatura ambiente o comunque inferiore alla temperatura di reazione. Il periodo di tempo che intercorre tra la preparazione e l'attivazione della reazione promuove la formazione di specie precursori, nuclei metastabili, delle zeoliti²⁰. Un diverso tempo di ageing della stessa miscela di sintesi può portare alla formazione di prodotti differenti. La formazione di specie che promuovono la cristallizzazione delle zeoliti può essere influenzata anche dall'ordine di aggiunta dei reagenti che interagiscono tra di loro appena messi in contatto.

La riproducibilità delle sintesi richiede necessariamente lo stesso ordine di aggiunta.

L'agitazione del sistema favorisce la diffusione e la collisione delle specie che si formano durante la sintesi e riduce i gradienti termici nel sistema.

3.6 Zeolite LTA.

La zeolite LTA è un alluminato sintetico cristallizzato nel sistema cubico, la cui cella unitaria ha la seguente composizione:



in cui M rappresenta il controione. Esso può essere mono e bivalente, di natura alcalina (come Na⁺, K⁺, Cs⁺) o alcalino terrosa (Mg²⁺, Ca²⁺, NH₄⁺), n rappresenta la valenza del controione e y rappresenta le molecole di acqua che dipendono dal controione metallico e dal grado di idratazione dei cristalli.

²⁰ R. M. BARRER, *Hydrothermal Chemistry of Zeolites*, cit.

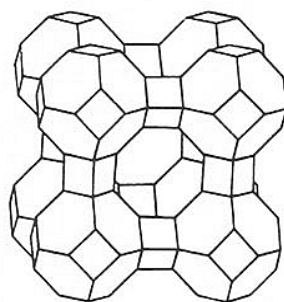


Fig. 3.7 - Rappresentazione della zeolite LTA.

La struttura a tetraedri della zeolite A è costituita da due tipi di reticoli: il primo è un ottaedro di 24 tetraedri e viene indicato come gabbia β o della sodalite; il secondo è un riarrangiamento cubico di otto ottaedri ed unisce le strutture β distanziandole. L'unione alternata dei due reticoli delimita la terza struttura detta α .

I diametri della gabbia α e della gabbia β sono rispettivamente di 11,4 Å e 6,6 Å. Nelle cavità sono allocati gli ioni necessari per rendere la struttura nel complesso neutra, essi non hanno una distribuzione casuale, bensì occupano siti ben definiti, che minimizzano il loro stato coordinativo.

In ogni struttura zeolitica, una volta individuate queste posizioni, ne viene generalmente valutata la percentuale di occupazione, che varia sensibilmente a seconda del controione presente. Nel caso della zeolite LTA si riconoscono tre tipi di siti in cui i controioni possono trovare una posizione di minimo della loro energia potenziale²¹: un sito I formato dall'anello a sei unità, un sito II con un anello a otto unità, un sito III con un anello a quattro unità.

Nella zeolite sintetizzata nella forma sodica, NaA, otto ioni Na^+ sono localizzati vicino al centro degli anelli a sei unità, cioè sul sito I, tre ioni sono localizzati vicino agli anelli ad 8 unità, sul sito II, e gli ioni rimanenti si dispongono sull'anello a 4 unità, ovvero sul sito III.²²

²¹ R. SZOSTAK, *Molecular Sieves*, op. cit. 6.

²² V.K. KAUSHIK, R.P. VIJAYALAKSHMI, N.V. CHOUDARY, S.G.T. BHAT, *XPS Studies on cation exchanged zeolite A*, *Microporous and Mesoporous Materials* 51, 2002, p.139-144.

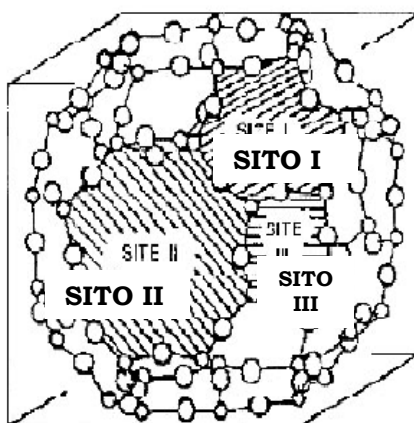


Fig. 3.8 - Unità di cella e siti cationici della zeolite A.

Durante l'adsorbimento le molecole di adsorbato diffondono attraverso la finestra ad otto unità che ha un diametro di $4,2 \text{ \AA}$ e per questo motivo solo le molecole con diametro critico inferiore ai 4 \AA possono accedere alle cavità della struttura.

Sostituendo anche parzialmente gli ioni sodio, con raggio ionico pari a $0,93 \text{ \AA}$, con ioni potassio, di raggio ionico pari a $1,33 \text{ \AA}$, lo spazio disponibile all'accesso delle molecole adsorbite si riduce a 3 \AA e si ottiene la zeolite 3A.

Se lo scambio del Na^+ avviene con Cs^+ , i canali vengono ostruiti completamente, mentre nella sostituzione con Ca^{2+} , il cui raggio ionico è pari a $1,05 \text{ \AA}$, i siti II rimangono vacanti e l'apertura dell'anello ad otto unità rimane completamente libera. Si ottiene così la zeolite 5A.

Generalmente i cationi bivalenti occupano il sito I o il sito II. Il sito II ha una debole affinità per tutti i cationi che sono debolmente legati e quindi mobili. Va sottolineato che i siti non possono essere mai tutti occupati contemporaneamente e che la loro probabilità di occupazione varia a seconda della concentrazione di alluminio.

Inoltre, nel caso in cui la zeolite sia stata scambiata con altri controioni, le percentuali di popolazione dei diversi siti sono di volta in volta da valutare a seconda dello ione scelto per lo scambio.

La distribuzione degli ioni nel framework è un parametro molto importante per la corretta definizione delle proprietà di un materiale zeolitico.

Essa influenza non solamente le dimensioni dell'apertura delle cavità, ma molto spesso le alte rese e le selettività che le zeoliti scambiate esibiscono, sono conseguenza diretta del

fatto di avere i centri cataliticamente attivi (controioni) isolati in un intorno geometrico che permette stereoselettività.

3.6.1 Zeoliti 3A, 4A, 5A

La zeolite a struttura LTA, a seconda della natura del controione metallico che bilancia la carica negativa dell'alluminio, si classifica in: zeolite 3A, zeolite 4A, zeolite 5A.

Nella tabella 3.3 sono riportate le principali caratteristiche chimico fisiche di queste zeoliti.

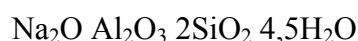
| Tipo | 3A | 4A | 5A |
|--|----------------|-----------------|------------------|
| catione | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ⁺⁺ |
| diametro effettivo dei pori [Å] | 3 | 4 | 5 |
| % di catione scambiabile | 50-55 | 98-100 | 70-80 |
| rapporto SiO ₂ /Al ₂ O ₃ [mol/mol] | 1,9-2,1 | 1,9-2,1 | 1,9-2,1 |
| tipo di abito cristallino | cubico | cubico | cubico |
| bulk density (rapporto tra peso della zeolite disidratata e volume occupato) [Kg/m ³] | 680 | 680 | 680 |
| capacità di adsorbimento di acqua a 20°C [g/100 g di adsorbente, p H ₂ O = 1170 Pa, umidità relativa 50%] | 21 | 21 | 22 |

Tab. 3.3 - Caratteristiche chimico-fisiche della zeolite 3A, 4A, 5A.

3.6.1.1 Zeolite 4A.

Il controione della zeolite 4A è il sodio e viene denominata appunto 4A in quanto può adsorbire molecole con diametro critico inferiore ai 4Å (cfr. 3.4).

La massima intensità delle riflessioni nello spettro di diffrazione dei raggi X si ottiene in corrispondenza del 21% in peso di acqua corrispondente alla formula:



La stabilità in sospensione acquosa è compresa entro certi limiti. Ad esempio, in ambiente acido si decompone in un gel di acido silicico con formazione di ioni Na⁺ e Al³⁺, mentre in ambiente fortemente alcalino può dar luogo alla trasformazione in specie termodinamicamente più stabili (idrossisodalite).

La zeolite 4A viene utilizzata per seccare correnti gassose avvero per rimuovere da esse acqua o vapori.

3.6.1.2 Zeolite 5A

Viene così denominata la zeolite A nella forma scambiata con il calcio. Essa viene indicata come 5A perchè può adsorbire molecole aventi diametro critico minore di 5Å come il metanolo, l'etano, il propano (tabella 3.4).

Il contenuto di acqua presente nel reticolo zeolitico della 5A è pari a 30 moli contro i 27 della zeolite sodica ed i 22 della zeolite contenente titanio. Ciò in accordo col fatto che il contenuto di acqua diminuisce all'aumentare del raggio ionico del catione presente.

Inoltre, essendo il calcio bivalente, la quantità di cationi presenti è pari alla metà rispetto ai cationi monovalenti.

La zeolite 5A viene generalmente utilizzata nei processi di separazione delle n-paraffine dalle ramificate e dagli idrocarburi ciclici, attraverso processi di adsorbimento selettivo.

| Molecole | Diametro critico [Å] |
|--|----------------------|
| Helio | 2.0 |
| Idrogeno, Acetilene | 2.4 |
| Ossigeno, monossido e biossido di carbonio | 2.8 |
| Azoto | 3.0 |
| Acqua | 3.2 |
| Ammonio, H ₂ S | 3.6 |
| Argon | 3.8 |
| Metano | 4 |
| Etilene | 4.02 |
| Etano, Metanolo, Etanolo | 4.4 |
| Metilmercaptano | 4.5 |
| Propano, n-Butano | 4.9 |
| Propilene | 5.0 |

Tab. 3.4 - Diametro critico di alcune molecole adsorbibili dalla zeolite A.

CAPITOLO 4

MATERIALI E METODI DEI CALCESTRUZZI HPC, SCC E DEI CALCESTRUZZI CON AGGREGATI RICICLATI

4.1. Premessa

L'obiettivo sperimentale proposto si è tradotto nel progetto e nella realizzazione di una serie di miscele cementizie, diversificate nelle caratteristiche di impasto, confezionate con materiali facilmente reperibili sul territorio calabrese, al fine di realizzare calcestruzzi ad alte prestazioni, autocompattanti e calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati meno costosi di quelli attualmente prodotti con uguali caratteristiche di resistenza meccanica, di durabilità e di lavorabilità.

Le miscele sono state preparate utilizzando aggregati lapidei locali di origine alluvionale e di forma tondeggianti, tipici del comprensorio cosentino, e diversi tipi di cemento, in particolare per i calcestruzzi autocompattanti sono stati utilizzati cementi bianchi allo scopo di ottenere calcestruzzi a faccia vista di notevole pregio architettonico.

Come aggiunta idraulica si è utilizzata la silice fumè, come riferimento, e diversi tipi di zeoliti, alcune reperibili sul mercato locale ed altre facilmente prodotte in laboratorio, per gli HPC ed i calcestruzzi con aggregati da riciclo, mentre per gli SCC si sono impiegate aggiunte di colore bianco come il calcare e la zeolite. La scelta dei materiali zeolitici è motivata dalla considerazione che essi sono più economici della silice fumè e del calcare. Per ottenere una migliore lavorabilità delle miscele sono stati utilizzati additivi a base acrilica.

4.2. Metodi di Prova

Vengono illustrati di seguito i metodi di prova adottati per la caratterizzazione dei materiali utilizzati negli impasti.

4.2.1. Analisi diffrattometrica ai raggi X.

Nell'interpretazione dei Bragg (W. H. e W. L. Bragg, Relazione dei Bragg, 1913) la diffrazione dei raggi X viene considerata pari ad una riflessione da parte di un fascio di piani reticolari equidistanti.

Due raggi i e i' che colpiscono un fascio di piani paralleli del cristallo sotto l'angolo θ , danno due raggi riflessi r ed r' , in condizioni di interferire positivamente, se la loro differenza di cammino è pari ad un numero intero di lunghezze d'onda.

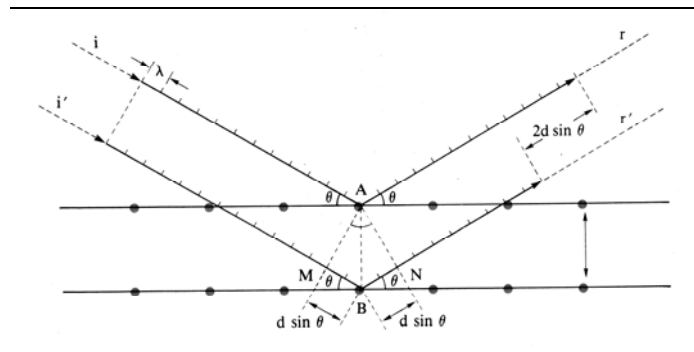


Fig. 4.1 - Condizione geometrica di diffrazione dei raggi X.

La differenza di cammino è $MB + BN$, dove $MB = BN$. Nel triangolo rettangolo ABM il cateto BM è uguale all'ipotenusa $AB \cdot \sin\theta = d \cdot \sin\theta$, quindi la differenza di cammino totale è $2d \cdot \sin\theta$. Facendo questo pari a $k\lambda$ dove $k = 1, 2, 3, \dots$ cioè un intero, si ha la relazione dei Bragg.

E' solo quando la differenza di cammino è pari a un numero intero di lunghezze d'onda che le onde riflesse sono in fase e si rafforzano interferendo positivamente. Altrimenti sono fuori fase oppure in opposizione di fase e interferiscono negativamente, attenuandosi o elidendosi completamente.

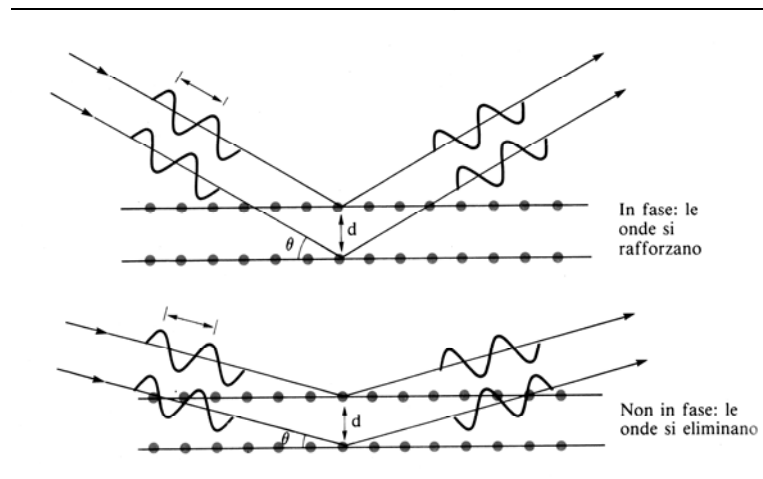


Fig. 4.2 - Condizioni in cui non si verifica la diffrazione.

Per l'analisi della diffrazione dei raggi X, si è utilizzato un diffrattometro *Philips PW 1730/10* dotato di goniometro verticale *PW1050/70* per la misura dell'angolo di diffrazione.

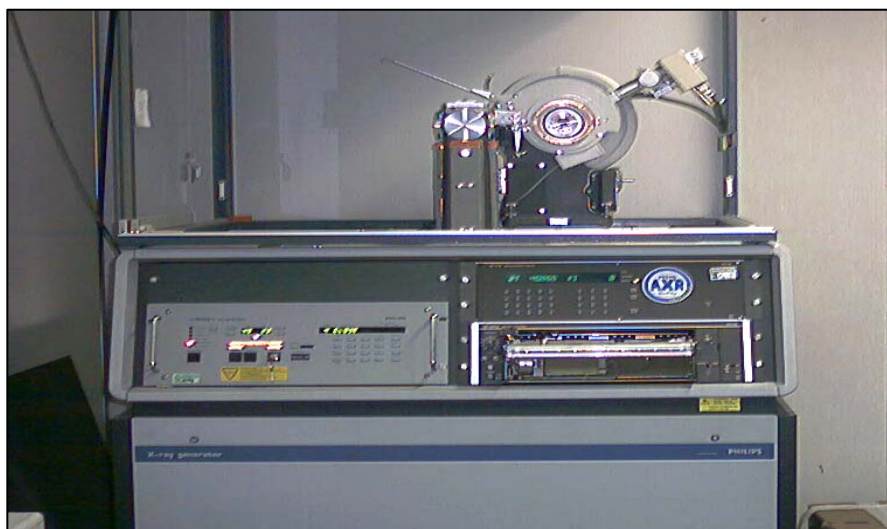


Fig. 4.3 - Diffrattometro a raggi X Philips PW 1730/10.

Il diffrattometro è controllato da un computer *Olivetti PC* corredato di software applicativo per diffrazione a raggi su polveri della *Ital Structures* di Riva del Garda. I raggi X sono generati da un anticatodo di rame sotto vuoto, alimentato da una corrente elettronica di 20 mA che arroventa elettricamente il catodo provocando l'emissione di

elettroni successivamente accelerati da una differenza di potenziale di 40 KV tra anodo e catodo. Un filtro di nichel seleziona i raggi α_1 e α_2 .

Con un diffrattometro ben tarato si possono misurare angoli di diffrazione fino ad una precisione di $\pm 0.005^\circ 2\theta$ nell'intervallo angolare da 3 a $140^\circ 2\theta$, anche se di solito non si esplora più dei primi angoli, da 5 a $60^\circ 2\theta$.

Gli spettri diffrattografici dei campioni sottoposti a radiazione sono stati risolti consultando i cataloghi riportati in bibliografia¹, per quanto riguarda la determinazione delle fasi, e la percentuale di cristallinità rapportando l'intensità dei picchi di diffrazione a quelli di una zeolite A standard, secondo la formula²:

$$\text{Cristallinità \%} = \left(\frac{\text{intensità del picco campione}}{\text{intensità del picco standard}} \cdot 100 \right)_{\text{media su tutti i picchi}}$$

4.2.2. Microscopia elettronica a scansione.

La microscopia elettronica a scansione permette l'osservazione e la caratterizzazione di materiali eterogenei organici ed inorganici purché solidi.

Il microscopio elettronico a scansione è utilizzato per l'analisi topografica di superfici, per l'analisi morfologica dei cristalli e per la loro caratterizzazione quantitativa.

Il microscopio elettronico a scansione utilizzato è quello della ditta FEI modello INSPECT (Fig. 2.4), con caratteristiche analoghe al Quanta 200 della stessa ditta. Esso è uno strumento dell'ultima generazione corredato di un'ampia gamma di accessori. La sorgente è di tipo convenzionale (filamento di tungsteno), ma la particolare configurazione (tetrodo) consente una brillantezza superiore alle sorgenti standard. La risoluzione massima nominale è 3.5 nm a 30 KV . La camera, di grandi dimensioni, è dotata di una telecamera interna CCD per facilitare il posizionamento del campione. Lo stage portacampione è eucentrico, con movimenti x-y-z motorizzati (all'occorrenza manuali) e tilt manuale.

Esso è costituito da una colonna sotto vuoto che comprende un cannone elettronico e una serie di lenti. Il cannone elettronico emette elettroni fortemente accelerati che colpiscono

¹ M.M.J. TREACY, J.B. HIGGINS, R. VAN BALLMOOS, *Collection of simulated XRD powder patterns of zeolites, Third Revised Edition 1996*, Elsevier.

² ASTM Standard on Catalysts, D3906-85a, 1988.

la superficie del campione. Inoltre il microscopio può operare in tre modalità di vuoto: modalità “ad alto vuoto”, modalità “a basso vuoto”, modalità “ambientale”.

Il campione deve avere una buona conducibilità elettrica e per evitare accumuli locali di carica o se non è un conduttore naturale, viene ricoperto da un sottile strato di oro attraverso uno strumento detto metallizzatore. Gli elettroni secondari (20 eV) emessi sotto il bombardamento e raccolti da un detector, permettono di ottenere i particolari topografici della superficie analizzata.

Le immagini sono riproducibili su pellicole piane e acquisibili tramite *software*.



Fig. 4.4 - Microscopio elettronico a scansione FEI INSPECT.

4.2.3. Microanalisi a dispersione di energia.

La microanalisi a raggi X, interfacciata al microscopio elettronico a scansione, permette di effettuare analisi elementari qualitative e quantitative estremamente precise su porzioni di campione.

La sorgente di radiazioni è sempre un filamento che emette un fascio di elettroni per effetto *Richardson*. Essi vengono collimati ed accelerati dalla serie di lenti presenti nella colonna del microscopio e colpiscono la superficie del campione reso conduttrice da un sottile strato di oro.

A differenza della microscopia elettronica a scansione, si privilegia la rivelazione e l'analisi dei raggi X caratteristici emessi dalle diverse specie atomiche presenti nel campione.

L'analisi sui campioni è stata condotta con il modello INCA *Energy* 300 con processore microanalitico digitale e controllo digitale della scansione.

I risultati delle analisi sono stati ottenuti analizzando diverse zone, a diversi ingrandimenti, delle polveri zeolitiche. In alcuni casi, ad elevati ingrandimenti si è analizzato il singolo cristallo di zeolite.

4.2.4. Analisi Termica.

L'analisi termica è un processo attraverso il quale una proprietà fisica di una sostanza e/o dei suoi prodotti di reazione viene misurata in funzione della temperatura, mentre la sostanza stessa è sottoposta ad un trattamento a temperatura programmata (Mackenzie, 1979).

I metodi termici sono circa una dozzina e tutti differiscono per le proprietà misurate e per i programmi di misura (Wunderlich, 1990). Tali metodi trovano un notevole impiego sia per il controllo di qualità che per le applicazioni di ricerca sui prodotti industriali come polimeri, farmaci, argille e minerali, metalli e leghe.



Fig. 4.5 - Analizzatore termico Netzsch STA 409.

L'analisi termogravimetrica, detta TG, funziona registrando continuamente la massa di un campione in atmosfera controllata in funzione della temperatura o del tempo, quando la temperatura del campione viene variata³.

³ La temperatura generalmente è aumentata in maniera lineare nel tempo.

Il “termogramma o curva di decomposizione termica” è un diagramma della massa o della percentuale della massa in funzione del tempo.

Per l’analisi termica si utilizza un analizzatore Netzsch STA 409 (Fig. 4.5), che permette la simultanea registrazione delle curve di DSC, TG e DTG, con le seguenti condizioni operative:

Atmosfera: aria;

Flusso: 5 cm³/min;

Intervallo di temperatura: 25-1000 °C;

Sostanza di riferimento: caolino calcinato.

4.2.5. Prove meccaniche di resistenza.

Le prove meccaniche di resistenza a compressione sui provini di calcestruzzo (di forma cubica con dimensione (100mm×100mm×100mm) sono state condotte rispettando le procedure previste dalla norma UNI EN 12390-3; 2003.

Le suddette prove sui provini di cls, ottenuti dalle varie miscele preparate, sono state eseguite a differenti tempi di stagionatura: 2 - 7 - 28 giorni, come prescritto dalla normativa vigente.

Per la rottura dei provini di calcestruzzo è stata utilizzata una pressa, (fig. 4.6) progettata espressamente per prove su materiali poco deformabili, rispondente alle prescrizioni dettate dalla norma UNI 6686-72.



Fig. 4.6 - Pressa Matest utilizzata per le prove sui calcestruzzi.

Per le prove di resistenza sui provini prismatici di malta (di dimensioni $(40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm})$) si è fatto riferimento alle prescrizioni della norma UNI EN 196-1. Le prove sui provini di malta, confezionati con le vare miscele preparate, sono state eseguite, come da normativa, a differenti tempi di stagionatura: 2 - 7 - 28 giorni. Si è utilizzata una pressa, con due differenti tipi di compressore: uno per la prova di flessione ed un altro per la prova di compressione, rispondente alla normativa UNI EN 196-1 (Figg. 4.7a e 4.7b).



Fig. 4.7 - compressore per rottura a flessione (a) e compressore per rottura a compressione (b).

4.2.6. Prove sugli SCC allo stato fresco.

4.2.6.1. Normativa.

Le norme sui calcestruzzi autocompattanti descrivono le modalità di esecuzione, le caratteristiche delle nuove attrezzature ed i limiti di accettazione per verificare le caratteristiche reologiche del calcestruzzo fresco. Le prove indicate nelle norme UNI del 2003 che vengono più comunemente effettuate sugli impasti freschi sono: lo slump flow (UNI 11041) che misura la capacità di spandimento, il V-funnel (UNI 11042) che misura la stabilità alla segregazione durante lo scorrimento lo J-ring (UNI 11045) che misura la capacità di scorrimento in presenza di ostacoli.

Tali prove servono per ottimizzare il dosaggio dei costituenti e verificarne la compatibilità.

4.2.6.2. Slump Flow.

La prova dello slump test viene eseguita secondo la Norma 11041/03. Essa fornisce indicazioni circa il valore dello spandimento che il calcestruzzo deve raggiungere per essere in grado di fluire liberamente ed avere capacità di riempimento dei casseri.

Tale prova fornisce anche utili risultati visivi sulla resistenza alla segregazione e sull'eventuale presenza di "Bleeding". L'esame visivo dovrà concentrarsi sull'omogeneità del calcestruzzo e in particolare sui contorni della focaccia ottenuta.

La misura dello spandimento si effettua utilizzando il cono di Abrams, lasciando che il calcestruzzo fresco versato all'interno del tronco di cono si spanda liberamente sulla base di appoggio.

L'apparecchiatura utilizzata per eseguire la prova è costituita da:

- uno stampo troncoconico, munito di maniglie e aperto inferiormente e superiormente, conforme alla UNI EN 12350-2, di 300 mm di altezza, diametro inferiore di 200 mm e diametro superiore di 100 mm;
- una piastra quadrata piana, di materiale non assorbente, avente dimensioni di circa 800 mm x 800 mm, sulla quale sono disegnate due circonferenze: una dal diametro di 200 mm, sulla quale deve essere posizionato il cono, e una dal diametro di 500 mm, necessaria per rilevare il tempo di spandimento (fig. 4.9);
- un recipiente di campionamento rigido, di materiale non assorbente e resistente all'azione aggressiva del calcestruzzo;
- un cronometro contasecondi.

Dopo aver preparato l'impasto di calcestruzzo, si pone lo stampo troncoconico, inumidito internamente, sulla piastra centrandolo sulla circonferenza più piccola. Si riempie lo stampo con l'impasto tenendolo fermo tramite le maniglie laterali.

Subito dopo il riempimento, si rimuove lo stampo verso l'alto, entro 2 o 3 secondi di tempo e contemporaneamente a questa azione si fa partire il cronometro.

Quindi vengono misurati il diametro medio di spandimento D , valutato rispetto a due direzioni ortogonali, e il tempo t impiegato dal calcestruzzo per espandersi fino al diametro di 500 mm.

Maggiore risulta D e più elevata sarà la capacità di riempimento del calcestruzzo allo stato fresco. A parità di diametro e di deformabilità il tempo t è proporzionale alla viscosità del calcestruzzo: maggiore è il valore di D e più elevata sarà la viscosità, pertanto per ottenere l'autocompattabilità bisognerà produrre calcestruzzi con elevati valori del diametro D e bassi valori del tempo t .

I valori minimi per conseguire una sufficiente autocompattabilità del calcestruzzo sono :

$D > 600$ mm

$T < 12$ secondi.

Secondo la normativa la prova è valida su calcestruzzi autocompattanti con aggregati aventi dimensione massima di 25 mm. La prova non è valida se le dimensioni dei diametri differiscono più di 50 mm.

Osservando la forma acquisita dal calcestruzzo al termine dello spandimento, si può valutare se ai bordi c'è presenza di acqua o boiaccia molto fluida e se le particelle dell'aggregato più grosso sono distribuite uniformemente entro l'area di spandimento del calcestruzzo o sono concentrate al centro, se, cioè, è presente il cosiddetto effetto "sombbrero".

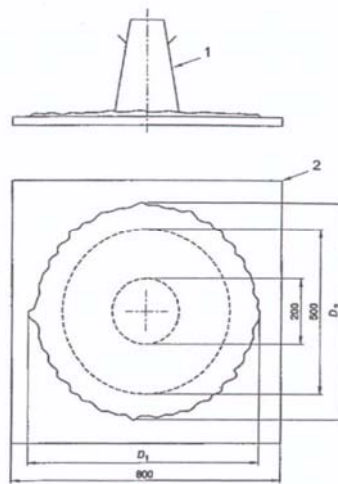


Fig. 4.8 - Dispositivo usato per lo slump test (dimensioni in mm).



Fig. 4.9 - Alcune immagini sullo svolgimento dello slump-flow test.

4.2.6.3. J-Ring.

La Norma di riferimento per la prova dell'anello a J è la UNI 11045 del 2003. Tale prova fornisce indicazioni sulla capacità del calcestruzzo ad attraversare gli ostacoli.

L'apparecchiatura utile per lo svolgimento della prova è costituita da:

- uno stampo troncoconico, di metallo non aggredibile dal calcestruzzo, corrispondente a quello previsto dalla UNI EN 12350-2;
- una piastra quadrata non assorbente, di dimensioni di circa 800 mm x 800 mm, sulla quale sono tracciati dei riscontri per poter centrare lo stampo e l'anello;
- un anello a J costituito da un profilato metallico circolare a sezione rettangolare 30 mm x 25 mm di diametro medio pari a 300 mm. Lungo tale circonferenza sono fissate trasversalmente delle barre cilindriche aventi diametro nominale di 10 mm e lunghezza di circa 100 mm. Il passo delle barre è di 48 ± 2 mm (fig. 4.10). Se richiesto possono essere applicate all'anello barre di diversa dimensione e diversa spaziatura.
- un recipiente di campionamento rigido, di materiale non assorbente e non aggredibile dal calcestruzzo, adatto a raccogliere il materiale fresco.

L'anello a J e lo stampo troncoconico vengono disposti sulla piastra inumidita in posizione centrata. Mantenendo in posizione sia lo stampo che l'anello, si riempie il cono, quindi lo si solleva rapidamente con movimento verticale e regolare, lasciando che il calcestruzzo fluisca liberamente.

Quando il calcestruzzo raggiunge lo spandimento massimo si calcola la media fra i due diametri ortogonali e si osserva se l'altezza all'interno dell'anello è visibilmente più alta del calcestruzzo all'esterno dello stesso (< 5 cm).

Inoltre si rileva il tempo che il calcestruzzo impiega per raggiungere il diametro, contrassegnato sulla piastra, di 500 mm.



Fig. 4.10 - Prova dell'anello a J

4.2.6.4. V-Funnel.

La prova dell'imbuto a V fornisce utili indicazioni sulla deformabilità, sulla viscosità e sulle capacità di efflusso del calcestruzzo fresco. E' eseguita secondo la norma UNI 11042 del 2003.

L'apparecchiatura utile allo svolgimento della prova è costituita da:

- un imbuto a forma di V (fig. 4.11) di dimensioni standardizzate: la capacità di riempimento è di 10 litri, la sezione di efflusso ha una superficie di 65 mm x 75 mm e procede verso l'alto con questa sezione per 150 mm, dopo di che la sezione tende ad allargarsi fino a raggiungere la superficie in sommità di 510 mm x 75 mm. Lo sviluppo totale in altezza è di 600 mm. L'orifizio di efflusso è corredato da una serranda, il cui movimento consente istantaneamente lo scorrimento del calcestruzzo. Il bordo superiore dell'imbuto è liscio in modo da permettere il livellamento del calcestruzzo;
- un recipiente per accogliere il calcestruzzo allo scarico dell'imbuto;
- un recipiente di campionamento rigido, costituito da materiale non assorbente e resistente all'azione del calcestruzzo, adatto a raccogliarlo e a rimescolarlo;
- un cronometro contasecondi.

L'imbuto viene posizionato sul suo appoggio, in modo che il condotto di scarico sia verticale e una volta inumidite le superfici interne, lo si riempie con il calcestruzzo, controllando che la valvola di scarico sia chiusa. Si livella quindi il calcestruzzo facendo attenzione a non imporre vibrazioni.

Dopo 10 secondi dal riempimento si apre la valvola e contemporaneamente all'inizio del deflusso si fa partire il cronometro. Il tempo di svuotamento t è correlabile con la viscosità del calcestruzzo: minore è t , meno viscoso è il calcestruzzo.

La normativa prevede un tempo di efflusso compreso tra 4 e 12 secondi. E' necessario effettuare una seconda prova in base alla quale, dopo uno stazionamento del calcestruzzo all'interno dell'imbuto per 5 minuti, la differenza del tempo di efflusso non deve superare i 3 secondi rispetto al valore iniziale, in quanto, è fondamentale che il calcestruzzo, in questo intervallo di tempo, conservi la sua lavorabilità. Durante il deflusso del calcestruzzo si può osservare l'eventuale tendenza alla segregazione.



Fig. 4.11 - prova dell'imbuto a V

4.2.7. Determinazione penetrabilità dello ione cloruro.

Lo ione cloro è frequente negli scarichi civili ed industriali, nei terreni prossimi al mare, in quelli contenenti salemma e nelle acque che li attraversano. Il meccanismo di degrado che essi generano da problemi ai ferri dell'armatura, perché il cloruro è in grado di distruggere lo strato protettivo costituito dall'ossido ferrico, accelerando o dando vita alla corrosione delle barre metalliche.

Il grado d'aggressività delle acque e dei terreni contenenti cloruri nei confronti del calcestruzzo sono riportati nelle tabelle 4.1 e 4.2.

| concentrazione di Cl_2 in aria secca (mg/m^3) | concentrazione di Cl^2 in aria umida (mg/m^3) | Grado di aggressività |
|---|---|-----------------------|
| fino a 0.1 | fino a 0.01 | trascurabile (-) |
| oltre 0.1 fino a 1 | oltre 0.01 fino a 0.1 | debole (a) |
| oltre 1 fino a 20 | oltre 0.1 fino a 1 | moderato (b) |
| oltre 20 | oltre 1 | forte (c) |

Tab. 4.1 – Grado di aggressività dei cloruri in aria.

| Concentrazione di Cl ² in acqua (mg/l) | Concentrazione di Cl ² in terreno essiccato all'aria (mg/kg) | Grado di aggressività |
|---|---|-----------------------|
| fino a 500 | fino a 500 | trascurabile (-) |
| oltre 500 fino a 1000 | oltre 500 fino a 1000 | debole (a) |
| oltre 1000 fino a 5000 | oltre 1000 fino a 5000 | moderato (b) |
| oltre 5000 | oltre 5000 | forte (c) |

Tab. 4.2 - Grado di aggressività dei cloruri in acqua.

Le contromisure da adottare per ottenere la durabilità appropriata, in base alle conoscenze attuali, sono:

- riduzione della permeabilità del calcestruzzo, ottenibile con un rapporto acqua/cemento basso quanto più è alto il grado d'aggressività ed in nessun caso superiore a 0,55;
- aggiunta di fumi di silice nei casi d'aggressione particolarmente gravi;
- massima compattezza della struttura (assenza di porosità macroscopiche) da ottenere ricorrendo a conglomerati con lavorabilità adeguata (classi di consistenza S4 e S5) ed attuando una messa in opera accurata.

Le prove sono state eseguite in conformità con la norma UNI 7928, che fornisce le indicazioni per determinare la profondità di penetrazione dello ione cloruro (Cl⁻) in dei provini di calcestruzzo dopo essere stati posti a contatto con una soluzione di cloruro di calcio per tempi prefissati. Dopo aver rilevato la linea di penetrazione che si è formata nei provini di calcestruzzo si è determinata inoltre l'eventuale variazione di resistenza meccanica, che questi hanno subito a causa del contatto per 12 mesi con la soluzione ricca in cloruri.

4.2.8. Determinazione penetrabilità dello ione solfato.

Lo ione solfato SO₄²⁻ è anch'esso frequente negli scarichi civili ed industriali, nelle piogge acide, nei terreni contenenti sali solfatici e nelle acque naturali che li attraversano. Si tratta in genere di solfati di sodio, potassio, calcio, magnesio e ammonio. Le reazioni che avvengono nel calcestruzzo esposto all'aggressione solfatica sono distruttive perché

comportano fortissimi aumenti di volume dovuti alla formazione di particolari sostanze cristalline: ettringite e thaumasite. Il grado d'aggressività dell'aria, delle acque e dei terreni solfatici nei confronti del conglomerato cementizio sono riportati nelle tabelle 4.3 e 4.4.

| Concentrazione di SO ₂ in aria secca (mg/m ³) | Concentrazione di SO ₂ in aria umida (mg/m ³) | Grado di aggressività |
|--|--|-----------------------|
| Fino a 0.5 | fino a 0.05 | trascurabile (-) |
| oltre 0.5 fino a 10 | oltre 0.05 fino a 0.5 | debole (a) |
| oltre 10 fino a 200 | oltre 0.5 fino a 10 | moderato (b) |
| oltre 200 | oltre 10 | forte (c) |

Tab. 4.3 - Grado di aggressività dei solfati in aria.

| Concentrazione di SO ₄ ²⁻ in acqua (mg/l) | Concentrazione di SO ₄ ²⁻ in terreno essiccato all'aria (mg/kg) | Grado di aggressività |
|---|---|-----------------------|
| fino a 200 | fino a 2000 | trascurabile (-) |
| oltre 200 fino a 600 | da 2000 fino a 6000 | debole (a) |
| oltre 600 fino a 1500 | da 6000 fino a 12000 | moderato (b) |
| oltre 1500 | oltre 12000 | forte (c) |

Tab. 4.4 - Grado di aggressività dei solfati in acqua.

Le contromisure da adottare per ottenere la durabilità appropriata, in base alle conoscenze attuali, sono:

- riduzione della permeabilità del conglomerato da ottenere con un rapporto acqua/cemento basso, quanto più è alto il grado d'aggressività accertato, ma mai superiore a 0,55;
- aggiunta di fumi di silice nei casi d'aggressione particolarmente grave;
- massima compattezza della struttura (assenza di porosità macroscopiche) da ottenere ricorrendo a calcestruzzi con lavorabilità adeguata (classi di consistenza S4 e S5) ed attuando una messa in opera accurata.

- utilizzare un tipo di cemento resistente ai solfati nel caso di concentrazioni superiori a 500 mg/l in acqua e a 3000 mg/l nei terreni;
- nel caso d'aggressione forte è bene eseguire una protezione superficiale della struttura, mediante rivestimenti che impediscano il contatto diretto con l'agente aggressivo.

Il metodo di verifica adottato per l'esecuzione della prova di penetrabilità dello ione solfato è disciplinato dalla norma UNI 8019. Lo scopo della prova è la determinazione della profondità di penetrazione dello ione solfato (SO_4^{2-}) nei provini di calcestruzzo confezionati con inerti naturali e riciclati posti a contatto con una soluzione di solfato di sodio.

4.2.9. Carbonatazione.

La CO_2 disciolta nell'acqua pura dilava, cioè è capace di portare in soluzione più o meno lentamente alcuni costituenti del calcestruzzo.

La CO_2 presente nell'aria, provoca il noto fenomeno della carbonatazione, cioè la progressiva trasformazione della calce libera $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in carbonato di calcio CaCO_3 e H_2O , con forte abbassamento del pH. L'ambiente gradualmente più acido, dovuto all'azione dell'anidride carbonica, facilita la distruzione dello strato protettivo di ossido ferrico passivante presente sui ferri di armatura, che così divengono molto più esposti alla corrosione.

Le prove sono state eseguite in conformità con la norma UNI 9944, che ha lo scopo di determinare la profondità di carbonatazione in dei provini di calcestruzzo dopo essere stati a contatto con l'aria per 12 mesi.

4.2.10. Cicli di gelo e disgelo.

Il degrado provocato dai cicli di gelo e disgelo si verifica fondamentalmente nelle zone montane dove la temperatura scende spesso sotto lo zero in condizioni ambientali in cui il calcestruzzo è imbibito d'acqua. Se la struttura è soggetta all'impiego di sali disgelanti, generalmente a base di cloruro, il fenomeno viene aggravato anche per la contemporanea corrosione dei ferri. Il degrado causato dai cicli gelo-disgelo si manifesta con modalità diversa a secondo che siano presenti o meno sali disgelanti. La norma a cui si fa riferimento per la determinazione della resistenza alla degradazione per cicli di gelo e

disgelo è la UNI 7087-72. I provini possono provenire da getti in cantiere od in laboratorio (confezionati secondo quanto specificato nella UNI 6128-72 od essere ricavati da calcestruzzi già induriti.

4.2.11. Prove di ritiro.

La norma di riferimento è la UNI 6555-73, essa stabilisce quali sono le regole per: "la determinazione del ritiro assiale di provini aventi dimensioni di 10 cm x 10 cm x 50 cm confezionati in calcestruzzo con inerti della dimensione massima fino a 3 cm".

Il ritiro è la variazione di lunghezza espressa in micrometri e riferita al metro di lunghezza ($\mu\text{m}/\text{m}$). E' quindi misurato come una deformazione adimensionale su provini standard in assenza di carico, conservati in un ambiente ad umidità e temperatura prefissati e costanti nel tempo.

La preparazione dei provini consiste nell'assemblare il calcestruzzo negli appositi recipienti, rispettando le prescrizioni della UNI EN 12390-2 del 2002. I contenitori sono costituiti da stampi metallici, così composti:

- due fiancate;
- due testate (portaspina);
- una piastra di base;

Le caratteristiche, le dimensioni delle spine e la lunghezza della parte immersa sono realizzate con acciaio Fe42 B rispettando tutte le dimensioni imposte dalla UNI 7070-72. La distanza tra le due estremità interne delle testate portaspina deve essere di $500 + 0.25$ mm.

4.2.12. Prove sugli aggregati dei calcestruzzi con aggregati da riciclo

4.2.12.1. Prova al solfato di magnesio.

La prova al solfato di magnesio fa riferimento alla norma UNI EN 1367-2, ed è necessaria per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati.

La norma propone un metodo per valutare il comportamento di un aggregato quando viene sottoposto ad un'azione ciclica di immersione in solfato di magnesio (fig. 4.12), seguita da essiccazione in forno.



Fig. 4.12 - Aggregati immersi in una soluzione satura di solfato di magnesio.

Un campione da laboratorio di circa 1 Kg di aggregato nella gamma dimensionale da 10 mm a 14 mm viene accuratamente preparato e suddiviso in due campioni di prova di quantità compresa tra (420 ± 0.1) g e (430 ± 0.1) g.

Ciascun campione viene poi sottoposto a cinque cicli di immersione in una soluzione satura di solfato di magnesio per un periodo di (17 ± 0.5) h, seguiti da essiccazione in forno a (110 ± 5) °C per (24 ± 1) h. Questo procedimento sottopone il campione dell'aggregato agli effetti dirompenti della ripetuta cristallizzazione e reidratatone del solfato di magnesio all'interno dei pori dell'aggregato.

La degradazione derivante dagli effetti dirompenti viene misurata dalla quantità di materiale più fine di 10 mm che viene prodotto sotto forma di particelle.

4.3. Materiali Utilizzati.

E' stato fatto uno studio preliminare sui materiali utilizzati valutando le schede tecniche fornite dai produttori ed in una fase successiva si è fatta un'ulteriore caratterizzazione mediante prove di laboratorio atte ad affinare le conoscenze di carattere chimico e fisico dei prodotti adoperati.

4.3.1. Materiali per calcestruzzi HPC.

4.3.1.1. Cementi.

Nella realizzazione dei calcestruzzi ad alte prestazioni si utilizzano, come già ricordato nel secondo capitolo, cementi Portland tipo I definiti nella normativa UNI-EN 197-1, con classe di resistenza 42,5 e 52,5 MPa.

Studi recenti (Metha-Aitcin, 1997) hanno proposto l'impiego di cementi di miscela al posto dei cementi Portland, ciò favorirebbe la riduzione dello sviluppo del calore di idratazione e consentirebbe il miglioramento delle prestazioni del conglomerato sia allo stato fresco che in quello indurito, oltre che una produzione di HPC più economica.

Per la realizzazione degli impasti sono stati utilizzati i seguenti tipi di cemento⁴:

- CEM I 42,5 R: cemento Portland;
- CEM II/A-S 42,5 R: cemento Portland alla loppa;
- CEM III/A 42,5 N: cemento d'altoforno.

Il primo legante utilizzato è un cemento Portland del tipo CEM I 42,5 R, che secondo la normativa UNI-EN 197-1 deve possedere dal 95% al 100% di clinker e fino al 5% di costituenti secondari.

Le resistenze meccaniche a compressione⁵ riportate nella scheda tecnica fornita dal produttore, sono: 28 MPa a due giorni, 41 MPa a sette giorni, 52 MPa a ventisette giorni; va ricordato, inoltre, che la lettera R sta ad indicare l'elevata resistenza iniziale.

⁴ Secondo la normativa UNI-EN 197-1.

⁵ Vedi tabella sulle resistenze meccaniche in fig.4.9 ripresa dalla UNI EN 197-1.

Prospetto I - Tipi di cemento e composizione - Percentuali in massa¹⁾

| Tipo di cemento | Denominazione | Sigla | Clinker K | Loppa d'altoforno granulata S | Microsilice D ³⁾ | Pozzolana | | Ceneri volanti | | Scisto calcinato T | Calcare L | Costituenti secondari ²⁾ |
|-----------------------------|--|--------|--------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------|---------------|-----------------------|--------------|-------------------------------------|
| | | | | | | naturale P | industriale Q ⁴⁾ | silicea V | calceica W | | | |
| I | Cemento Portland | I | 95-100 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla loppa | II/A-S | 80-94 | 6-20 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla loppa | II/B-S | 65-79 | 21-35 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla microsilice | II/A-D | 90-94 | - | 6-10 | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla pozzolana | II/A-P | 80-94 | - | - | 6-20 | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla pozzolana | II/B-P | 65-79 | - | - | 21-35 | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla pozzolana | II/A-Q | 80-94 | - | - | - | 6-20 | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alla pozzolana | II/B-Q | 65-79 | - | - | - | 21-35 | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alle ceneri volanti | II/A-V | 80-94 | - | - | - | - | 6-20 | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alle ceneri volanti | II/B-V | 65-79 | - | - | - | - | 21-35 | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alle ceneri volanti | II/A-W | 80-94 | - | - | - | - | - | 6-20 | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland alle ceneri volanti | II/B-W | 65-79 | - | - | - | - | - | 21-35 | - | - | 0-5 |
| | Cemento Portland allo scisto calcinato | II/A-T | 80-94 | - | - | - | - | - | - | 6-20 | - | 0-5 |
| | Cemento Portland allo scisto calcinato | II/B-T | 65-79 | - | - | - | - | - | - | 21-35 | - | 0-5 |
| Cemento Portland al calcare | II/A-L | 80-94 | - | - | - | - | - | - | - | 6-20 | 0-5 | |
| Cemento Portland al calcare | II/B-L | 65-79 | - | - | - | - | - | - | - | 21-35 | 0-5 | |
| Cemento Portland composito | II/A-M | 80-94 | - | - | - | - | - | 6-20 ⁵⁾ | - | - | - | 0-5 |
| Cemento Portland composito | II/B-M | 65-79 | - | - | - | - | - | - | - | 21-35 ⁵⁾ | - | 0-5 |
| III | Cemento d'altoforno | III/A | 35-64 | 36-65 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento d'altoforno | III/B | 20-34 | 66-80 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento d'altoforno | III/C | 5-19 | 81-95 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| IV | Cemento pozzolanico | IV/A | 65-89 | - | - | - | 11-35 | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento pozzolanico | IV/B | 45-64 | - | - | - | 36-55 | - | - | - | - | 0-5 |
| V | Cemento composito | V/A | 40-64 | 18-30 | - | - | 18-30 | - | - | - | - | 0-5 |
| | Cemento composito | V/B | 20-39 | 31-50 | - | - | 31-50 | - | - | - | - | 0-5 |

1) I valori del prospetto si riferiscono al nucleo del cemento, escludendo solfato di calcio e gli additivi.
2) I costituenti secondari possono essere filler oppure uno o più costituenti principali, sempre che questi non siano inclusi come costituenti principali nel cemento.
3) La proporzione di microsilice è limitata al 10%.
4) La proporzione di loppa non ferrosa è limitata al 15%.
5) La proporzione di filler è limitata al 5%.

Fig. 4.13 - Classificazione dei cementi secondo la norma UNI EN 197-1.

Il secondo legante utilizzato è un cemento Portland alla loppa del tipo CEM II/A-S 42,5 R (UNI EN 197-1) con un contenuto di clinker non inferiore all'80% e con un'aggiunta di loppa (o calcare) contenuta nell'intervallo 6-20% (Fig.4.13). Secondo la scheda tecnica del produttore le resistenze meccaniche a compressione (medie) da rispettare presentano i seguenti valori: ≥ 20 MPa a due giorni, $\geq 42,5$ MPa e $\leq 62,5$ MPa a ventotto giorni (fig.4.14).

| Classe | Resistenza alla compressione N/mm ² | | | | Tempo di inizio presa min | Espansione mm |
|--------|---|-----------|-------------------------|-------------|------------------------------|------------------|
| | Resistenza iniziale | | Resistenza normalizzata | | | |
| | 2 giorni | 7 giorni | 28 giorni | | | |
| 32,5 | - | ≥ 16 | - | - | - | - |
| 32,5 R | ≥ 10 | - | $\geq 32,5$ | $\leq 52,5$ | ≥ 60 | ≤ 10 |
| 42,5 | ≥ 10 | - | - | - | - | |
| 42,5 R | ≥ 20 | - | $\geq 42,5$ | $\leq 62,5$ | - | |
| 52,5 | ≥ 20 | - | - | - | - | |
| 52,5 R | ≥ 30 | - | $\geq 52,5$ | - | ≥ 45 | - |

Fig. 4.14 - Requisiti fisici e meccanici dei vari tipi di cemento.

L'ultimo legante impiegato è un cemento d'altoforno del tipo CEM III/A 42,5 N (UNI EN 197-1) dove il contenuto di clinker è compreso nell'intervallo 35-64% e il contenuto di loppa può variare nell'intervallo 36-65%.

Dalla scheda tecnica si evince che le resistenze meccaniche a compressione devono rispettare i seguenti valori: ≥ 10 MPa a due giorni, $\geq 42,5$ MPa a ventotto giorni.

Nella fase precedente alla realizzazione delle varie miscele sono stati caratterizzati i tre tipi di cemento eseguendo, l'analisi chimica (microanalisi a dispersione di energia, microscopia elettronica a scansione), l'analisi diffrattometrica ai raggi X e la caratterizzazione di tipo meccanico secondo la UNI 196-1.

4.3.1.1.1. Caratterizzazione meccanica.

Per ogni tipo di cemento sono stati confezionati tre provini prismatici di malta ($40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$) utilizzando sabbia normalizzata CEN EN 196-1, premiscelata in sacchetti di plastica, acqua distillata ($a/c= 0,50$) e cemento nelle quantità di:

- Cemento: 450 g;
- Acqua: 225 g;
- Sabbia: 1350 g.

I provini di malta, dopo la sformatura, avvenuta nell'intervallo 20-24h dopo la confezione, sono stati immersi in acqua a stagionare in condizioni di temperatura e di umidità controllate⁶. Alla scadenza di ogni stagionatura i provini sono stati tolti dall'acqua e pesati, mediante bilancia elettronica, successivamente si è provveduto ad eseguire le prove di flessione e di compressione.

Si riportano per ogni tipo di cemento i risultati delle varie prove di resistenza eseguite.

Per il CEM I 42,5 R si è ottenuto a 2 giorni un valore della resistenza a compressione⁷ pari a 19,0 MPa, a sette giorni si è avuto una resistenza di 29,2 MPa ed a ventotto giorni di 34,0 MPa. Si può notare che questo tipo di cemento non rispetta rigorosamente i requisiti previsti dalla normativa, essendo i valori trovati al di sotto di quelli minimi richiesti per la classe di appartenenza 42,5 R.

Nel diagramma di figura 4.15 viene riportato l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura.

⁶Rispettivamente 20°C e $\geq 95\%$.

⁷La resistenza a compressione è riferita al valore medio registrato sui tre provini ottenuti dalla prova a flessione.

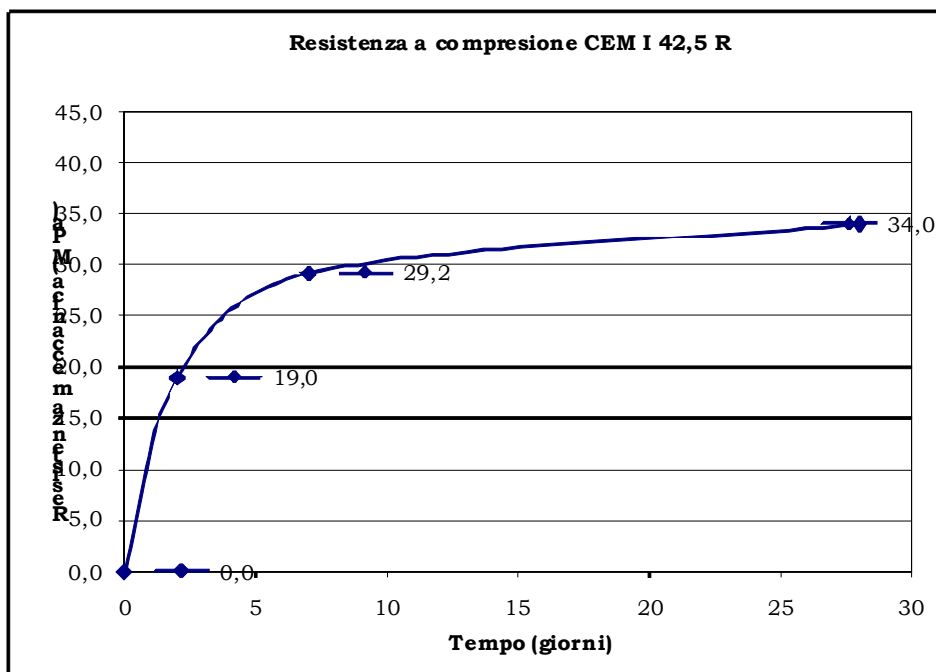


Fig. 4.15 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM I 42,5 R, a diverse stagionature.

Per il CEM II/A-S 42,5 R il valore medio della resistenza a compressione ottenuto a 2 giorni è pari a 22,5 MPa, a sette giorni si è avuto una resistenza media di 32,6 MPa ed a ventotto giorni di 40,3 MPa. Questo tipo di cemento rispetta i requisiti previsti dalla normativa a 2 e 7 giorni, solo il valore a 28 giorni è leggermente inferiore a quello minimo richiesto per l'accettazione alla classe di appartenenza 42,5 R.

In figura 4.16 è riportato l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura.

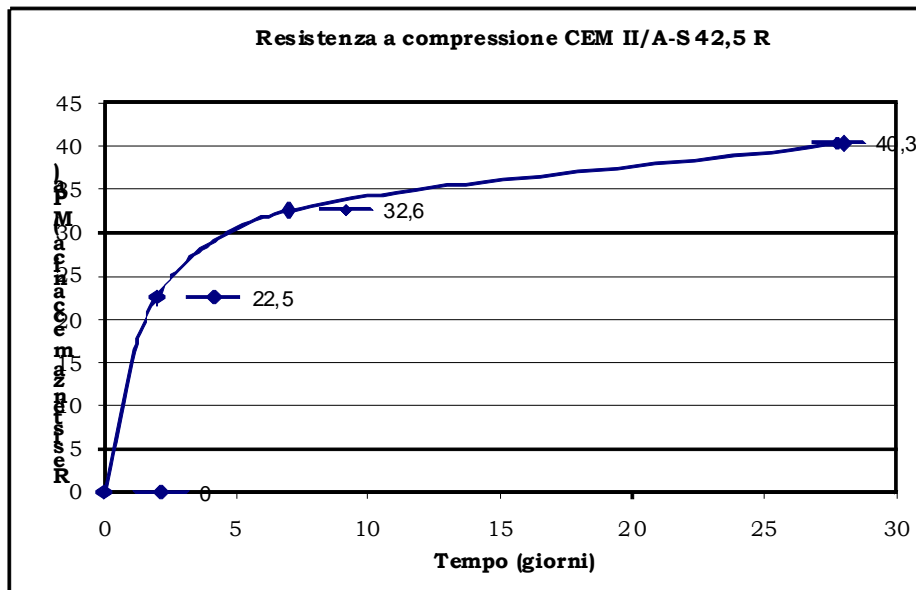


Fig. 4.16 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/A-S 42,5 R, a diverse stagionature.

Infine per il CEM III/A 42,5 N si è ottenuto un valore medio della resistenza a compressione a 2 giorni pari a 15,7 MPa, a sette giorni la resistenza media è stata di 23,5 MPa ed a ventotto giorni di 42,5 MPa. Il cemento in questione è l'unico a rispettare i requisiti previsti dalla normativa a 2, 7 e 28 giorni per l'accettazione nella propria classe di appartenenza.

In figura 4.17 si riporta l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura.

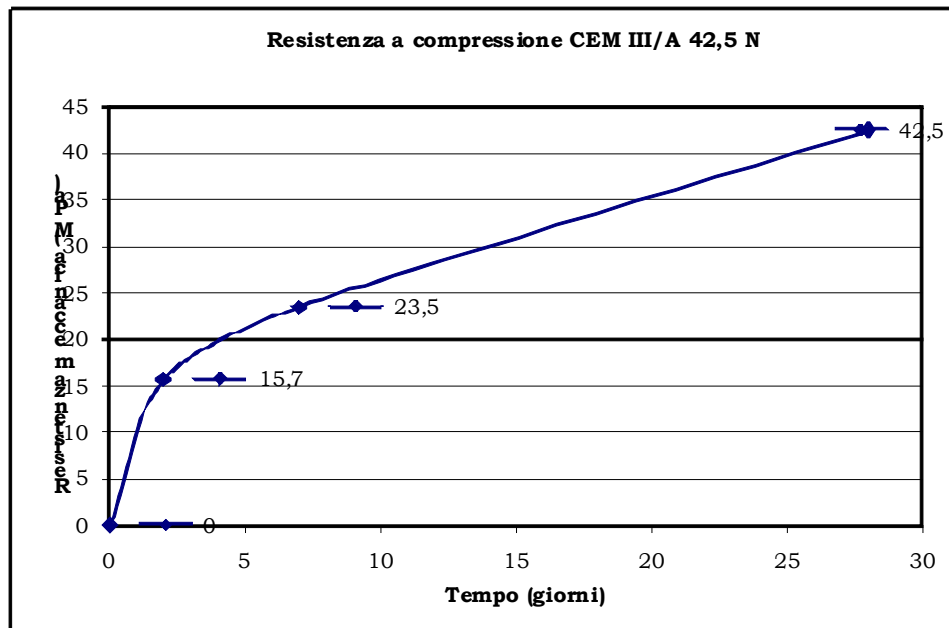


Fig. 4.17 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM III/A 42,5 N, a diverse stagionature.

4.3.1.1.2. Analisi termica.

Le analisi termiche (fig. 4.18, 4.19, 4.20) eseguite sui cementi evidenziano, una perdita complessiva, per ognuno, tra 25°C e 1000°C inferiore al 3%, conforme alla normativa vigente (<5%) EN 196-2.

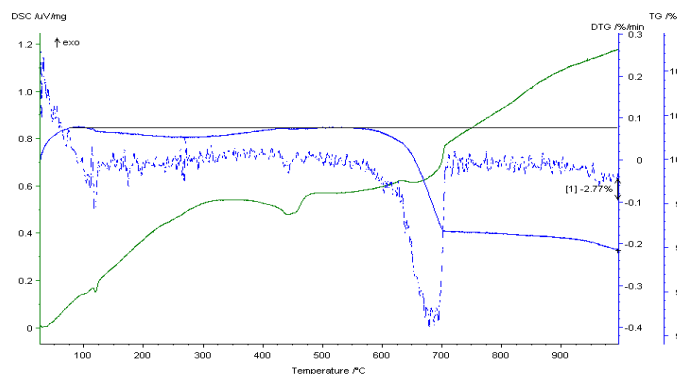


Fig. 4.18 - Analisi termica del campione di legante CEM I 42,5 R.

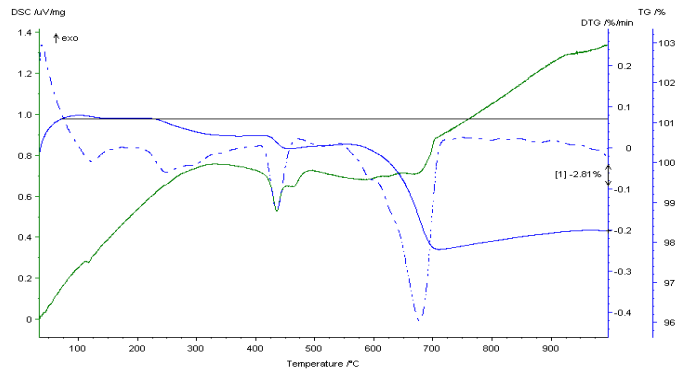


Fig. 4.19 - Analisi termica del campione di legante CEM II/A-S 42,5 R.

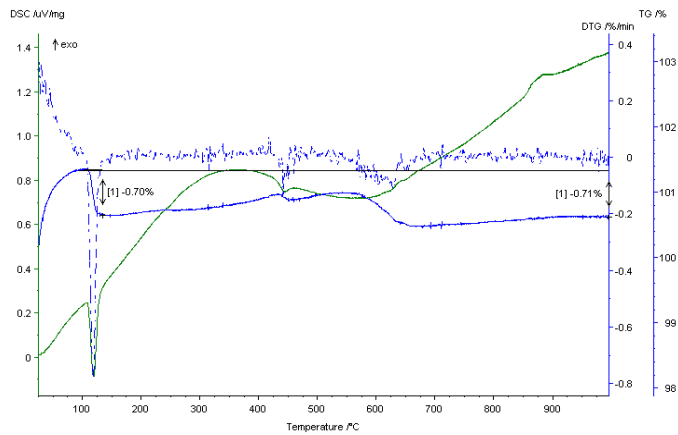


Fig. 4.20 - Analisi termica del campione di legante CEM III/A 42,5 N.

Dall'analisi termica del CEM II/A-S 42,5 R si evince la presenza di circa il 4% di calcare dall'effetto termico a 700°C, mentre dall'analisi termica del CEM III/A 42,5 N è rilevabile la presenza di un picco endotermico alla temperatura di circa 110°C, attribuibile alla perdita dell'acqua del $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, gesso biidrato contenuto nel cemento.

4.3.1.1.3. Analisi diffrattometrica.

Si riportano le analisi diffrattometriche dei diversi tipi di cementi utilizzati.

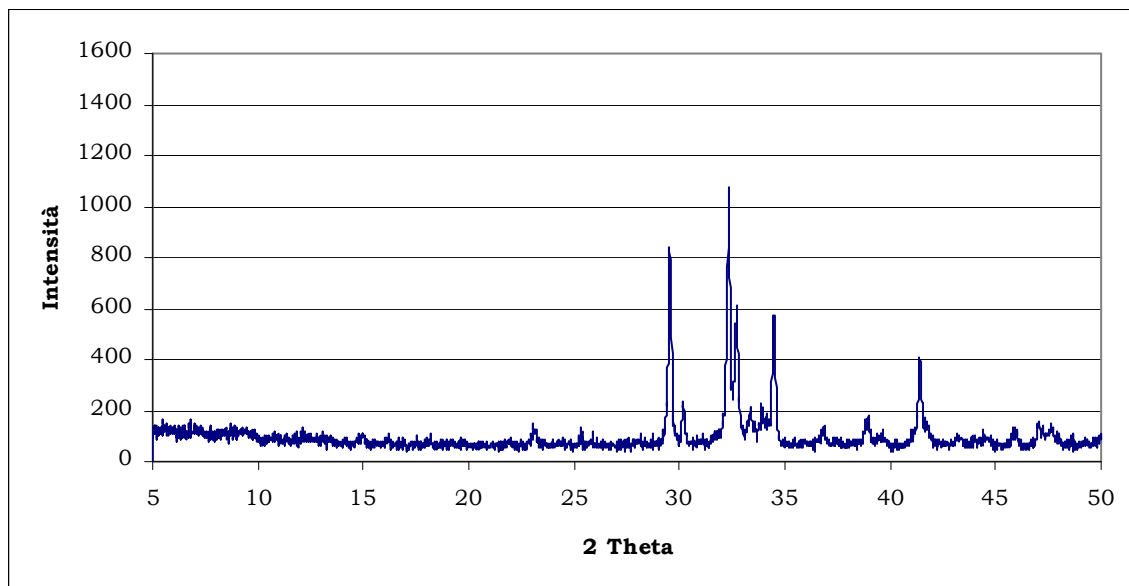


Fig. 4.21 - Diffratogramma della polvere del campione di CEM I 42,5 R.

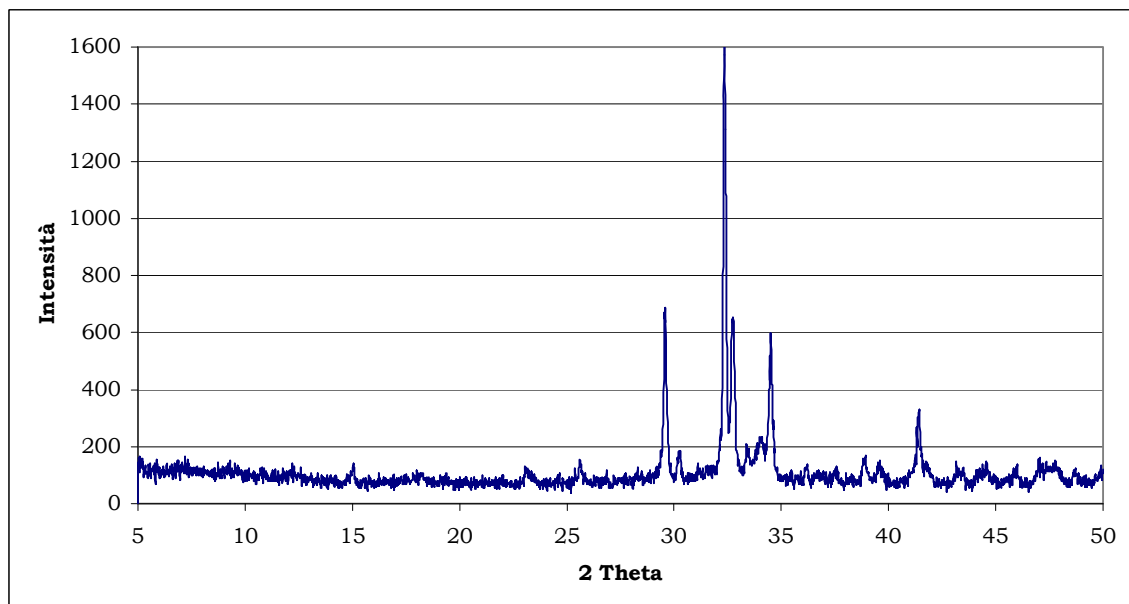


Fig. 4.22 - Diffratogramma della polvere del campione di CEM II/A-S 42,5 R.

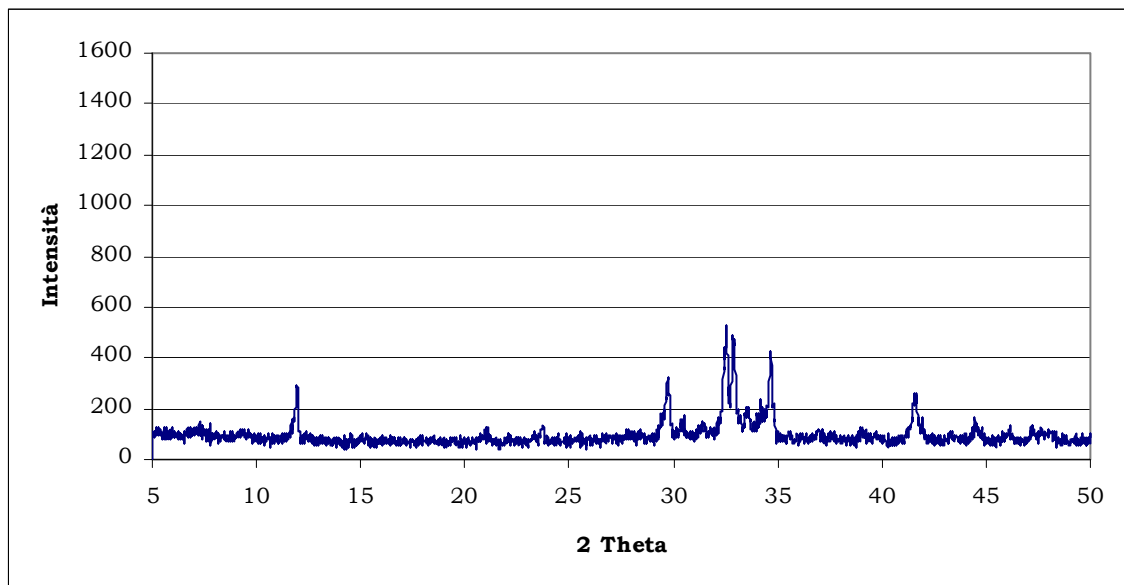


Fig. 4.23 - Diffrattogramma della polvere del campione di CEMIII/A 42,5 N.

L'analisi ai raggi X evidenzia delle differenze tra i cementi utilizzati. In particolare il diffrattogramma del cemento II evidenzia una maggiore quantità di C3S, tipica di un 42,5, rispetto al CEM I, come evidenziato anche dalle prove meccaniche.

L'analisi ai raggi X del cemento III, essendo un cemento di miscela, conferma una minore quantità delle fasi cristalline (clinker). Inoltre si evidenzia la fase cristallina del gesso.

4.3.1.1.4. Microanalisi a dispersione di energia.

Tramite la microanalisi a dispersione di energia si evidenziano i costituenti principali dei cementi.

Si nota dalla microanalisi del cemento Portland che gli elementi maggiormente presenti sono Ca e Si, rispettivamente in quantità del 55,73% e 13,57% in peso (fig.4.24).

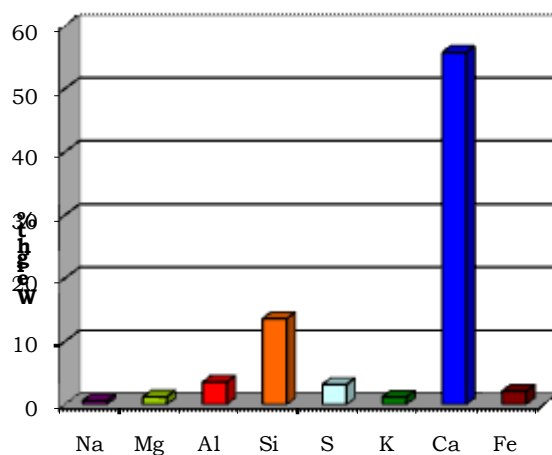


Fig. 4.24 - Microanalisi del campione di cemento CEM I 42,5 R.

Dalla analisi chimica sul secondo tipo di legante utilizzato, il cemento di miscela CEM II/A-S 42,5 R, risulta che gli elementi in maggiori quantità risultano essere sempre Ca e Si in quantità simili al cemento Portland (fig. 4.25).

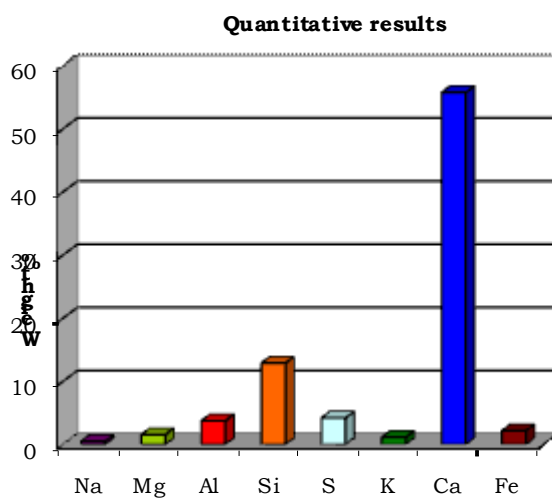


Fig. 4.25 - Microanalisi del campione di cemento CEM II/A-S 42,5 R.

Per l'ultimo legante adoperato, cioè il cemento d'altoforno del tipo CEM III/A 42,5 N, si sono ottenuti i seguenti valori: 48,07% in peso di Ca, 17,83% di Si e 6,62% di Mg, tipici di un cemento d'altoforno.

Inoltre si è evidenziata la presenza di manganese, che conferisce il tipico colore verdastro al calcestruzzo confezionato con Cem III, rispetto agli altri due cementi analizzati (fig. 4.26).

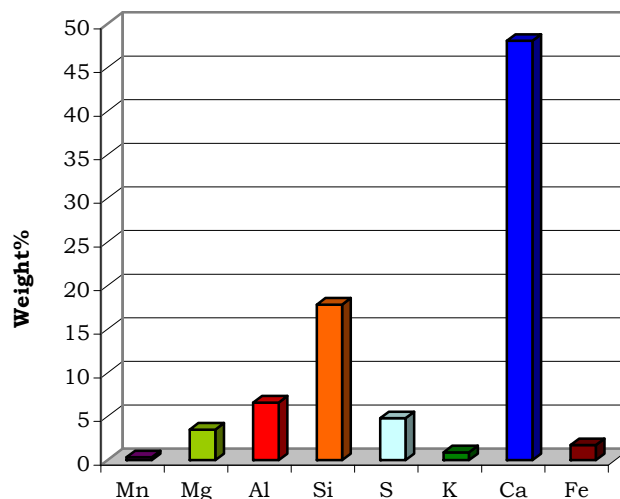


Fig. 4.26 - Microanalisi del campione di cemento CEM III/A 42,5 N.

4.3.1.1.5. Microscopia elettronica a scansione.

Attraverso le immagini ottenute dalla microscopia effettuata su campioni dei tre leganti utilizzati si evince la morfologia del materiale costituente i cementi e confrontando le varie immagini si intuisce la differenza di finezza, che viene confermata con il metodo di staccatura (UNI EN 196-6), calcolando il residuo su 10 g a 75 μm . Si è così determinato che il cemento CEM II/A-S 42,5 R è quello più finemente macinato, confermando i risultati delle prove meccaniche.

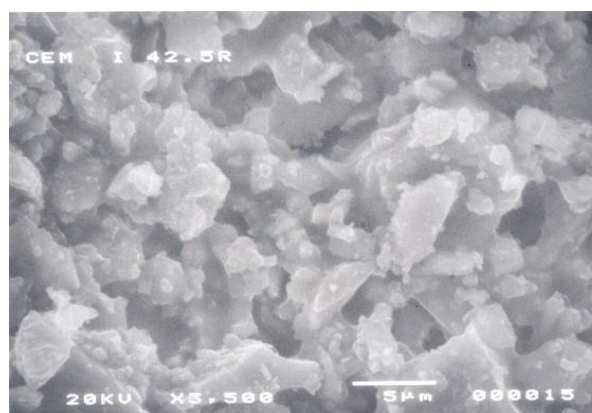


Fig. 4.27 - Micrografia del CEM I 42,5 R.

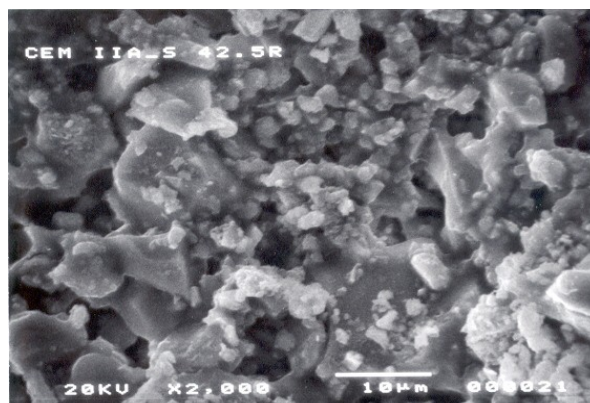


Fig. 4.28 - Micrografia del CEM II/A-S 42,5 R.

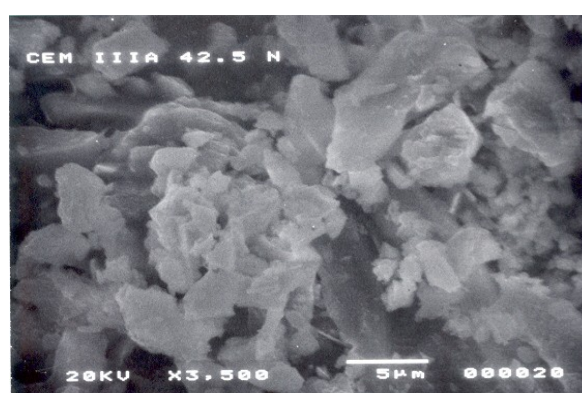


Fig. 4.29 - Micrografia del CEM III/A 42,5 N.

4.3.1.2. Aggregati.

Si analizzano in questo paragrafo gli aspetti degli aggregati utilizzati nella realizzazione degli impasti di calcestruzzi ad alte prestazioni, tenendo presente che provengono dal territorio locale, si presentano sotto forma tondeggiante, e che la loro normale utilizzazione avviene nel confezionamento di calcestruzzi ordinari, per cui presentano caratteristiche meccaniche inferiori agli aggregati lapidei normalmente utilizzati per gli HPC.

Il primo aspetto importante che viene considerato in questo lavoro è la granulometria degli elementi lapidei usati. Essa presenta tre aspetti distinti e nel contempo interconnessi:

- I. metodo adottato per l'analisi granulometrica;
- II. criterio di scelta della granulometria ottimale;
- III. metodo di calcolo delle percentuali degli aggregati disponibili, atte a riprodurre al meglio la distribuzione granulometrica ottimale.

Per determinare la distribuzione granulometrica degli aggregati si è fatto ricorso alla separazione mediante setacciatura con stacci di varia dimensione, sovrapponendoli in colonna con apertura dei fori (o maglia) decrescente dall'alto verso il basso. Dopo aver montato la colonna su un opportuno vibratore con un dispositivo a scosse, si è versato l'assortimento granulometrico alla sommità.

L'aggregato, in seguito alle vibrazioni di stacciatura, si è distribuito sui vari stacci in frazioni tali che ciascuna è passata completamente dal setaccio superiore ma non da quello su cui si trovava, essendo i fori di quest'ultimo più piccoli del diametro delle particelle di cui era costituita la frazione.

L'operazione di vagliatura può essere eseguita anche manualmente, scuotendo successivamente ciascun setaccio della serie.

Le singole frazioni granulometriche sono state pesate ed espresse in percentuale rispetto al peso di tutto il campione analizzato, consentendo di calcolare la percentuale di passante a ogni staccio di dimensione d .

Nel presente lavoro l'analisi granulometrica della sabbia è stata eseguita utilizzando stacci del diametro compresi tra 7,1mm e 0,425 mm riportati nella tabella 4.5, mentre per il pietrisco sono stati utilizzati degli stacci con diametri tra 16mm e 4 mm riportati in tabella 4.6.

| Apertura vagli (mm) | Peso trattenuto (g) | Percentuale trattenuta (%) | Percentuale cumulativa passante (%) |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 7.1 | 0 | 0 | 100 |
| 4 | 537 | 2.2 | 97.8 |
| 2.5 | 4400 | 17.8 | 80 |
| 1 | 10969 | 44.3 | 35.7 |
| 0.8 | 1761 | 7.1 | 28.6 |
| 0.425 | 1090 | 4.4 | 24.2 |
| Trattenuto fondo | 6025 | 24.3 | - |

Tab. 4.5 - Analisi granulometrica della sabbia.

In figura 4.30 è riportata la curva granulometrica della sabbia.

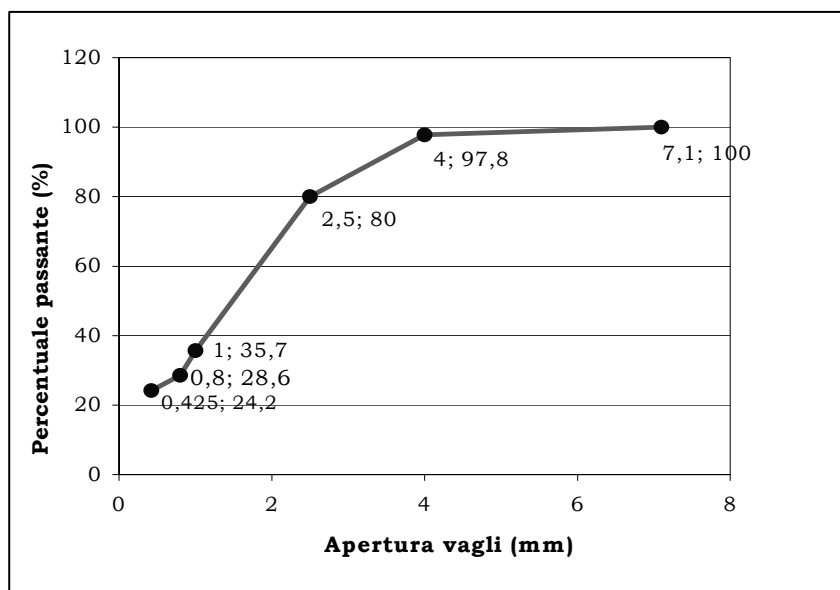


Fig. 4.30 - Curva granulometrica della sabbia secondo i dati della tabella 4.4 con scala lineare per l'apertura dei setacci.

| Diametro (mm) | % passante | % trattenuto |
|---------------|------------|--------------|
| 16 | 100 | 0 |
| 10 | 65 | 35 |
| 7.1 | 40 | 25 |
| 4 | 10 | 30 |
| Fondo | - | 10 |

Tab. 4.6 - Percentuale del pietrisco di diametro d utilizzabile nell'impasto.

La composizione della miscela è riportata nella tabella 4.7. È stato usato un dosaggio di 500 kg/m^3 di cemento ed un rapporto $a/c=0,35$.

| Componenti | Peso specifico (kg/l) | Quantità in 1 m^3 (kg/m^3) | Volume assoluto (l) |
|-----------------------|-----------------------|--|---------------------|
| Cemento | 3.1 | 500 | 161 |
| Acqua | 1 | 175 | 175 |
| Aggiunta ⁸ | - | 50 | - |
| Aria | - | - | 10 |
| Aggregati | 2.65 | 1733 | 654 |

Tab. 4.7 - Calcolo totale della miscela.

⁸Il volume dell'aggiunta è stato considerato trascurabile visti sia il peso specifico, che le dimensioni e le quantità.

Conoscendo il peso specifico⁹ degli aggregati si procede al calcolo del loro volume:

$$\text{volume aggregati} = 1000 - (161 + 175 + 10) = 654 \text{ litri/m}^3$$

mentre per il loro peso:

$$\text{peso aggregati} = 654 * 2,65 = 1733 \text{ kg/m}^3$$

Per realizzare un conglomerato con la massima densità possibile, cioè con il minor contenuto di vuoti interstiziali tra i singoli granuli, la curva granulometrica del sistema solido (cemento + aggregato) deve seguire l'equazione proposta da Fuller e Thompson:

$$P = 100 (d/D)^{1/2}$$

dove P è la percentuale di materiale passante allo staccio con apertura d , D_{max} è la massima dimensione, "diametro massimo" dell'elemento lapideo più grosso¹⁰.

Se il sistema "cemento + aggregato" soddisfa dal punto di vista granulometrico l'equazione di Fuller si realizza il massimo assortimento dimensionale nel quale gli elementi più fini, cioè i granuli del cemento, sono allocati nei vuoti interstiziali di quelli medi, cioè i granuli piccoli di sabbia, e questi ultimi si dispongono a loro volta nei vuoti esistenti tra i granuli più grossi della ghiaia o del pietrisco.

D'altra parte, un calcestruzzo che soddisfa granulometricamente l'equazione di Fuller, quindi presenta il massimo impacchettamento possibile per i suoi granuli solidi (cemento+aggregato), non coincide con un sistema che, miscelato con acqua, possa essere facilmente messo in opera per la sua limitata mobilità.

In pratica, un calcestruzzo che soddisfa l'equazione, proprio per il denso impacchettamento dei suoi granuli, si presenta scarsamente lavorabile e richiede, pertanto, mezzi di compattazione molto sofisticati per essere messo in opera.

⁹ In genere il volume e peso degli aggregati sono aggiunti nella tabella 4.3 dopo la determinazione degli altri componenti, secondo le regole del Mix Design.

¹⁰ Si definisce "diametro massimo" l'apertura del setaccio sul quale rimane trattenuto almeno il 5% di inerte.

Per questo motivo, Bolomey suggerì di modificare leggermente la curva granulometrica ottimale introducendo un parametro A che tiene conto della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile¹¹.

L'equazione di Bolomey:

$$P = A + (100-A) \cdot (d/D_{\max})^{1/2}$$

coincide con la precedente se si assume $A=0$. Il parametro A assume valori crescenti da 8 a 14 se aumenta la lavorabilità del calcestruzzo, dalla consistenza di “terra umida” a quella “superfluida”, e se si passa da aggregati alluvionali tondeggianti ad aggregati di frantumazione di forma irregolare (tab. 4.8).

L'aumento del parametro A comporta un aumento del contenuto di materiale fine, cioè del passante P al vaglio con apertura d uguale a 5 mm.

| Tipo di aggregati | Valore di A per calcestruzzi con consistenza di: | | |
|-------------------|--|------------------------|-----------------------|
| | terra umida | plastica semifluida | fluida superfluida |
| Alluvionali | 8 | 10 | 12 |
| Frantumati | 10 | 12 | 14 |

Tab. 4.8 - Valori tipici di A per ottimizzare la granulometrica secondo Bolomey.

La scelta di D_{\max} tanto nella prima equazione quanto nella seconda deve tener conto dei seguenti vincoli:

a) non deve superare il 25% della sezione minima della struttura, per evitare di aumentare le eterogeneità del materiale;

b) non deve superare la distanza tra i ferri di armatura, diminuita di 5 mm, per evitare che l'aggregato più grosso ostruisca il flusso del calcestruzzo attraverso i ferri stessi;

c) non deve superare del 30% lo spessore del copriferro, per evitare che sia ostruito il passaggio del calcestruzzo tra i casseri ed i ferri d'armatura.

¹¹ Alluvionale o frantumato.

Pertanto, le due equazioni di Fuller e Bolomey, rappresentano le distribuzioni *granulometriche ideali* del sistema “*aggregato+cemento*”, esse possono essere riferite al solo aggregato normalizzando i valori di P se si conosce la percentuale di cemento (C), riferita al peso di tutti i solidi (aggregato+cemento).

Le equazioni successive rappresentano, quindi, rispettivamente le curve *granulometriche ideali* di Fuller e di Bolomey riferite al solo aggregato:

$$P = \frac{100 (d/D_{\max})^{1/2} - C}{100 - C} * 100$$

$$P = \frac{A + (100 - A) * (d/D_{\max})^{1/2} - C}{100 - C} * 100$$

Noto, quindi, il dosaggio del cemento (c) di 500 kg/m^3 ed il contenuto totale di aggregati (i) di 1733 kg/m^3 , è facilmente calcolabile il valore C , come:

$$C = \frac{c}{c + i} * 100 = \frac{500}{500 + 1733} * 100 \cong 22$$

mentre per il calcolo del parametro A , dalla tabella di ottimizzazione (tabella 4.8) si è scelti $A=10$, utilizzando aggregati alluvionali e prevedendo una consistenza plastica.

Applicando quindi la legge di Bolomey, riferita al solo aggregato, si ottengono, portando in conto anche il pietrisco setacciato al vaglio $d=10 \text{ mm}$ e $d=16 \text{ mm}$, il passante P ideale dell'intero aggregato (sabbia+pietrisco):

$$P (d=10) = 75,83;$$

$$P (d=7,1) = 61,48;$$

$$P (d=4) = 42,31;$$

$$P (d=2.5) = 30,23;$$

$$P (d=1) = 13,46;$$

$$P (d=0,8) = 10,42;$$

$$P (d=0,425) = 3.42;$$

In generale, l'impiego della curva di Bolomey rispetto a quella di Fuller comporta una maggiore quantità di materiale fino, facilitando la lavorabilità, il trasporto ed il pompaggio del calcestruzzo, ed una minore quantità di inerte grosso (>5 mm).

Riportando graficamente (fig. 4.31) le percentuali di passanti di sabbia e pietrisco della tabelle 4.5 e 4.6 si è proceduti all'assortimento degli aggregati.

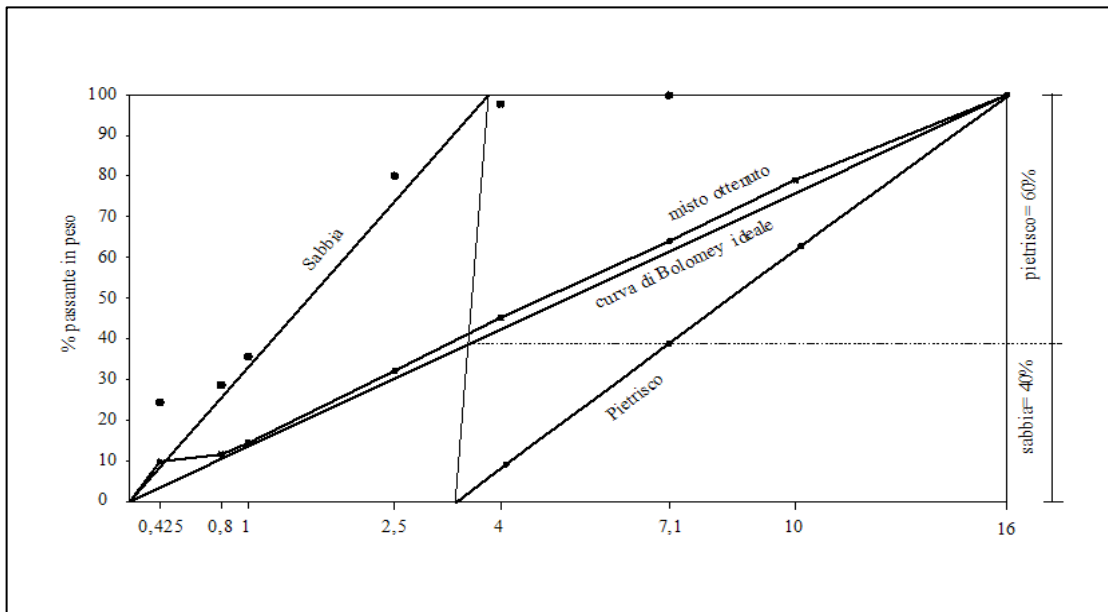


Fig. 4.31 - Curva granulometrica per il calcolo grafico dell'assortimento dei due inerti.

I punti rappresentativi dell'analisi granulometrica del pietrisco appartengono alla retta interpolatrice, essendo state imposte le percentuali di passante. Difatti, il pietrisco è stato suddiviso in quattro frazioni granulometriche e per ogni frazione è stata utilizzata la percentuale riportata in tabella 4.6

Intersecando la retta, ottenuta unendo il punto corrispondente al diametro massimo della frazione di passante della sabbia e il punto corrispondente al diametro minimo della frazione di passante del pietrisco, con la curva ideale di Bolomey si ottengono le percentuali di sabbia (40%) e di pietrisco (60%). Dalla percentuale di passante si determina quella di trattenuto, necessaria per la determinazione dell'assortimento granulometrico degli agglomerati da utilizzare nell'impasto (tab. 4.9).

| Apertura vagli (mm) | Aggregato ideale (%) | Sabbia (%) | Pietrisco (%) | Contributo | | Misto ottenuto (%) |
|---------------------|----------------------|------------|---------------|------------|---------------|--------------------|
| | | | | Sabbia (%) | Pietrisco (%) | |
| 16 | 100 | 100 | 100 | 40 | 60,0 | 100 |
| 10 | 75,83 | 100 | 65 | 40 | 39,0 | 79,0 |
| 7,1 | 61,48 | 100 | 40 | 40 | 24,0 | 64,0 |
| 4 | 42,31 | 97,8 | 10 | 39,1 | 6,0 | 45,1 |
| 2,5 | 30,33 | 80,0 | - | 32,0 | - | 32,0 |
| 1 | 13,46 | 35,7 | - | 14,3 | - | 14,3 |
| 0,8 | 10,42 | 28,6 | - | 11,4 | - | 11,5 |
| 0,425 | 3,42 | 24,2 | - | 9,7 | - | 9,7 |

Tab. 4.9 - Distribuzione granulometrica dell'aggregato ottimale, di quelli disponibili e del misto ottenuto.

Si osserva (fig. 4.31) che l'analisi granulometrica ottenuta è prossima alla *curva ideale* di Bolomey.

Conoscendo le rispettive percentuali si ricava il quantitativo di sabbia e di pietrisco dalla somma totale degli aggregati:

$$\text{Peso sabbia} = 40\% \times 1733 = 693 \text{ kg}$$

$$\text{Peso pietrisco} = 1733 - 693 = 1040 \text{ kg}$$

Ottenuto il peso totale del pietrisco, si procede al calcolo del quantitativo per ogni frazione, mentre la sabbia viene utilizzata tal quale. Considerando un volume di miscela pari a 13,00 litri, il quantitativo di sabbia e di pietrisco è stato calcolato nel seguente modo:

$$1000:693 = 13,00: \text{sabbia} \Rightarrow \text{sabbia} = \frac{693 \cdot 13,00}{1000} = \mathbf{9,01 \text{ kg}}$$

$$1000:1040 = 13,00: \text{pietrisco} \Rightarrow \text{pietrisco} = \frac{1040 \cdot 13,00}{1000} = \mathbf{13,52 \text{ kg}}$$

I 13,52 kg di pietrisco sono stati ripartiti secondo le percentuali di trattenuto teorico ai vari crivelli (tab. 4.6), ricavando, quindi, i kg delle diverse frazioni granulometriche impiegate (tabella 4.10).

| Diametro (mm) | % Passante | % Trattenuto | kg |
|---------------------|------------|--------------|--------------|
| 16 | 100 | 0 | - |
| 10 | 65 | 35 | 4,732 |
| 7,1 | 40 | 25 | 3,380 |
| 4 | 10 | 30 | 4,066 |
| Fondo ¹² | - | 10 | 1,352 |

Tab. 4.10 - Determinazione, alle diverse frazioni granulometriche, dei kg di pietrisco impiegati.

4.3.1.2.1. Analisi Termica.

Le analisi effettuate sul trattenuto a 10 mm e sul trattenuto a 4 mm (Fig. 4.27-28) evidenziano una piccola perdita a circa 700 °C dovuta alla presenza di carbonato, (dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), come risulta anche dall'analisi diffrattometrica ai raggi X.

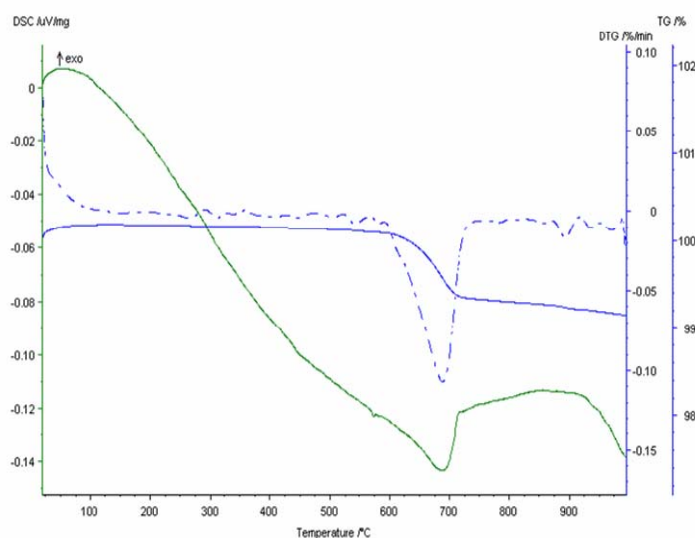


Fig. 4.32 - Analisi termica del campione trattenuto a 10 mm.

¹² Si è unificato il passante al vaglio 4 mm.

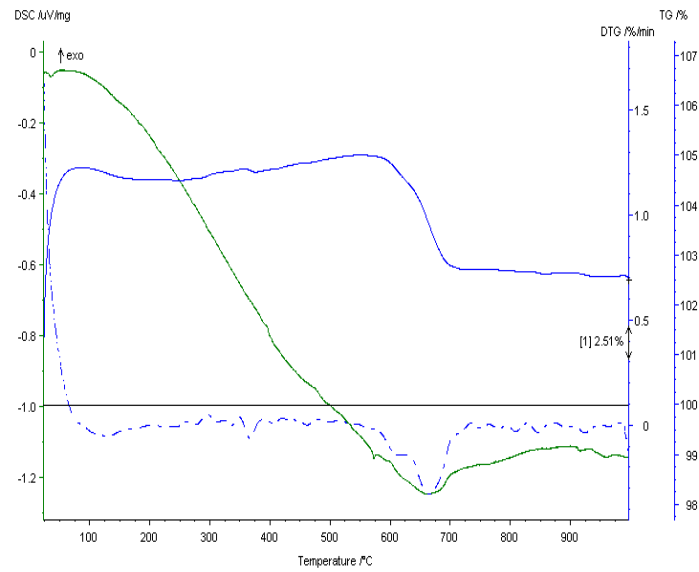


Fig. 4.33 - Analisi termica del campione trattenuto a 4 mm.

4.3.1.2.2. Analisi diffrattometrica ai raggi X.

Sono riportati di seguito le analisi diffrattometriche delle varie frazioni granulometriche: trattenuto a 10 mm, a 4 mm, del passante a 4 mm e della sabbia.

Dal diffrattogramma ai raggi X del campione trattenuto a 10 mm (fig. 4.34) evidenzia una ricca presenza di silice cristallina e di apprezzabili quantità di anorthite e dolomite.

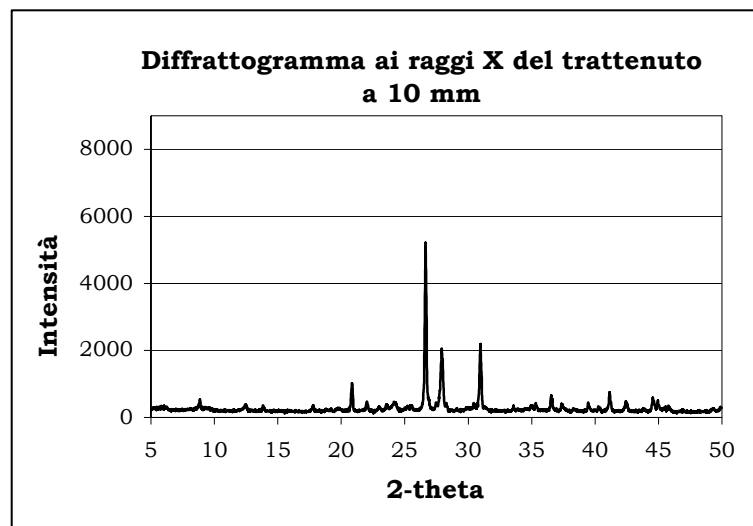


Fig. 4.34 - Diffrattogramma del campione trattenuto a 10 mm.

Nel diffrattogramma del trattenuto a 4 mm (fig. 4.35) le quantità di anorthite e dolomite sono trascurabili rispetto alla quantità di silice cristallina.

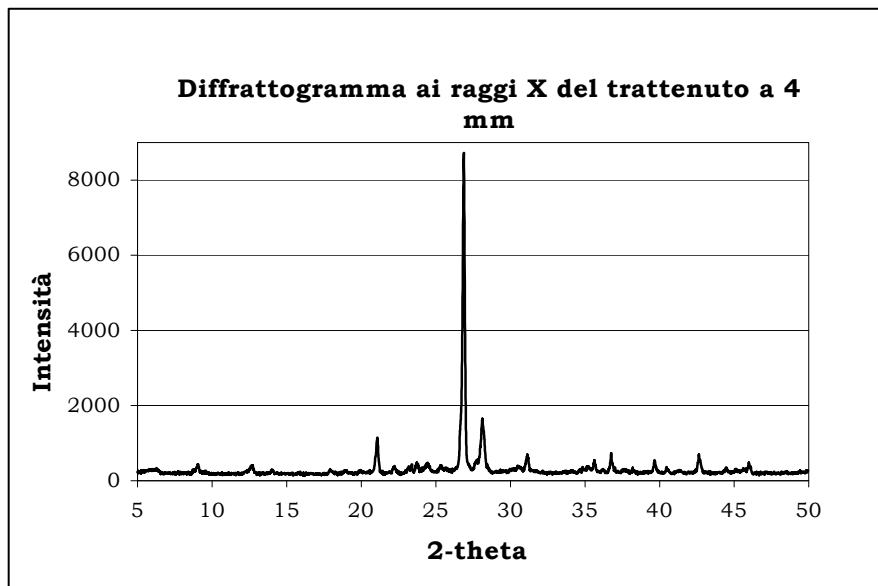


Fig. 4.35 - Diffrattogramma del campione trattenuto a 4 mm.

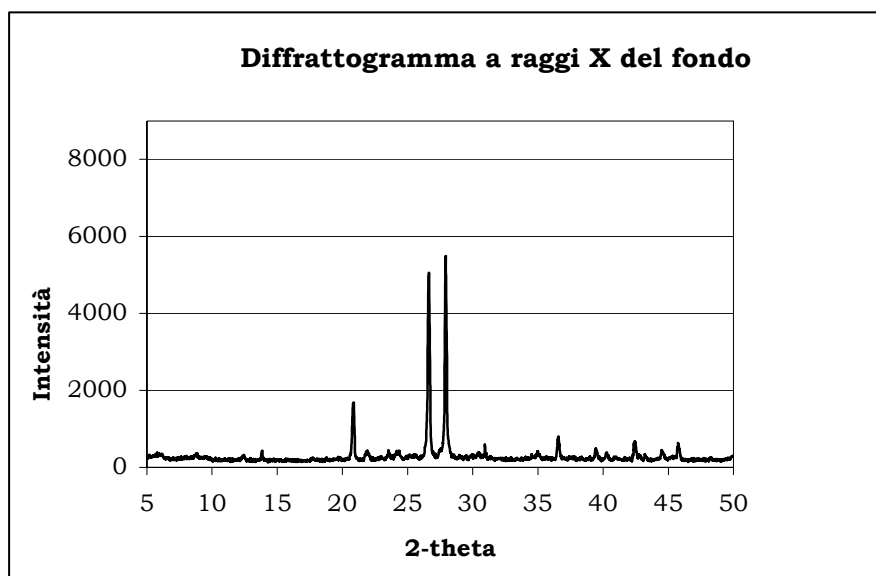


Fig. 4.36 - Diffrattogramma del campione passante a 4 mm.

Dal diffrattogramma del fondo (passante a 4 mm), figura 4.36, si evince la presenza di quarzo e anorthite, nonché di piccole quantità di dolomite.

Infine per quanto riguarda il diffrattogramma della sabbia di figura 4.37 si evidenzia principalmente la presenza di silice cristallina nella forma di quarzo e da un silico-alluminato di calcio e sodio (anorthite).

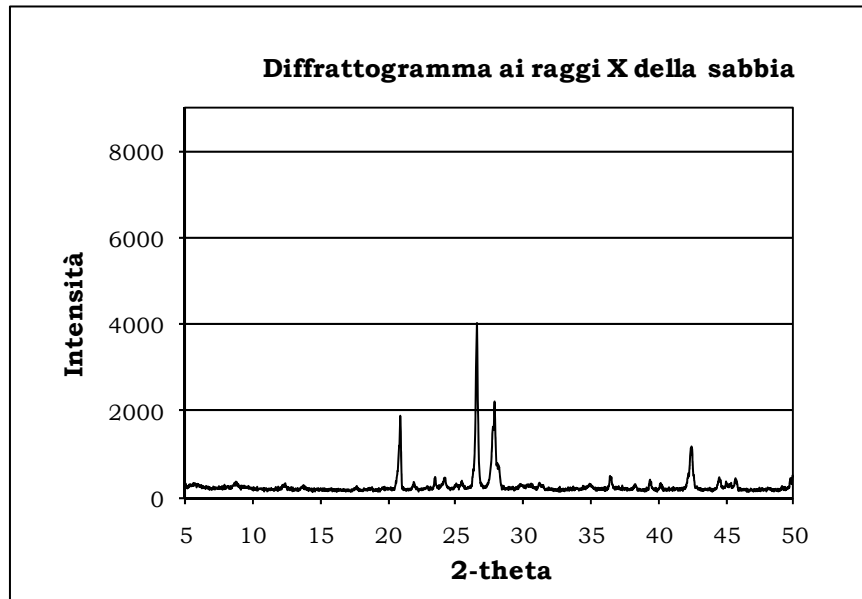


Fig. 4.37 - Diffrattogramma del campione di sabbia.

4.3.1.2.3. Analisi chimica.

Vengono qui di seguito riportate le analisi chimiche dei diversi aggregati.

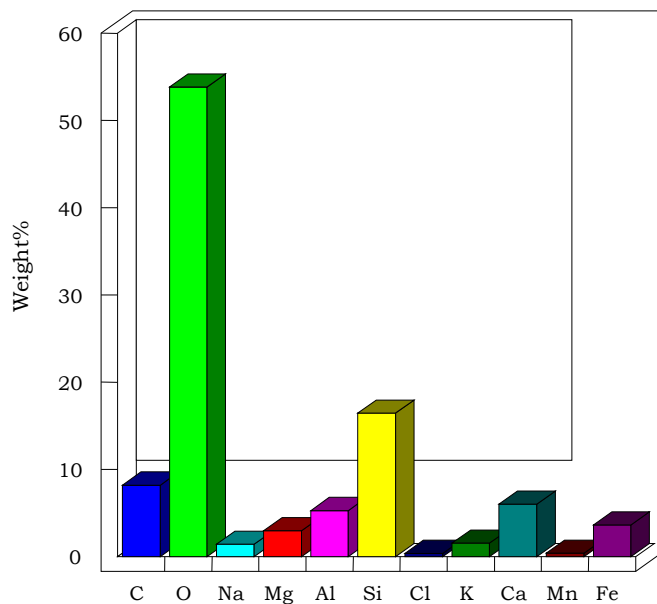


Fig. 4.38 - Analisi chimica del campione trattenuto a 10 mm.

Nella figura 4.38 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 10 mm conferma quanto evidenziato nell'analisi diffrattometrica, cioè la presenza di silice, di magnesio, di calcio ed alluminio (quarzo, anorthite e dolomite).

Anche nella figura 4.39 l'analisi elementare del trattenuto a 4 mm evidenzia soprattutto la presenza di silice.

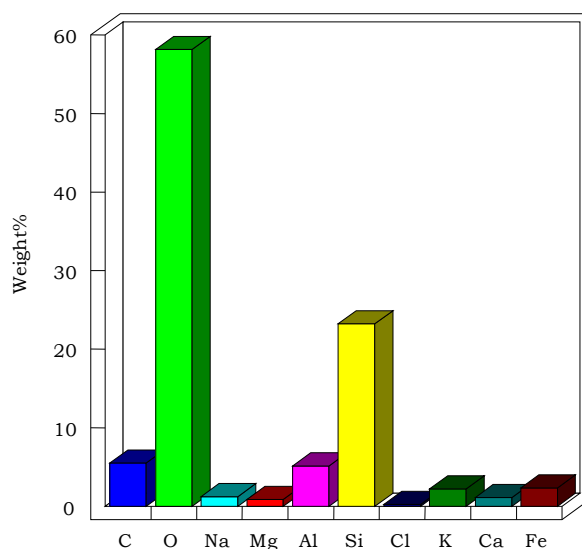


Fig. 4.39 - Analisi chimica del campione trattenuto a 4 mm.

L'analisi elementare riportata in figura 4.40 eseguita sul campione di materiale fine (fondo) evidenzia una significativa quantità di alluminio, oltre alla silice, confermando la presenza di anorthite, come evidenziato dall'analisi ai raggi X.

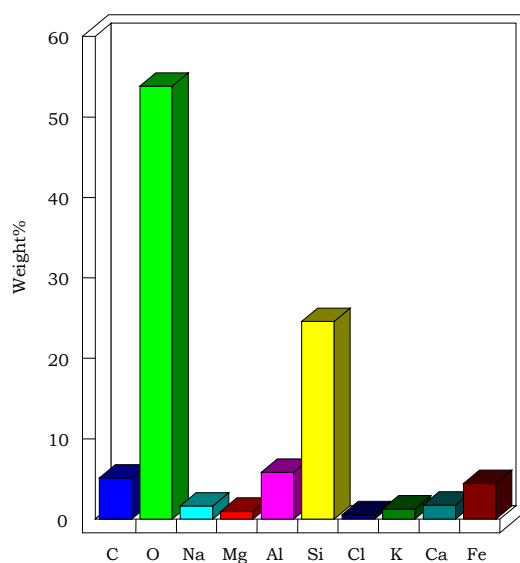


Fig. 4.40 - Analisi chimica del campione passante a 4 mm.

Dall'analisi elementare eseguita sul campione di sabbia (fig. 4.41) si evince che il silicio e l'alluminio sono presenti in quantità significative, attribuite alle fasi cristalline del quarzo e dell'anorthite.

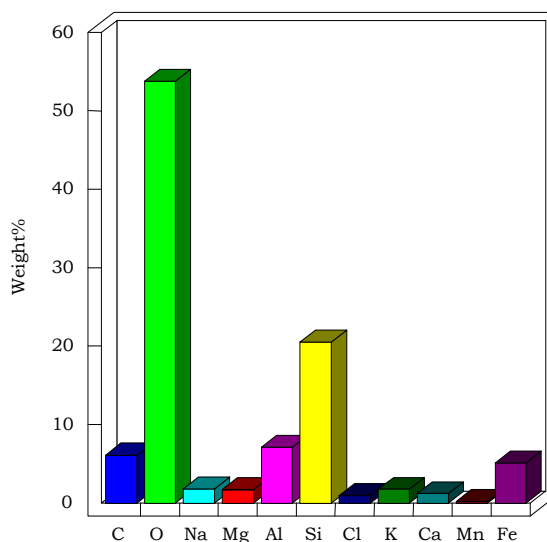


Fig. 4.41 - Analisi chimica del campione di sabbia.

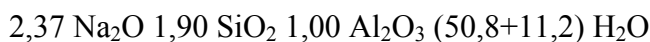
4.3.1.3. Zeoliti.

Le zeoliti aggiunte negli impasti sono la 4A e la 5A, in particolare sono state utilizzate sia zeoliti di dimensioni inferiori ad 1 μm , preparate in laboratorio, sia zeoliti di dimensioni superiori al μm prodotte industrialmente e facilmente reperibili sul mercato locale.

Vengono riportati in questo paragrafo i procedimenti di sintesi, di preparazione e di caratterizzazione delle zeoliti utilizzate.

4.3.1.3.1. Sintesi e caratterizzazione della zeolite 4A.

Il sistema di sintesi individuato per lo studio della cristallizzazione della zeolite A è quello avente la seguente composizione molare espressa in ossidi:



Tale composizione fa riferimento ad un precedente lavoro di tesi¹³

¹³ D.Caccamo, "Produzione del setaccio molecolare 3A mediante sintesi diretta", A.A.2001/02.

I reagenti utilizzati per tutti i sistemi studiati, consistono in una fonte di silice, una fonte di allumina e acqua distillata. La fonte di silice è un silicato di composizione riportata in tabella 4.11:

| composti | % in peso |
|-------------------|------------------|
| SiO ₂ | 29.46 |
| Na ₂ O | 13.76 |
| H ₂ O | 56.78 |

Tab. 4.11 - Composizione del silicato.

La fonte di allumina è un alluminato preparato solubilizzando Al(OH)₃ in una soluzione concentrata di NaOH, in pellets (Carlo Erba) e puro al 97%, e acqua distillata.

La solubilizzazione si è ottenuta portando la miscela a circa 105°C in una beuta di vetro chimicamente inerte e termicamente resistente alle condizioni operative adottate. La beuta è stata collegata ad un condensatore refrigerante a ricaduta. Tale sistema ha evitato le perdite di acqua per evaporazione e l'incremento della pressione.

Si è mantenuta un'agitazione magnetica moderata fino ad ottenere una soluzione limpida e infine si è pesata la quantità di alluminato richiesta dal sistema di reazione.

I reagenti sono stati miscelati ed omogeneizzati a temperatura ambiente, il sistema di reazione così realizzato è stato mantenuto a T= 25°C per 7 giorni, al fine di ottenere microcristalli di piccole dimensioni. Successivamente il prodotto di reazione è stato lavato e filtrato utilizzando un buchner in materiale plastico con filtro di carta poroso, sistemato su una beuta a pareti spesse, collegata ad una pompa da vuoto. Dopo abbondante lavaggio con acqua distillata, il cake ottenuto viene essiccato in forno a 100 ± 2 °C per 12 ore per eliminare l'acqua di idratazione e successivamente ambientato per altre 12 ore circa. Il prodotto è stato quindi finemente suddiviso e sottoposto alle analisi.

Le analisi condotte hanno riguardato: la diffrazione ai raggi X, la microscopia a scansione elettronica, l'analisi EDAX (microanalisi a dispersione di energia), l'analisi calorimetrica.

Sono riportati di seguito i risultati delle analisi che hanno caratterizzato la zeolite sintetizzata in laboratorio.

L'analisi ai raggi X conferma l'ottenimento della fase desiderata; il prodotto ottenuto si presenta altamente cristallino (fig. 4.42).

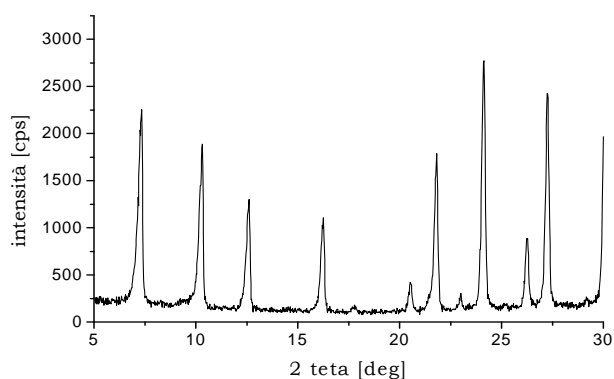


Fig. 4.42 - Diffattogramma della polvere dei cristalli di zeolite A ottenuti dal gelo: $2,37 \text{ Na}_2\text{O}$ $1,90 \text{ SiO}_2$ $1 \text{ Al}_2\text{O}_3$ (50,8+11,2) H_2O a $T=25^\circ\text{C}$ per 168h.

La micrografia al microscopio elettronico a scansione del campione di zeolite LTA sintetizzata ha evidenziato la scarsa presenza di fase amorfa, una dimensione dei cristalli inferiore ad $1\mu\text{m}$ con morfologia prevalentemente arrotondata.

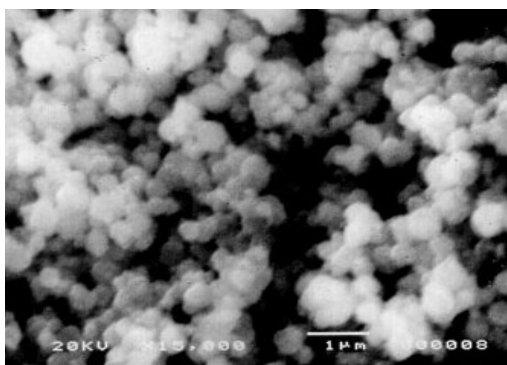


Fig. 4.43 - Micrografia dei cristalli di zeolite A ottenuti dal gelo: $2,37 \text{ Na}_2\text{O}$ $1,90 \text{ SiO}_2$ $1 \text{ Al}_2\text{O}_3$ (50,8+11,2) H_2O omogeneizzato e mantenuto a 25°C per 168 ore. Dalla microanalisi si rileva che il rapporto Si/Al e il rapporto Na/Al sono uguali ad 1, tipici di una zeolite A pura.

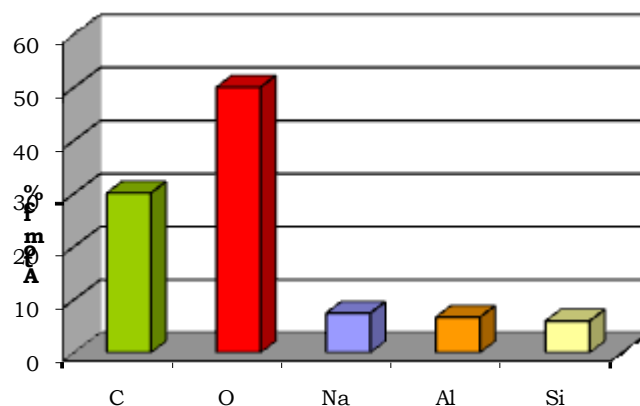


Fig. 4.44 - Microanalisi della zeolite 4A.

Dall'analisi termica effettuata sulla zeolite 4A si rileva che il contenuto di acqua in essa presente è pari a circa il 20% in peso.

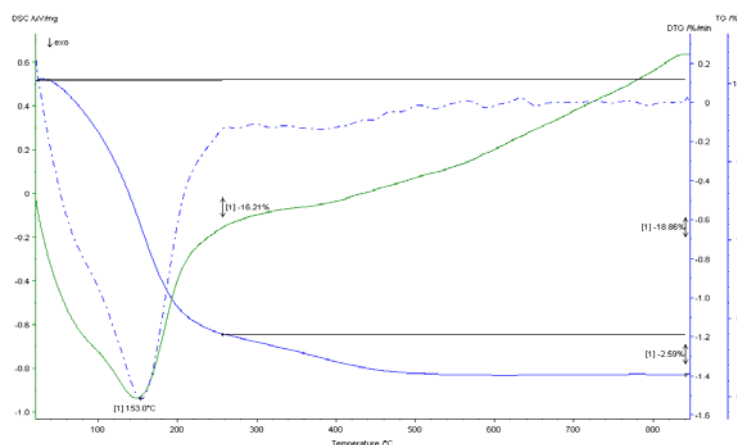


Fig. 4.45 - Analisi termica della zeolite 4A.

4.3.1.3.2. Preparazione e caratterizzazione della zeolite 5A.

La zeolite 5A si ottiene dalla zeolite 4A sottoponendo quest'ultima a scambio ionico con soluzioni di sali di calcio.

In particolare la procedura di scambio utilizzata ha previsto l'utilizzo di una soluzione 1 M di Nitrato di Calcio con un rapporto solido (zeolite)/soluzione è pari a 250g/1 litro.

La procedura di scambio è avvenuta in due fasi: la prima fase è stata condotta a temperatura ambiente mantenendo in agitazione il sistema zeolite + soluzione calcica, per un tempo pari a 2h.

Successivamente la zeolite è stata recuperata, messa a contatto con una nuova soluzione calcica ed il sistema così ottenuto è stato mantenuto alla $T=60^{\circ}\text{C}$ per 2h. Il prodotto recuperato è stato lavato, essiccato ed infine caratterizzato.

L'operazione di scambio non altera, ovviamente, la cristallinità e la morfologia della zeolite, ciò è confermato dall'analisi ai raggi X e dalla micrografia a scansione elettronica.

Dall'analisi termica effettuata sulla zeolite 5A si rileva che il contenuto di acqua in essa presente è pari a circa il 20% in peso.

Dalla microanalisi a dispersione di energia si ricava che il 90% del sodio è stato scambiato con il calcio.

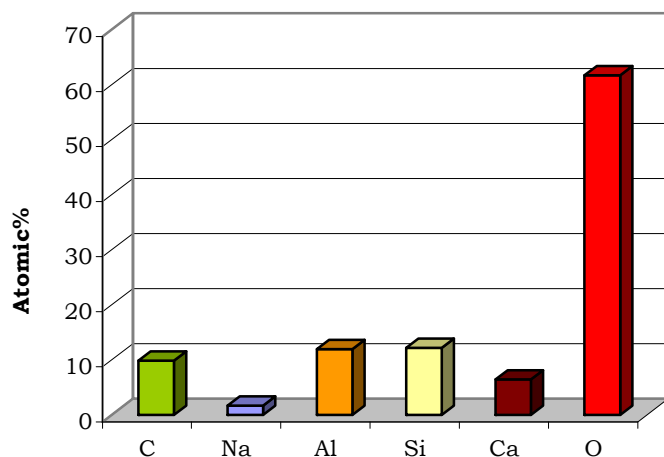


Fig. 4.46 - Microanalisi della zeolite 5A di laboratorio.

4.3.1.3.3. Caratterizzazione della zeolite 4A industriale.

L'analisi ai raggi X della zeolite 4A industriale conferma l'elevata cristallinità del materiale.

La microscopia a scansione elettronica permette di evidenziare una dimensione dei cristalli nettamente superiore al μm (2-5 μm) ed una morfologia prevalentemente cubica, tipica della zeolite 4A industriale (fig. 4.47)

Dall'analisi termica effettuata sulla zeolite 4A industriale si rileva che anche in questo caso il contenuto di acqua in essa presente è pari a circa il 20% in peso.

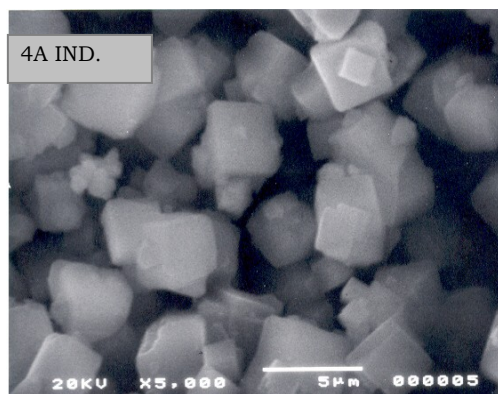


Fig. 4.47 - Micrografia dei cristalli di zeolite 4A industriale.

La microanalisi a dispersione di energia conferma i rapporti Si/Al e Na/Al uguali ad uno nei cristalli di zeolite 4 A (fig. 4.48).

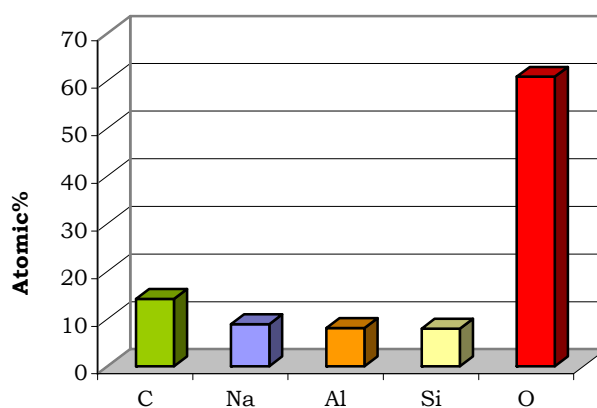


Fig. 4.48 - Microanalisi della zeolite 4A industriale.

4.3.1.3.4. Caratterizzazione della zeolite 5A industriale.

L'analisi ai raggi X conferma la cristallinità della zeolite 5A di provenienza industriale; la microscopia a scansione conferma la morfologia cubica della zeolite 5A.

L'acqua contenuta nella zeolite 5A industriale valutata tramite analisi termica è sempre pari al 20% in peso della zeolite.

Dalla microanalisi a dispersione di energia si ricava che la quantità di sodio scambiata con il calcio è pari a circa il 35%. La zeolite 5A industriale mantiene delle proprietà sodiche (fig. 4.49).

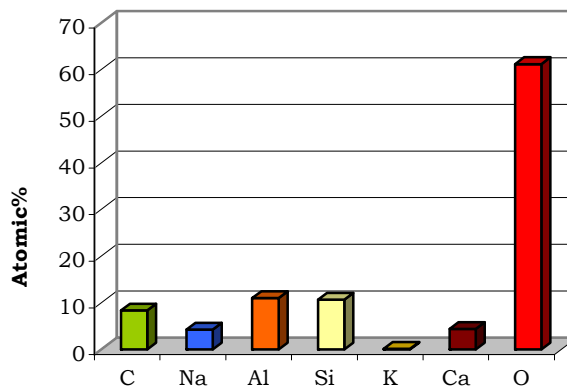


Fig. 4.49 - Microanalisi della zeolite 5A industriale.

4.3.1.4. Additivi.

Per la realizzazione degli impasti si è utilizzato un additivo a base acrilica (Dynamon SP1) di cui viene riportata la scheda tecnica.

Esso è basato sulla tecnologia DPP (*Designed Performance Polymer*), che permette, attraverso la completa progettazione dei monomeri, di modulare le caratteristiche dell'additivo in relazione alle specifiche prestazioni richieste per il calcestruzzo.

Grazie alla sua elevata lavorabilità (classe di consistenza S4-S5 secondo la norma UNI EN 206-1) i calcestruzzi confezionati con questo tipo di additivo risultano di facile posa in opera allo stato fresco e di elevate prestazioni meccaniche allo stato indurito.

Il superfluidificante utilizzato è un additivo con prestazioni superiori sia a quelli a base di naftalensolfonato o melamminsolfonato che a quelli acrilici di prima generazione, in termini di riduzione di acqua e di incremento delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature.

Tale additivo è particolarmente indicato nel settore della prefabbricazione e dove esista la necessità di una forte riduzione di acqua, accompagnata da una buona accelerazione delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature, inoltre garantisce un'elevata fluidità e nello stesso tempo non produce significativi rallentamenti dello sviluppo delle resistenze meccaniche del calcestruzzo a breve stagionatura.

Si presenta come una soluzione acquosa al 30,5% di polimeri acrilici, capaci di disperdere efficacemente i granuli di cemento.

La sua azione deflocculante può essere vantaggiosamente utilizzata:

- ✓ per ridurre l'acqua rispetto al calcestruzzo non additivato a pari lavorabilità;
- ✓ per incrementare la lavorabilità rispetto al calcestruzzo non additivato a pari rapporto acqua/cemento;
- ✓ per ridurre sia l'acqua che il cemento in modo da lasciare inalterato sia il rapporto acqua/cemento, sia la lavorabilità rispetto al calcestruzzo non additivato.

La quantità, 1% in peso sul cemento, ed il tipo di additivo (SP1) da utilizzare è stato suggerito dai risultati ottenuti in un precedente lavoro¹⁴.

4.3.1.5. Silica fume.

Si è utilizzato un prodotto della Mapei (Mapeplast SF) aggiunto negli impasti nelle quantità del 10%.

È un componente in polvere ad attività pozzolanica a base di microsilica per malte e calcestruzzi di alta qualità. Determina il miglioramento di tutte le proprietà del calcestruzzo ed in particolare conferisce maggiore coesione all'impasto fresco, alte resistenze meccaniche, maggiore impermeabilità e durabilità nei confronti degli agenti aggressivi liquidi e gassosi.

Inoltre facilita il pompaggio di calcestruzzi magri, a consistenza fluida e con basso dosaggio di cemento. Per la preparazione degli impasti viene aggiunta unitamente agli altri ingredienti: cemento, aggregati, acqua e superfluidificante.

Il tutto viene mescolato per qualche minuto fino ad ottenere un impasto omogeneo. Durante questa operazione si aggiunge l'additivo SP1 superfluidificante, dopodiché l'impasto si getta e si lavora come un normale calcestruzzo.

4.3.1.6. Acqua d'impasto.

Si è utilizzata, per la produzione degli impasti, acqua potabile di rubinetto, pertanto priva di tutte quelle sostanze ritenute dannose.

Avendo imposto un rapporto a/c pari a 0,35, l'acqua riferita al solo cemento, per m³ d'impasto, è stata di 175 litri (tab. 4.7).

¹⁴ M. Varacalli "Lavorabilità e caratteristiche meccaniche di calcestruzzi ad alte prestazioni", A.A. 2001/02.

Il confezionamento di ogni impasto di calcestruzzo è risultato di 13,00 litri, con un dosaggio di cemento pari a 6,500 kg, pertanto l'acqua strettamente necessaria è risultata di $a = 0,35 \cdot 6,500 = 2,280$ litri.

Inoltre, è stato calcolato ed aggiunto il quantitativo di acqua pari a 0,100 litri persa dagli inerti nel passare dallo stato di s.s.a allo stato completamente asciutto.

4.3.2. Materiali per calcestruzzi SCC

E' stato fatto uno studio preliminare sui materiali utilizzati valutando le schede tecniche fornite dai produttori ed in una fase successiva si è fatta un'ulteriore caratterizzazione mediante prove di laboratorio atte ad affinare le conoscenze di carattere chimico, fisico e meccanico dei prodotti adoperati.

4.3.2.1. I cementi

Per il confezionamento degli impasti di calcestruzzo sono stati utilizzati i seguenti tipi di cemento bianco (UNI EN 197-1):

CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

CEM I 52,5 R bianco.

Il primo è un cemento Portland di miscela come indicato dal numero II, in cui il clinker, che rappresenta il costituente principale del cemento, è presente per valori compresi tra il 65 - 79 %. La lettera LL indica che il tenore di carbonio organico totale (TOC), determinato in conformità al pr EN 13639: 1999, non deve essere maggiore dello 0,20% in massa, mentre la lettera B indica che la parte minerale (calcare) può variare tra il 21 - 35 %. Il valore 32,5 indica la classe di resistenza, mentre la lettera R sta ad indicare l'elevata resistenza iniziale.

Il secondo tipo di cemento utilizzato (CEM I 52,5 R Bianco) è un cemento Portland, come indicato dal numero I, in cui il clinker, che rappresenta il costituente principale, è presente per valori compresi tra il 95 - 100 %. Il valore 52,5 indica la classe di resistenza, mentre la lettera R sta ad indicare l'elevata resistenza iniziale.

Entrambi i tipi sono dei cementi bianchi idonei per la confezione di calcestruzzi a vista.

La norma UNI EN 197/1 prescrive, inoltre, che le resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta confezionati con il cemento da testare nel rispetto della UNI EN 196-1 debbono rispettare i valori prefissati.

4.3.2.1.1. Caratterizzazione meccanica

Per ogni tipo di cemento sono stati confezionati tre provini prismatici di malta (40mmx40mmx1mm) utilizzando sabbia normalizzata CEN EN 196-1, premiscelata in sacchetti di plastica, acqua distillata ($a/c= 0,50$) e cemento nelle quantità di:

Cemento: 450 g;

Acqua: 225 g;

Sabbia: 1350 g.

I provini di malta, dopo la sformatura, avvenuta nell'intervallo 20 - 24 ore dopo la confezione, sono stati immersi in acqua a stagionare in condizioni di temperatura e di umidità controllate¹⁵. Alla scadenza di ogni stagionatura i provini sono stati tolti dall'acqua e pesati, mediante bilancia elettronica, successivamente si è provveduto ad eseguire le prove di flessione e di compressione così come prescritto dalla norma UNI EN 196-1.

Si riportano per ogni tipo di cemento i risultati delle varie prove di resistenza eseguite. Per il CEM II/B-LL 32,5 R bianco si è ottenuto a 2 giorni un valore della resistenza a compressione¹⁶ pari a 19,05 MPa, a sette giorni si è avuto una resistenza di 26,07 MPa ed a ventotto giorni di 33,51 MPa. Si può notare che questo tipo di cemento rispetta i requisiti previsti dalla normativa, essendo i valori trovati maggiori di quelli minimi richiesti per la classe di appartenenza 32,5 R. Tali valori sono riassunti nella tabella 4.12.

| Cemento Bianco | RC a 2 giorni (MPa) | RC a 7 giorni (MPa) | RC 28 giorni (MPa) |
|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| CEM II/B-LL 32,5 R | 19,05 | 26,07 | 33,51 |

Tab. 4.12 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/B-LL 32,5 R bianco, a diverse stagionature.

Nel diagramma di figura 4.50 viene riportato l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura.

¹⁵Rispettivamente 20°C e $\geq 95\%$.

¹⁶ La resistenza a compressione è riferita al valore medio registrato sui due provini ottenuti dalla prova a flessione.

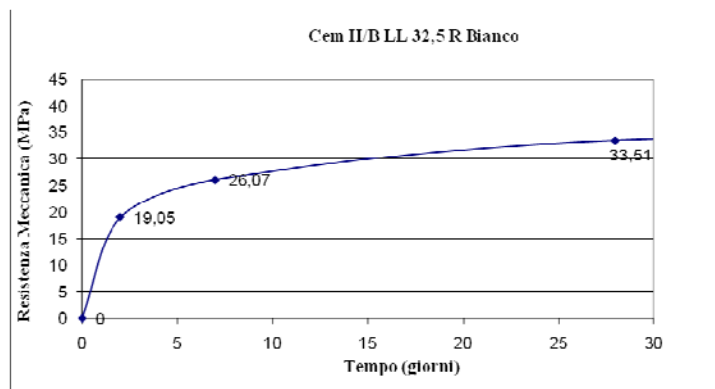


Fig. 4.50 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/B-LL 32,5 R bianco, a diverse stagionature.

Per il CEM I 52,5 R bianco il valore medio della resistenza a compressione ottenuto a 2 giorni è pari a 34,49 MPa, a sette giorni si è avuto una resistenza media di 46,62 MPa ed a ventotto giorni di 58,64 MPa. Questo tipo di cemento rispetta i requisiti previsti dalla normativa a 2 - 7 - 28 giorni. Tali valori sono riportati nella tabella 4.13.

| Cemento Bianco | RC a 2 giorni (MPa) | RC a 7 giorni (MPa) | RC 28 giorni (MPa) |
|----------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| CEM I 52,5 R | 34,49 | 46,62 | 58,64 |

Tab. 4.13 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con CEM I- 52,5 R bianco, a diverse stagionature.

In figura 4.51 è riportato l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura.

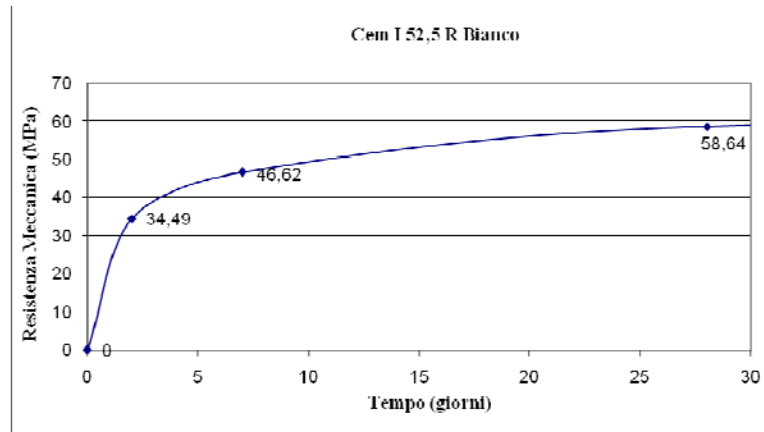


Fig. 4.51 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM I 52,5 R bianco, a diverse stagionature.

4.3.2.1.2. Analisi diffrattometrica

Riportiamo di seguito l'analisi diffrattometrica dei due tipi di cemento utilizzati:

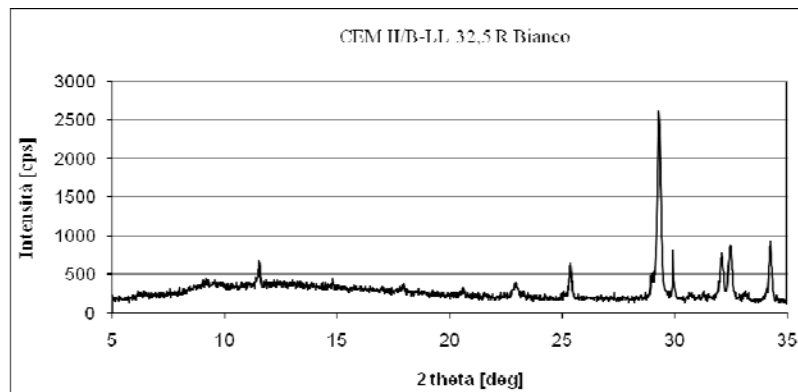


Fig. 4.52 - Diffattogramma della polvere del campione di CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

Lo spettro derivante dall'analisi diffrattometrica del CEM II/B-LL 32,5 R bianco evidenzia la presenza di silicati di calcio e calcare.

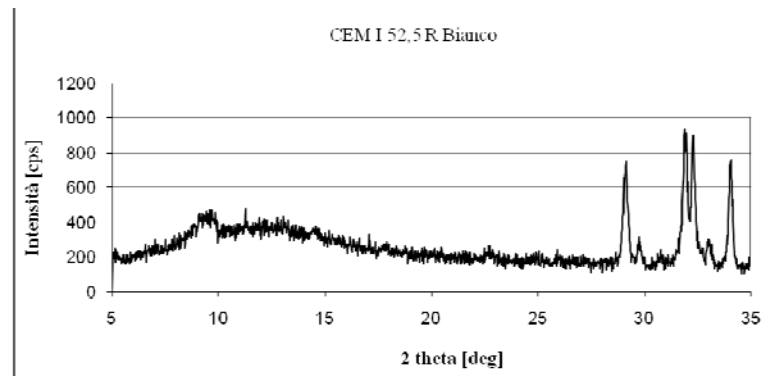


Fig. 4.53 - Diffratogramma della polvere del campione di CEM I 52,5 R bianco.

Lo spettro derivante dall'analisi diffrattometrica del CEM I 52,5 R bianco evidenzia prevalentemente la presenza di silicati di calcio.

4.3.2.2. Gli aggregati naturali

Per il confezionamento degli impasti sono stati utilizzati come aggregati, sabbia e ghiaia di facile reperibilità nel territorio calabrese. La dimensione massima dell'aggregato utilizzato, di tipo tondeggianti, è pari a 10 mm.

La sabbia rappresenta il materiale lapideo passante al setaccio con apertura 5 mm e trattenuto sul setaccio con apertura 0,075 mm.

Per la frazione granulometrica compresa tra il setaccio 10 mm e il setaccio 4 mm, è stata utilizzata ghiaia proveniente da cave alluvionali.

Gli aggregati, all'atto del prelevamento dalle rispettive cave, presentavano un assortimento granulometrico vario. Al fine di individuare le frazioni necessarie per il confezionamento degli impasti si è proceduto alla vagliatura delle due diverse tipologie di aggregati (sabbia e ghiaia). Si è proceduto al lavaggio degli aggregati per eliminare eventuali impurità e successivamente si sono costruite le curve granulometriche.

Campioni di ghiaia e sabbia trattenuti ai vari vagli sono stati prelevati e sottoposti a prove di laboratorio.

Si analizzano di seguito gli aspetti degli aggregati naturali utilizzati negli impasti di calcestruzzo autocompattante.

4.3.2.2.1. Analisi granulometrica della sabbia

Per determinare la distribuzione granulometrica della sabbia si è fatto ricorso alla separazione mediante setacciatura con stacci di varia dimensione, sovrapponendoli in colonna con apertura dei fori (o maglia) decrescente dall'alto verso il basso. Dopo aver montato la colonna su un opportuno vibratore con un dispositivo a scosse, si è versato l'assortimento granulometrico alla sommità.

L'aggregato, in seguito alle vibrazioni di stacciatura, si è distribuito sui vari stacci in frazioni tali che ciascuna è passata completamente dal setaccio superiore ma non da quello su cui si trovava, essendo i fori di quest'ultimo più piccoli del diametro delle particelle di cui era costituita la frazione.

L'operazione di vagliatura può essere eseguita anche manualmente, scuotendo successivamente ciascun setaccio della serie.

Le singole frazioni granulometriche sono state pesate ed espresse in percentuale rispetto al peso di tutto il campione analizzato, consentendo di calcolare la percentuale di passante a ogni staccio di dimensione d .

L'analisi granulometrica della sabbia è stata eseguita su una serie di campioni utilizzando stacci del diametro compresi tra 4 mm e 0,063 mm, mentre per il pietrisco sono stati utilizzati degli stacci con diametri compresi tra 16 mm e 4 mm. Delle varie serie si sono utilizzati i valori medi alle diverse frazioni.

Nella tabella 4.14 è riportata l'analisi granulometrica media dei campioni di sabbia utilizzata per la realizzare degli SCC.

| Apertura vagli (mm) | Peso trattenuto (g) | Percentuale trattenuta (%) | Percentuale cumulativa passante (%) |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 4 | 0 | 0 | 100 |
| 2,8 | 14,30 | 4,93 | 95,07 |
| 0,85 | 95,80 | 33,01 | 62,06 |
| 0,425 | 87,70 | 30,22 | 31,84 |
| 0,355 | 19,90 | 6,86 | 24,98 |
| 0,250 | 28,10 | 9,68 | 15,30 |
| 0,106 | 37,60 | 12,96 | 2,34 |
| 0,063 | 5,60 | 2,03 | 0,31 |
| Trattenuto fondo | 1,2 | 0,31 | - |

Tab. 4.14 - Analisi granulometrica campione Sabbia 1.

Nella seguente figura 4.54 è riportata la curva granulometrica della sabbia utilizzata per realizzare gli SCC.

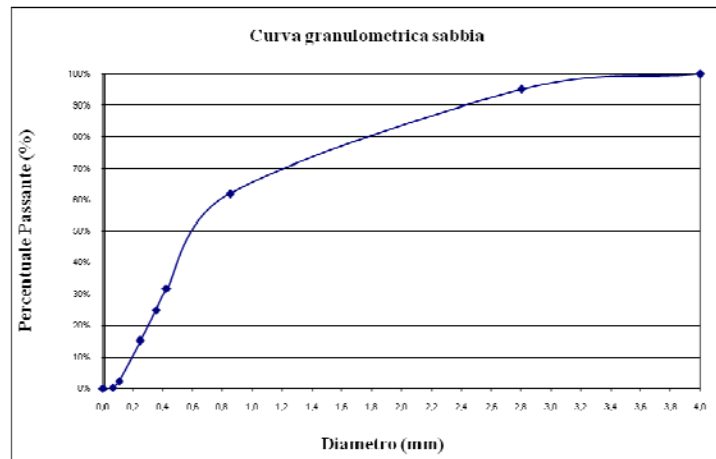


Fig. 4.54 - Curva granulometrica media della sabbia.

4.3.2.2.2. Analisi diffrattometrica

Sono riportati di seguito le analisi diffrattometriche delle varie frazioni granulometriche della sabbia, del trattenuto a 7.1 mm e del trattenuto a 10 mm.

Dal diffrattogramma ai raggi X del campione di sabbia (fig. 4.55) si evidenzia una ricca presenza di quarzo (SiO_2) e tracce di silico alluminati.

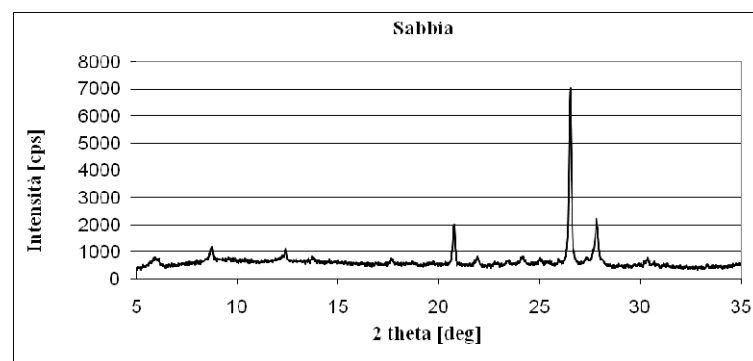


Fig. 4.55 - Diffrattogramma del campione di sabbia utilizzata negli impasti.

Nel diffrattogramma del trattenuto a 7.1 mm (fig. 4.56) si è riscontrata la presenza di dolomite " $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ", calcare (CaCO_3) e quarzo (SiO_2).

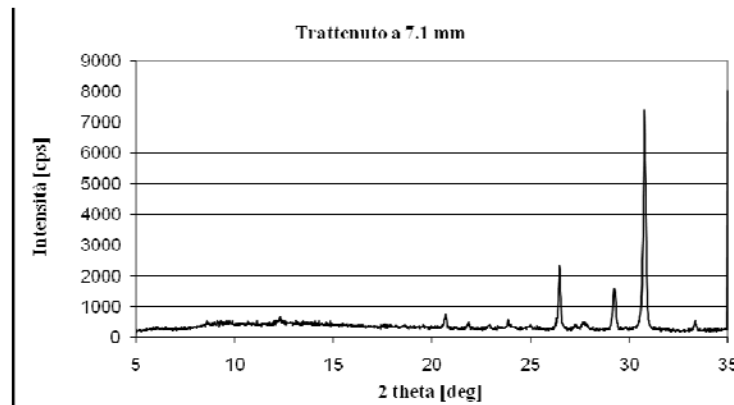


Fig. 4.56 - Diffrattogramma del campione di trattenuto a 7.1 mm utilizzato negli impasti.

Il trattenuto a 4 mm, utilizzato negli impasti di SCC, presenta la stessa composizione del trattenuto a 7.1 mm.

Infine nel diffrattogramma del trattenuto a 10 mm (fig. 4.17) si evidenzia la presenza di quarzo (SiO_2) e di silico alluminati tipo anorthite.

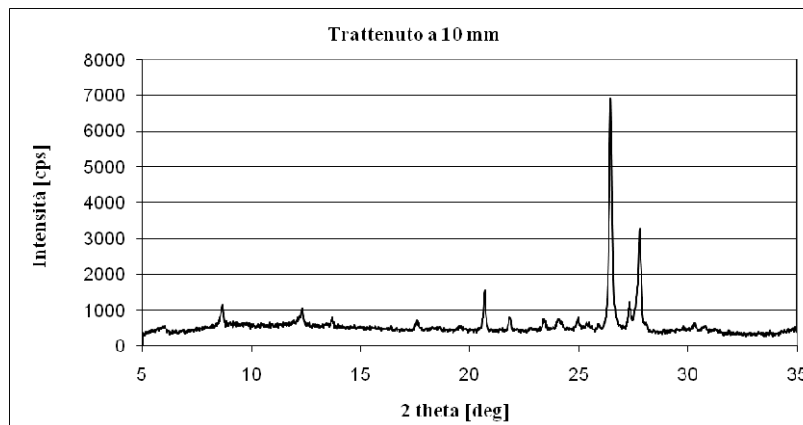


Fig. 4.57 - Diffrattogramma del campione di trattenuto a 10 mm utilizzato negli impasti.

4.3.2.3. Le zeoliti

Le zeoliti sono dei materiali appartenenti ad un gruppo di alluminosilicati idrati di metalli alcalini o alcalini-terrosi, caratterizzati dal fatto che le molecole d'acqua contenute (acqua zeolitica) sono debolmente legate e possono venire eliminate con il riscaldamento, senza che il reticolo cristallino si deformi e poi venire riassorbito. Si presentano in cristalli monometrici, rombici o monoclini con abito cubico, lamellare o fibroso, o in masse pulverulente. Sono di colore variabile, dal bianco, al rosa, al rosso, al bruno e hanno un peso specifico basso. Fondono facilmente gonfiandosi e ribollendo per la

perdita d'acqua (da cui il nome: dal greco zein, bollire e lithos, pietra), e sono facilmente attaccabile dagli acidi. Si trovano in geoidi o in spaccature di rocce eruttive metamorfiche, quali graniti e basalti, si formano direttamente da soluzioni acquose o per alterazione dei feldispadi e feldispatoidi. Sono denominati zeoliti artificiali quelle sostanze amorfe o cripto cristalline che si ottengono per fusione di miscele di silicato di alluminio con soda ed eventualmente silice, aventi proprietà simili alle zeoliti naturali.

La struttura molecolare delle zeoliti è regolare, ed è costituita da un reticolo di estensione infinita di atomi di silicio e alluminio tetracoordinati con atomi di ossigeno. Sono inoltre presenti dei pori e dei canali in cui generalmente è presente acqua, ma in cui possono essere assorbiti ioni e molecole di diversa composizione e dimensione.

L'unità di costruzione primaria è il tetraedro del tipo TO_4 , in cui T è l'atomo di silicio o alluminio, SiO_4 e AlO_4^- , legati tra loro da atomi di ossigeno, in modo tale che il rapporto O/T è sempre pari a 2. Le zeoliti, in base alla loro struttura caratteristica, presentano proprietà peculiari. Le principali sono :

- struttura cristallina ben definita con un'alta area superficiale interna (maggiore $400 \text{ m}^2/\text{g}$);
- microporosità, che offre una superficie maggiore rispetto ai catalizzatori convenzionali, in cui solo la parte esterna è accessibile ai reagenti;
- buona stabilità termica anche oltre i $500 \text{ }^\circ\text{C}$;
- alta concentrazione di siti acidi.

Tali proprietà fanno sì che le zeoliti siano usate in molte applicazioni industriali, come ad esempio nel campo della detergenza, in cui vengono usate come scambiatori di ioni per l'addolcimento dell'acqua all'inizio del ciclo di lavaggio. Molti di questi scambi avvengono rapidamente, dai 5 ai 30 minuti, a temperature moderate, da 20 a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. L'applicazione più importante delle zeoliti è come catalizzatore. Le zeoliti combinano alta acidità, selettività di forma, alta area superficiale e alta stabilità termica per cui la catalisi zeolitica trova largo impiego nell'industria petrolchimica per i processi di cracking ed idrocracking, l'alchilazione e l'isomerizzazione. Le zeoliti, per la loro elevata capacità di adsorbire e deadsorbire l'acqua, vengono anche usate come deumidificanti. Negli anni Settanta è iniziata la produzione delle zeoliti sintetiche dotate cioè di proprietà specifiche, individuate appositamente per la particolare applicazione per la quale devono essere utilizzate. Nella struttura delle zeoliti sono presenti pori di

dimensioni ben definite, e ciò si rivela utile poiché permette di operare con una certa selettività scegliendo di volta in volta la zeolite sintetica che presenta i pori delle dimensioni più adatte all'adsorbimento di un determinato composto chimico.

Le zeoliti sintetiche sono resistenti alla maggior parte degli acidi, chimicamente inerti ed ignifughe. La zeolite LTA è un silico-alluminato sintetico cristallizzato nel sistema cubico; la sua struttura, a seconda della natura del controione metallico che bilancia la carica negativa dell'alluminio, si classifica in: zeolite 3A, zeolite 4A, zeolite 5A.

La zeolite A viene così denominata nella forma scambiata con il calcio. Essa viene indicata come 5A perchè può adsorbire molecole aventi diametro critico minore di 5Å come il metanolo, l'etano, il propano.

Il contenuto di acqua presente nel reticolo zeolitico della 5A è pari a 30 moli contro i 27 della zeolite sodica ed i 22 della zeolite contenente titanio. Ciò in accordo col fatto che il contenuto di acqua diminuisce all'aumentare del raggio ionico del catione presente.

Inoltre, essendo il calcio bivalente, la quantità di cationi presenti è pari alla metà rispetto ai cationi monovalenti.

La zeolite 5A viene generalmente utilizzata nei processi di separazione delle n-paraffine dalle ramificate e dagli idrocarburi ciclici, attraverso processi di adsorbimento selettivo.

4.3.2.3.1. Caratterizzazione della zeolite 5A industriale

La zeolite aggiunta negli impasti degli SCC è la 5A di tipo industriale fornita dalla SASOL.

L'analisi ai raggi X (fig. 4.58) conferma la cristallinità della zeolite 5A di provenienza industriale; la microscopia a scansione conferma la morfologia cubica della zeolite 5A (fig. 4.59).

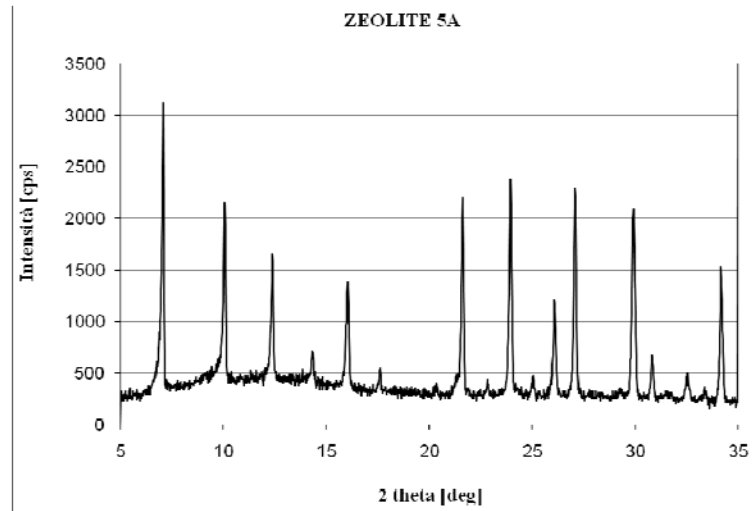


Fig. 4.58 - Diffratogramma della polvere dei cristalli di zeolite 5A.

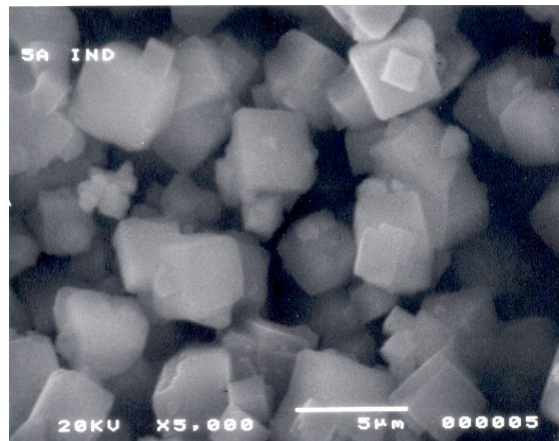


Fig. 4.59 - Micrografia dei cristalli di zeolite 5A.

L'acqua contenuta nella zeolite 5A industriale valutata tramite analisi termica (fig. 4.60) è sempre pari al 20% in peso della zeolite.

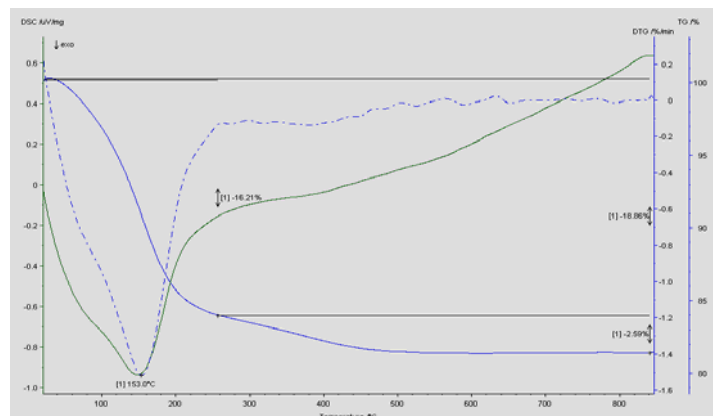


Fig. 4.60 - Analisi termica della zeolite 5A.

Dalla microanalisi a dispersione di energia si ricava che la quantità di sodio scambiata con il calcio è pari a circa il 35%. La zeolite 5A industriale mantiene delle proprietà sodiche (fig. 4.61).

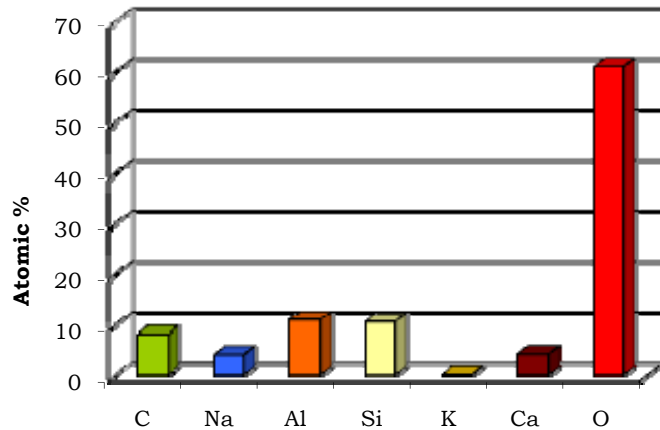


Fig. 4.61 - Microanalisi della zeolite 5A.

4.3.2.4. Il filler calcareo

Il filler calcareo è un'aggiunta, che può essere utilizzata per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti (SCC). Di seguito vengono riportate le varie analisi condotte sul filler.

4.3.2.4.1. Caratterizzazione del filler calcareo

L'analisi diffrattometrica ai raggi X (fig. 4.62) conferma la non purezza del filler vista la presenza, oltre che del calcare, anche di una minima parte di silico-alluminati.

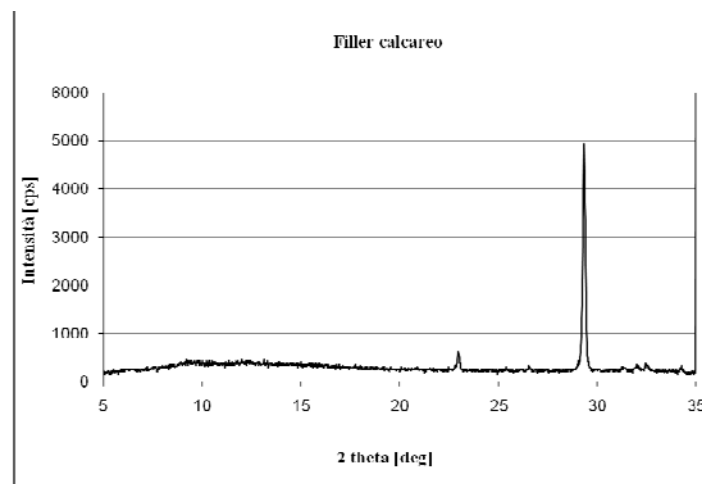


Fig. 4.62 - Diffrattogramma del campione di filler calcareo.

L'analisi termica rivela che soltanto il 60 % del filler utilizzato è costituito da calcare (fig. 4.63).

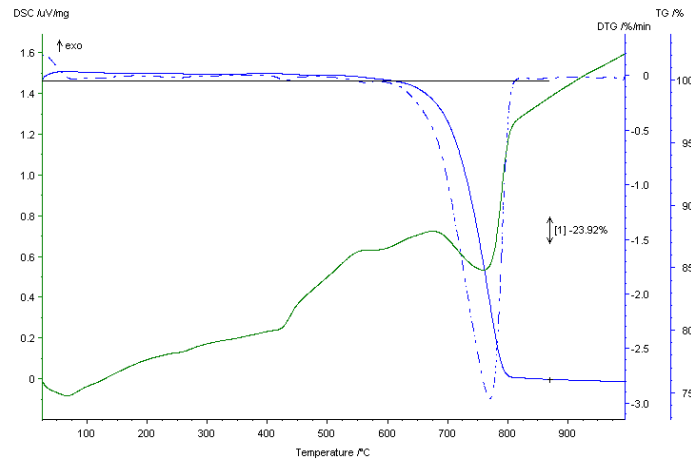


Fig. 4.63 - Analisi termica del campione di filler calcareo.

Dall'analisi chimica (fig. 4.64) condotta sul filler calcareo si rileva la presenza di calcare e silico-alluminati.

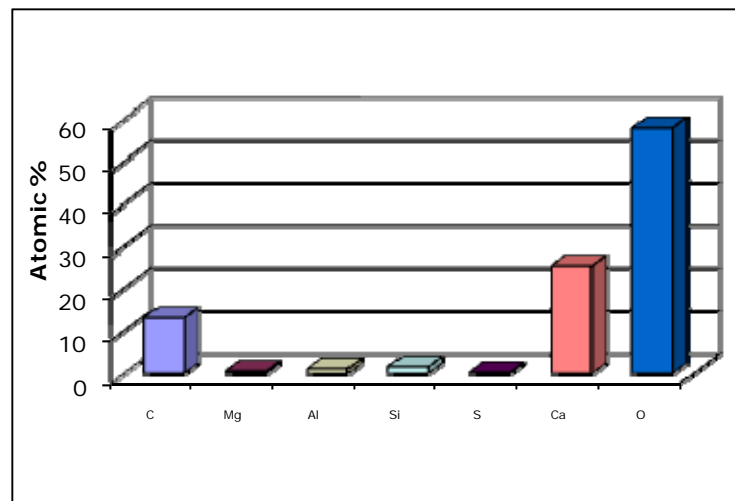


Fig. 4.64 - Analisi chimica del Filler calcareo.

Si riporta di seguito la microscopia a scansione del filler calcareo (fig. 4.65)

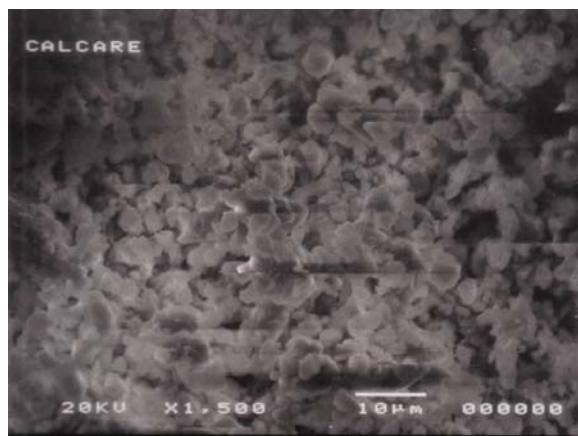


Fig. 4.65 - Micrografia del filler calcareo.

4.3.2.5. Silica fume

Negli impasti di alcune miscele di calcestruzzo autocompattante (SCC) è stata utilizzata silice fume prodotta dalla Mapei (Mapeplast SF).

Essa è un componente in polvere ad attività pozzolanica a base di microsilica per malte e calcestruzzi di alta qualità. Determina il miglioramento di tutte le proprietà del calcestruzzo ed in particolare conferisce maggiore coesione all'impasto fresco, alte resistenze meccaniche, maggiore impermeabilità e durabilità nei confronti degli agenti aggressivi liquidi e gassosi.

Inoltre facilita il pompaggio di calcestruzzi magri, a consistenza fluida e con basso dosaggio di cemento. Per la preparazione degli impasti viene aggiunta unitamente agli altri ingredienti: cemento, aggregati, acqua e superfluidificante.

Il tutto viene mescolato per qualche minuto fino ad ottenere un impasto omogeneo.

4.3.2.5.1. Caratteristiche tecniche

Mapeplast SF è un additivo in polvere di colore grigio scuro costituito da silice amorfa sotto forma di granuli sferici sub-micronici.

La ridottissima dimensione granulometrica (in gran parte al di sotto di 0,1 mm) consente ai granuli sferici di Mapeplast SF di sistemarsi nei vuoti interstiziali tra i granuli di cemento di maggiore dimensione (0,1-100 mm).

La matrice cementizia risulta in questo modo più densa e compatta.

4.3.2.5.2. Modalità di impiego

Mapeplast SF viene introdotto in betoniera unitamente agli altri ingredienti del calcestruzzo (cemento, aggregati ed acqua) in misura variabile da 20 a 60 kg/m³ a seconda del tipo di materiale da produrre. Per il conseguimento della massima prestazione del prodotto è necessario abbinare al Mapeplast SF un additivo superfluidificante o fluidificante, in quanto, a causa della ridotta dimensione dei granuli, la richiesta di acqua è maggiore.

È altresì importante disaggregare al massimo i granuli del Mapeplast SF; a questo scopo si raccomanda di mescolare l'impasto per almeno 5 minuti.

4.3.2.5.3. Analisi diffrattometrica

Dall'analisi diffrattometrica ai raggi X (fig. 4.66) si è riscontrata la struttura amorfa della silica fume Mapeplast SF.

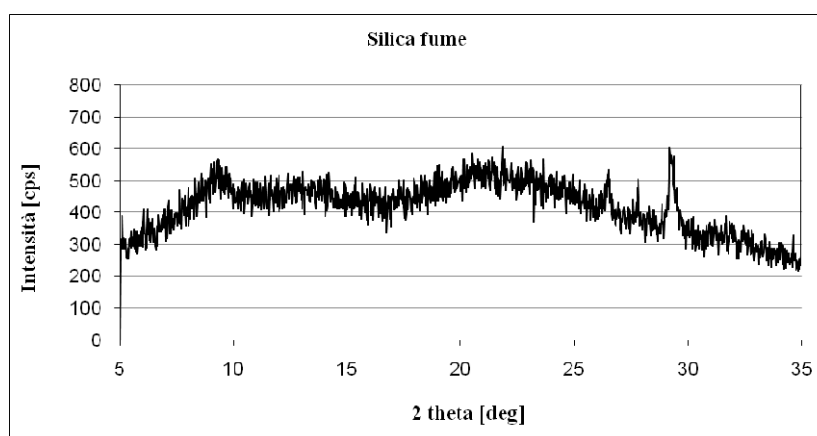


Fig. 4.66 - Diffratogramma della silica fume Mapeplast SF.

4.3.2.6. Gli additivi

Per la realizzazione degli impasti si sono utilizzati due diversi additivi, di cui uno fluidificante e l'altro viscosizzante:

- CHRYSO Fluid Premia 150 a base polycarbossilati modificati.
- Viscofluid SCC/10 (MAPEI) a base di biopolimeri.

CHRYSO Fluid Premia 150 è un superfluidificante di nuova generazione, a base di polycarbossilati modificati. Esso è destinato alla prefabbricazione. Utilizzato nei calcestruzzi contenenti quantità importanti di elementi fini, permette di ottenere

una eccezionale fluidità che facilita la messa in opera del calcestruzzo senza vibrazione (calcestruzzo autocompattante). Consente di ottenere resistenze elevate alle brevi stagionature ed a 28 giorni. Viene utilizzato con una formulazione adattata, migliora l'aspetto dei calcestruzzi induriti (faccia a vista). Inoltre esso è compatibile con la maggioranza delle tipologie di cementi. La sua particolare formulazione diminuisce, infatti, i forti rischi di incompatibilità che caratterizzano gli additivi di nuova generazione. Inoltre è conforme alla norma UNI EN 934-2, alla norma francese NF EN 934-2 ed è certificato NF.

Le sue caratteristiche sono:

- Aspetto: liquido bianco lattiginoso.
- Densità a 20° C: 1,060 g/ml \pm 0,02.
- pH a 20° C: 5 \pm 1.
- Tenore di ioni Na^+ : < 0,1%.
- Na_2O equivalente: < 1,0%.

I campi d'impiego sono:

- Tutti i tipi di cemento (secondo la norma UNI EN 197).
- Tutti i calcestruzzi che richiedano resistenze elevate a breve e lungo termine.
- Calcestruzzi precompressi.
- Calcestruzzi autocompattanti.
- Calcestruzzo di elevate prestazioni.
- Calcestruzzo ad elevata finitura faccia a vista.

Per quanto riguarda il dosaggio si consigliano 0,25÷1,9 litri per 100 kg di cemento. Il Dosaggio standard è di 0,8% sul peso del cemento.

La sua massima efficacia è determinata dopo prove in loco, tenendo conto delle caratteristiche reologiche e delle resistenze meccaniche richieste al calcestruzzo.

Per ciò che concerne i modi d'impiego, *CHRYSO Fluid Premia 150* è preferibilmente utilizzato nell'acqua di impasto. È tuttavia possibile aggiungerlo in additivazione differita. In tutti i casi, ci si deve assicurare che la miscelazione sia sufficiente ad ottenere un calcestruzzo omogeneo.

Vengono riportati i risultati delle prove di resistenza (grafico A, fig. 4.67) e di consistenza (grafico B, fig. 4.67), ottenuti in base alle modalità definite dalle norme ISO 4012.

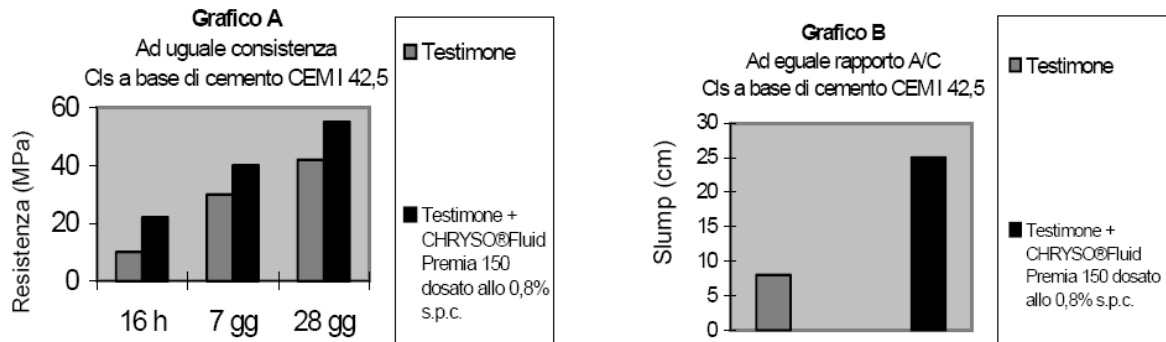


Fig. 4.67 - Grafico A: prove di resistenza; Grafico B: prove di consistenza.

4.3.2.6.1. Viscofluid SCC/10

Viscofluid SCC/10 è un nuovo additivo capace di incrementare la viscosità degli impasti migliorandone notevolmente la stabilità, l'omogeneità e la resistenza ai fenomeni di segregazione e di bleeding. Risulta un ingrediente di fondamentale importanza per la produzione dei calcestruzzi autocompattanti (*Self Compacting Concrete: SCC*) ad elevata stabilità ed assenza di segregazione e bleeding.

Esso consente di lasciare sostanzialmente immutata l'elevata deformabilità conseguita, garantendo nel contempo un incremento della coesione e della omogeneità del calcestruzzo che, conseguentemente, presenta una segregazione praticamente nulla. L'incremento della coesione degli impasti, grazie all'impiego di *Viscofluid SCC/10*, è determinato nello stato di quiete da una sorta di reticolo tridimensionale generato dalla interconnessione delle catene del biopolimero ad alto peso molecolare (fig. 4.68).

L'intreccio delle catene del polimero dell'additivo, quindi, è responsabile dell'elevata omogeneità e dell'assenza di segregazione dei calcestruzzi autocompattanti nello stato di quiete.

All'elevata stabilità in quiete del calcestruzzo additivato corrisponde un'altrettanta elevata deformabilità degli impasti in movimento determinata dall'allineamento delle catene del biopolimero nella direzione del flusso del calcestruzzo (fig. 4.68).

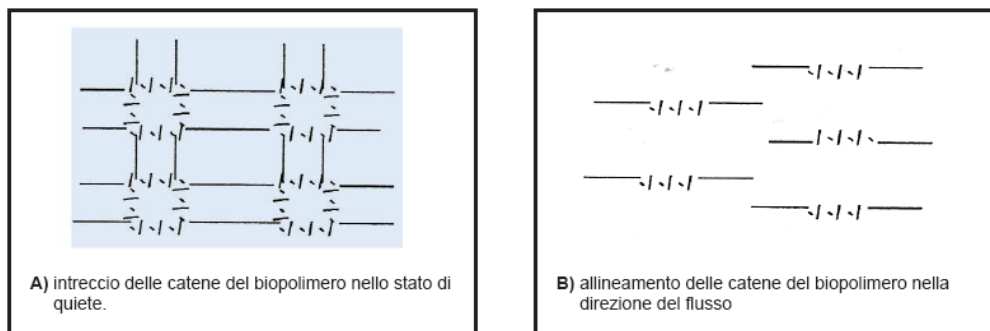


Fig. 4.68 - Schematizzazione delle catene del Viscofluid SCC/10 nel calcestruzzo in quiete e in movimento.

Questa proprietà dei calcestruzzi autocompattanti prodotti con Viscofluid SCC/10 si rivela fondamentale quando il conglomerato deve fluire in corrispondenza dei restringimenti del cassero dovuti a variazioni di sezione dell'elemento strutturale ed attraverso le armature, nelle sezioni congestionate, senza manifestare segregazione dei suoi componenti. Grazie alla particolare sintesi

L'additivo consente - unitamente all'impiego degli additivi fluidificanti, ad un accurato proporzionamento del volume di fini e ad una limitazione nel volume di aggregato grosso - di ottenere impasti caratterizzati da una viscosità sufficiente ad impedire la segregazione del calcestruzzo quando il conglomerato fluisce anche in sezioni contraddistinte da una densità elevata dei ferri d'armatura.

In sostanza, Viscofluid SCC/10 elimina "l'effetto bloccaggio" del conglomerato in prossimità delle barre grazie alla capacità di aumentare la viscosità plastica senza pregiudicare le proprietà di flusso dell'impasto.

Esso è in grado di garantire in ogni istante, durante la messa in opera, un completo "avvolgimento" degli aggregati grossi con uno spessore sufficiente di malta (la cosiddetta "excess mortar"), capace di ridurre notevolmente il numero di collisioni dei granuli di dimensioni maggiori e di conseguenza eliminare l'effetto bloccaggio in getti contraddistinti da geometrie complicate e da ridotti interferri.

In definitiva, l'additivo utilizzato permette:

- di aumentare la coesione e la omogeneità dei calcestruzzi autocompattanti eliminandone di fatto la segregazione ed il bleeding, lasciando sostanzialmente invariata la deformabilità degli impasti allo stato fresco;
- di rendere le proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti meno sensibili alle variazioni immancabili delle caratteristiche chimico-fisiche delle materie

prime (ad esempio, alle variazioni di granulometria degli aggregati) o ad eventuali piccoli errori nel proporzionamento del calcestruzzo.

Per conseguire le caratteristiche di elevata coesione ed assenza di segregazione richieste per i calcestruzzi autocompattanti è possibile modulare l'aggiunta di Viscofluid SCC/10 variandone il dosaggio in volume entro l'intervallo 1 - 2% rispetto al peso delle parti fini utilizzate per il confezionamento dell'impasto (le parti fini rappresentate dalla somma del cemento, della cenere volante e/o del filler calcareo e delle frazioni fini di aggregati passanti allo staccio con apertura 0.125 mm).

4.3.2.7. L'acqua d'impasto

Per la produzione degli impasti si è utilizzata acqua potabile priva di sostanze ritenute dannose per il calcestruzzo. Avendo imposto un rapporto a/c pari a 0,50, l'acqua riferita al solo cemento, per metro cubo d'impasto è stata di 215 litri. Il confezionamento di ogni impasto di calcestruzzo è risultato di 24,00 litri, con un dosaggio di cemento pari a 10.32 kg, pertanto l'acqua strettamente necessaria è risultata di 5.16 litri. Inoltre, è stato calcolato ed aggiunto il quantitativo di acqua pari a 0,100 litri necessaria per portare gli aggregati nella condizione di satura a superficie asciutta.

4.3.3. Materiali per calcestruzzi con aggregati da riciclo

4.3.3.1. I cementi.

Per il confezionamento degli impasti di calcestruzzo sono stati utilizzati i seguenti tipi di cemento (UNI EN 197-1):

- CEM II/A-LL 32,5 R
- CEM II/A-L 42,5 R

Il primo è un cemento Portland di miscela com'è indicato dal numero II, in cui il clinker, che rappresenta il costituente principale del cemento, è presente per valori compresi tra l'80 e il 94%. La lettera LL indica che il tenore di carbonio organico totale (TOC), determinato in conformità al pr EN 13639: 1999, non deve essere maggiore dello 0,20% in massa, mentre la lettera A indica che la parte minerale può variare tra il 6-20%. Il valore 32,5 indica la classe di resistenza, mentre la lettera R il fatto che si tratta di un cemento a rapido indurimento.

Il CEM II/A-L 42,5 R è un cemento di miscela come indicato dal numero II, in cui il clinker è presente tra l'80-94%. La lettera L indica che il tenore di carbonio organico totale (TOC) non deve essere maggiore dello 0,50% in massa, mentre la lettera A indica che la loppa varia tra 6-20%. Anch'esso è un cemento a rapido indurimento con classe di resistenza 42,5 R.

La classe di resistenza indica la resistenza meccanica a compressione dei provini di malta standard realizzati con il cemento in oggetto, espressa in N/mm² (fig. 4.69), ottenuta a 28 giorni di stagionatura dei provini in condizione normale.

4.3.3.1.1. Caratterizzazione meccanica

Per ogni tipo di cemento sono stati confezionati tre provini prismatici di malta (40mm × 40mm × 160mm) utilizzando sabbia normalizzata CEN EN 196-1, premiscelata in sacchetti di plastica, acqua distillata (a/c= 0,50) e cemento nelle quantità di:

- Cemento: 450 g;
- Acqua: 225 g;
- Sabbia: 1350 g.

I provini di malta, dopo la sformatura, avvenuta nell'intervallo 20-24h dopo la confezione, sono stati immersi in acqua a stagionare in condizioni di temperatura e di umidità controllate¹⁷. Alla scadenza di ogni stagionatura i provini sono stati tolti dall'acqua e pesati, mediante bilancia elettronica, successivamente si è provveduto ad eseguire le prove di flessione e di compressione.

Si riportano per ogni tipo di cemento i risultati delle varie prove di resistenza eseguite.

Per il CEM II/A-LL 32,5R si è ottenuto a 2 giorni un valore della resistenza a compressione¹⁸ pari a 20,8 MPa, a sette giorni si è avuto una resistenza di 26,5 MPa ed a ventotto giorni di 32,8 MPa. Si può notare che questo tipo di cemento rispetta i requisiti previsti dalla normativa, essendo i valori trovati maggiori di quelli minimi richiesti per la classe di appartenenza 32,5 R.

In figura 4.69 viene riportato l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura, mentre nella tabella 4.15 sono espressi i valori in funzione dei giorni.

¹⁷Rispettivamente 20°C e ≥ 95%.

¹⁸ La resistenza a compressione è riferita al valore medio registrato sui due provini ottenuti dalla prova a flessione.

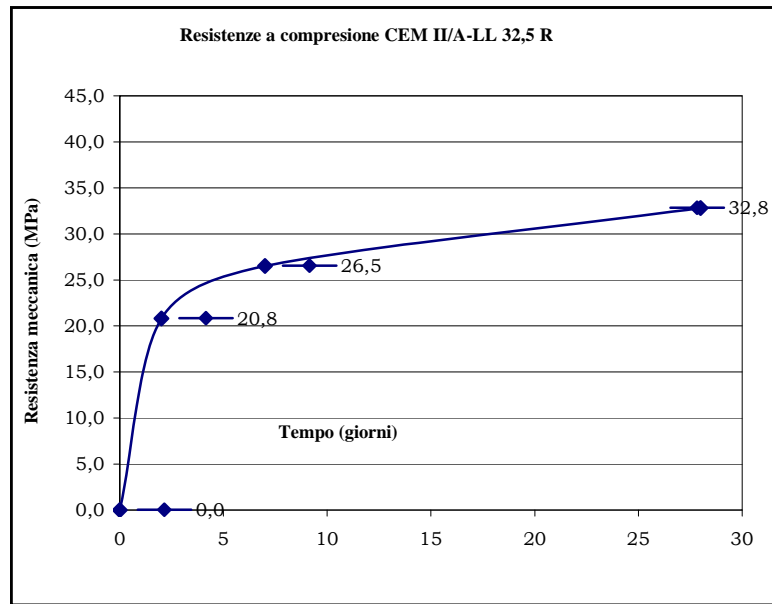


Fig. 4.69 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/A-LL 32,5R, a diverse stagionature.

| | R _C a 2 giorni (MPa) | R _C a 7 giorni (MPa) | R _C 28 giorni (MPa) |
|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| CEM II/A-LL 32,5 R | 20,8 | 26,5 | 32,8 |

Tab. 4.15 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/A-LL 32,5R, a diverse stagionature.

Per il CEM II/A-L 42,5 R il valore medio della resistenza a compressione ottenuto a 2 giorni è pari a 20,4 MPa, a sette giorni si è avuto una resistenza media di 30,2 MPa ed a ventotto giorni di 38,7 MPa. Questo tipo di cemento rispetta i requisiti previsti dalla normativa a 2 e 7 giorni, solo il valore a 28 giorni è leggermente inferiore a quello minimo richiesto per l'accettazione alla classe di appartenenza 42,5 R.

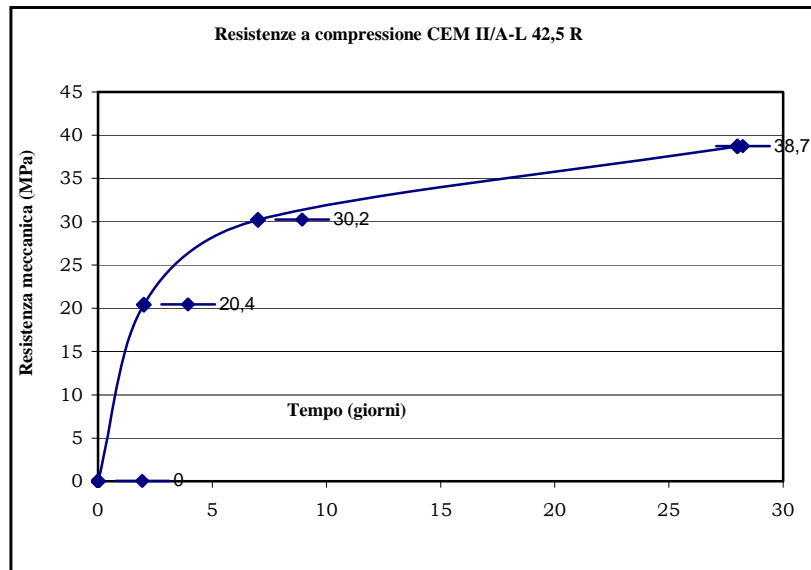


Fig. 4.70 - Resistenze a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/A-L 42,5 R, a diverse stagionature.

In figura 4.70 è riportato l'andamento della resistenza a compressione in relazione al tempo di stagionatura, così come nella tabella successiva (tab. 4.16) sono riportati i valori alle varie stagionature.

| | R _C a 2 giorni (MPa) | R _C a 7 giorni (MPa) | R _C 28 giorni (MPa) |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| CEM II/A-L 42,5 R | 20,4 | 30,2 | 38,7 |

Tab. 4.16 - Resistenze medie a compressione dei provini di malta realizzati con CEM II/A-L 42,5 R, a diverse stagionature

4.3.3.1.2. Analisi diffrattometrica.

Riportiamo di seguito l'analisi diffrattometrica dei due tipi di cemento utilizzati:

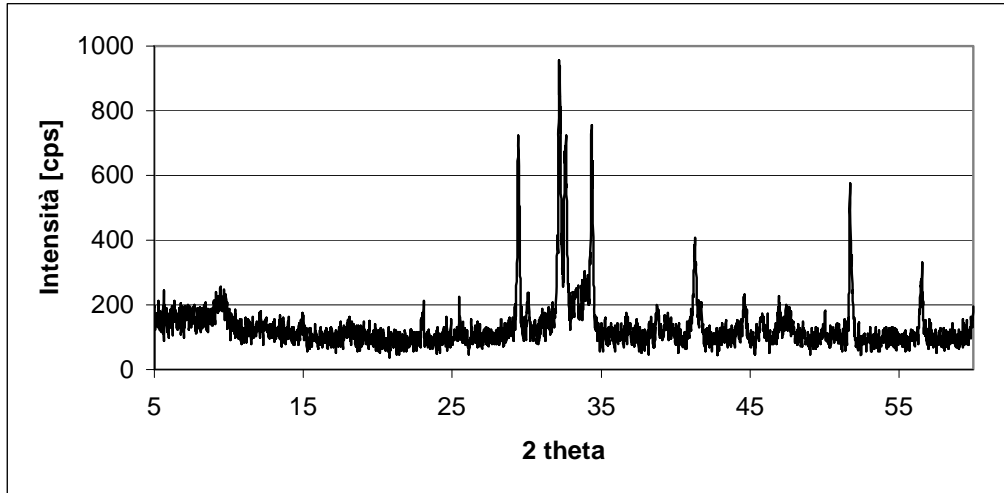


Fig. 4.71 - Diffattogramma della polvere del campione di CEM II/A-LL 32,5 R.

Lo spettro derivante dall'analisi diffrattometrica del CEM II/A-LL 32,5R evidenzia la presenza di silicati di calcio, calcare e piccole quantità di gesso.

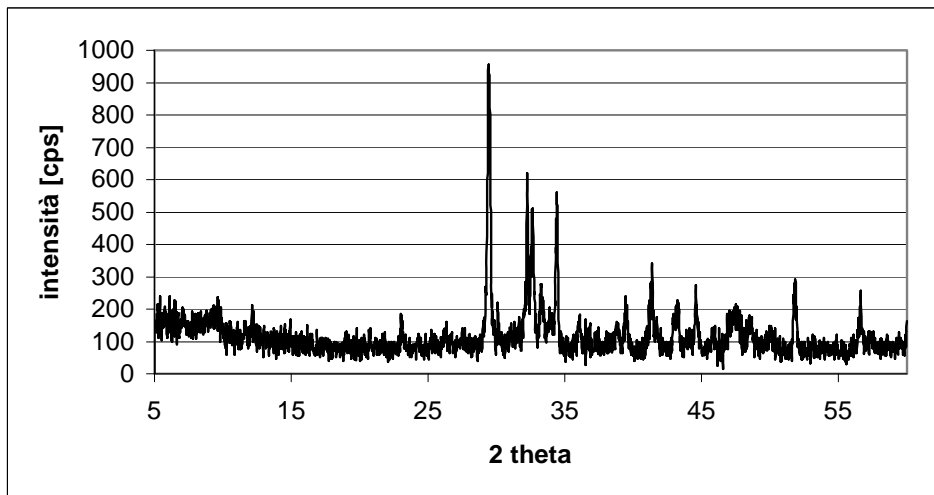


Fig. 4.72 - Diffattogramma della polvere del campione di CEM II/A-L 42,5 R.

Lo spettro derivante dall'analisi diffrattometrica del CEM II/A-L 42,5 R evidenzia la presenza di silicati bicalcici e tricalcici e di gesso.

4.3.3.2. Gli aggregati riciclati.

4.3.3.2.1. Reperimento e analisi di caratterizzazione.

Gli aggregati utilizzati nella fase di sperimentazione sono stati forniti dalla ditta Sposato P&P che possiede un impianto di frantumazione nella zona di Villapiana (CS), gli inerti sono stati trattati in un impianto mobile e provengono da calcestruzzi e macerie miste di demolizione.

La caratterizzazione degli aggregati è stata svolta attraverso diverse operazioni:

- Analisi granulometrica;
- Determinazione della quantità d'acqua necessaria per rendere gli aggregati saturi a superficie asciutta;
- Analisi diffrattometrica ai raggi X;
- Microanalisi a dispersione di energia;
- Prova al solfato di magnesio.

4.3.3.2.2. Analisi granulometrica.

La prima analisi effettuata è stata un'analisi visiva, a primo impatto il materiale si presentava con una grossa quantità di fino e molto eterogeneo, questa rappresenta la principale caratteristica degli aggregati da C&D, e a causa di questa caratteristica il materiale è più poroso ed ha un maggiore assorbimento di acqua.

Dal materiale di riciclo pervenuto in laboratorio si sono effettuate diverse campionature omogenee dell'ordine delle decine di chilogrammi.

Con tali campionature sono state effettuate le analisi granulometriche.



Fig. 4.73 - Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica consiste nel suddividere il materiale in frazioni, ciascuna delle quali è formata da particelle comprese tra limiti precisi, corrispondenti alle aperture di appositi setacci o crivelli. I vagli con fori più grandi sono realizzati in lamiera forata, con buchi rotondi o quadrati, i vagli con fori più piccoli, sono di tela metallica confezionata con fili di sezione standardizzata.

Sono montati su telai cilindrici realizzati in modo da poter essere sovrapposti in colonna, con apertura dei fori decrescente dall'alto verso il basso. Dopo aver montato la colonna su un opportuno vibratore con un dispositivo a scosse si versa l'inerte in sommità. Questo materiale, in seguito alle vibrazioni di staccatura, si distribuisce sui vari setacci in funzione del diametro dei grani. L'operazione di vagliatura può essere eseguita anche manualmente, scuotendo successivamente ciascun setaccio della serie.

I risultati dell'analisi granulometrica effettuati su due campionature sono riportate nelle tabelle 4.17 e 4.18.

I dati sono, inoltre, diagrammati nelle figure 4.74 e 4.75, dove sulle ordinate sono rappresentate le percentuali dei passanti cumulativi ed in ascisse sono riportate le aperture dei setacci, si ottiene, così, la *curva granulometrica* degli aggregati.

| Diametro (mm) | Trattenuto (gr) | Trattenuto (%) | Trattenuto Progressivo (%) | Passante (%) |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 25 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 19 | 457 | 4,48 | 4,48 | 95,52 |
| 16 | 250,50 | 2,46 | 6,93 | 93,06 |
| 12,5 | 685,50 | 6,72 | 13,65 | 86,34 |
| 10 | 743 | 7,28 | 20,94 | 79,05 |
| 7,1 | 1013 | 9,93 | 30,87 | 69,12 |
| 4 | 1423,5 | 13,96 | 44,82 | 55,17 |
| 2,8 | 686,5 | 6,73 | 51,55 | 48,44 |
| 1,4 | 1526 | 14,96 | 66,520 | 33,48 |
| 0,85 | 1072 | 10,51 | 77,029 | 22,97 |
| 0,425 | 990 | 9,71 | 86,73 | 13,26 |
| 0,250 | 730 | 7,16 | 93,89 | 6,11 |
| 0,106 | 489 | 4,79 | 98,68 | 1,31 |
| Fondo | 134 | 1,31 | 100,00 | 0,00 |
| Totale | 10200 | - | - | - |

Tab. 4.17 - Analisi granulometrica campione n°1.

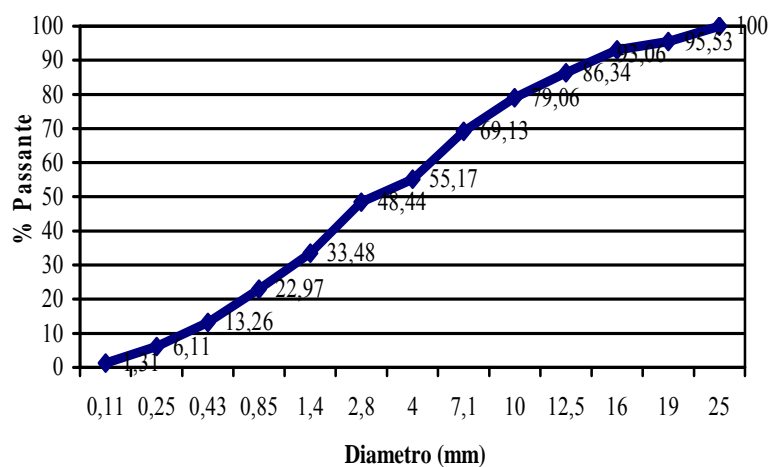


Fig. 4.74 - Curva granulometrica campione n°1.

| Diametro (mm) | Trattenuto (gr) | Trattenuto (%) | Trattenuto progressivo (%) | Passante (%) |
|---------------|-----------------|----------------|----------------------------|--------------|
| 25 | 131 | 1,12 | 1,12 | 100,00 |
| 19 | 310 | 2,65 | 3,77 | 96,23 |
| 16 | 706 | 6,03 | 9,80 | 90,20 |
| 12,5 | 605 | 5,17 | 14,97 | 85,03 |
| 10 | 868 | 7,42 | 22,39 | 77,61 |
| 7,1 | 1062 | 9,08 | 31,47 | 68,53 |
| 4 | 1476 | 12,62 | 44,09 | 55,91 |
| 2,8 | 707 | 6,04 | 50,13 | 49,87 |
| 1,4 | 1773 | 15,15 | 65,28 | 34,72 |
| 0,85 | 1269 | 10,85 | 76,13 | 23,87 |
| 0,425 | 1063 | 9,09 | 85,21 | 14,79 |
| 0,250 | 929 | 7,94 | 93,15 | 6,85 |
| 0,106 | 596 | 5,09 | 98,25 | 1,75 |
| Fondo | 202 | 1,73 | 100,00 | 0,00 |
| Totale | 11700 | | | |

Tab. 4.18 - Analisi granulometrica campione n°2.

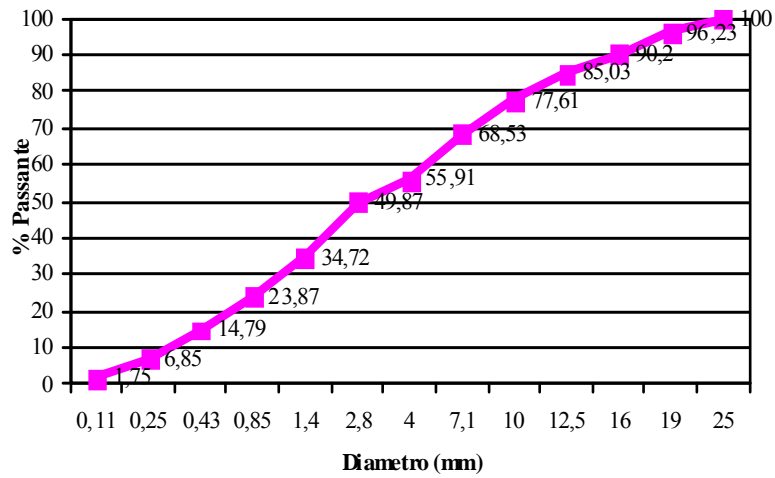


Fig. 4.75 - Curva granulometrica campione n°2.

In figura 4.76 è riportata la curva granulometrica globale ottenuta conducendo l'analisi granulometrica su varie campionature.

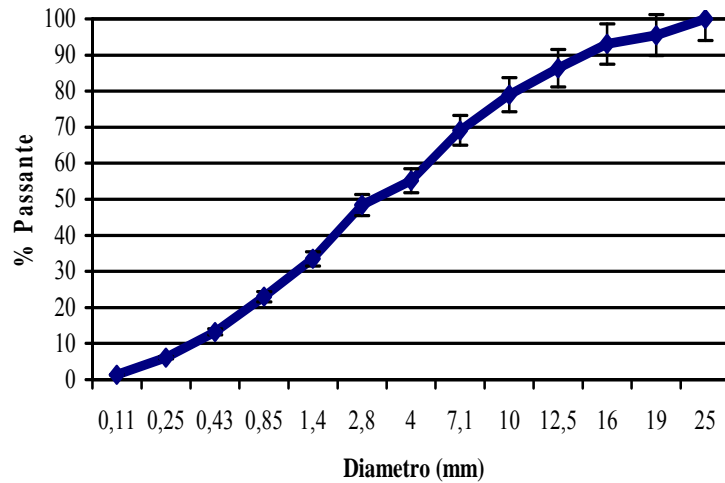


Fig. 4.76 - Curva granulometrica dell'aggregato riciclato.

4.3.3.2.3. Condizione di s.s.a. (saturazione a superficie asciutta).

Per materiale saturo a superficie asciutta s'intende un materiale in cui la superficie dei granuli è asciutta ma l'imbibizione dei pori è completa.

Con la ghiaia ed il pietrisco la valutazione dello stato s.s.a. è visuale: il materiale lapideo, liberato dall' eventuale presenza di polveri e di incrostazioni friabili, è portato ad umidità totale zero mediante essiccazione in stufa a 105°C e quindi è pesato ed immerso in acqua per 24 ore alla temperatura ambiente. Allo scadere del tempo di prova è rimosso, tamponato con un panno assorbente fin quando a giudizio dell'operatore la superficie visibile è ritenuta asciutta e di nuovo pesato. Poiché gli elementi grossi essiccano prima di quelli piccoli, è opportuno operare su frazioni granulometriche ristrette.

Per la sabbia la condizione s.s.a. è individuata mediante una prova di slump. Il materiale, saturato come nel caso precedente, viene disposto in strato sottile su di un piano e lasciato asciugare rimuovendolo periodicamente. Dopo un certo tempo si riempie uno stampo tronco-conico, di dimensioni standard, compattando secondo modalità prefissate, si poggia il provino sulla base e si toglie cautamente lo stampo; se vi è umidità libera il cono di sabbia mantiene la forma, cioè resiste al proprio peso, altrimenti crolla (slump); nel primo caso la prova si ripete dopo un ulteriore periodo d'essiccamento. Nel nostro caso il materiale, essendo di riciclo presenta una grossa quantità di polvere fine che non essendo naturale ma derivata da cemento impedisce di valutare la condizione di materiale s.s.a. per la granulometria più sottile.

Nell'impossibilità di trovare un metodo alternativo che ci consentisse di determinare la quantità d'acqua necessaria a rendere il materiale saturo a superficie asciutta si è deciso di fissare a priori un rapporto a/c pari a 0,45 e di migliorare la lavorabilità del cemento utilizzando additivi superfluidificanti.

4.3.3.2.4. Analisi diffrattometrica.

L'analisi diffrattometrica ai raggi X è stata effettuata su tutte le granulometrie degli aggregati riciclati da costruzione e demolizione separate in laboratorio per le miscele di calcestruzzo.

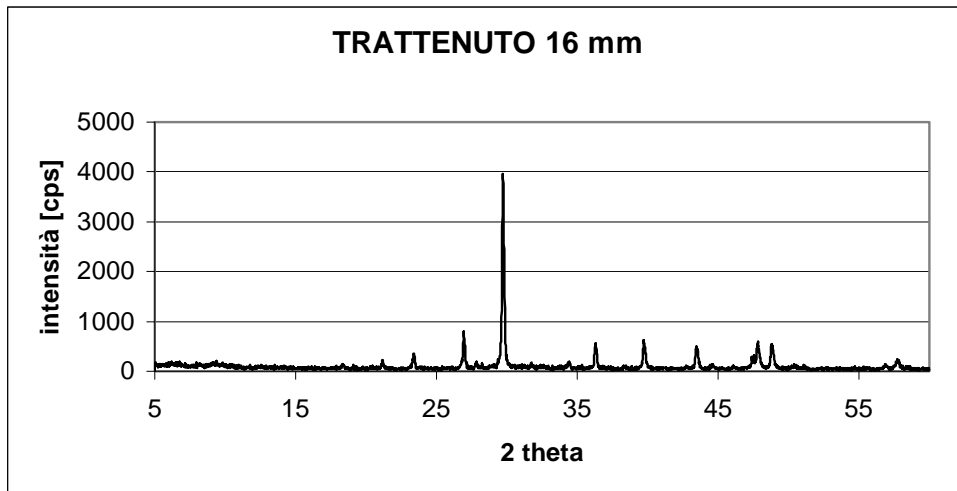


Fig. 4.77 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 16 mm

Lo spettro rappresentato in figura 4.77 derivante dall'analisi diffrattometrica evidenzia le fasi presenti nell'aggregato trattenuto al setaccio da 16 mm, i riflessi sono associabili alla presenza di calcare e tracce di quarzo.

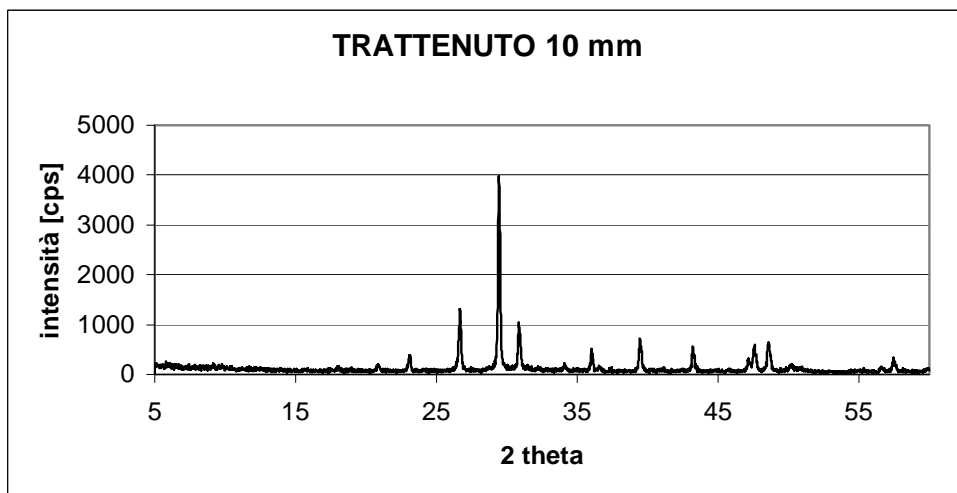


Fig. 4.78 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 10 mm

L'analisi evidenziata in figura 4.78 effettuata sul materiale passante al crivello da 16 mm e trattenuta su quello da 10 mm ha evidenziato riflessi associati a calcare (calcite), quarzo e carbonato misto di calcio e magnesio.

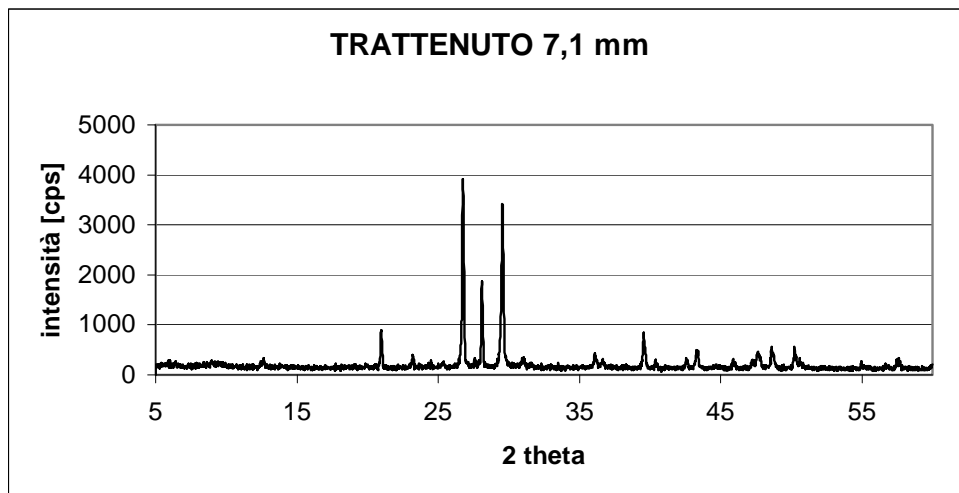


Fig. 4.79 - Diffrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 7,1 mm

Lo spettro in figura 4.79, effettuata sul materiale passante al crivello da 10 mm e trattenuta su quello da 7,1 mm derivante dall'analisi diffrattometrica evidenzia la presenza di picchi tipici del quarzo, calcare e silico-alluminati di calcio e sodio (tipo anortite).

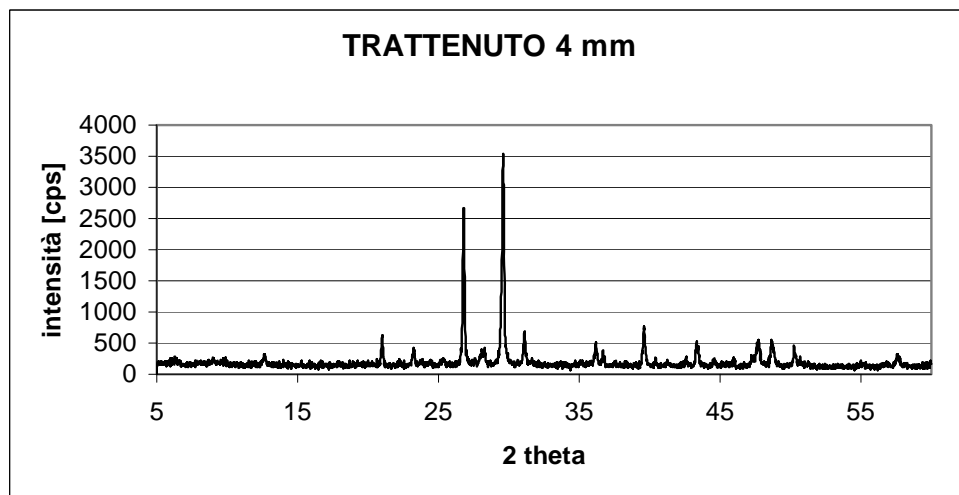


Fig. 4.80 - Diffrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 4 mm

Lo spettro derivante dall'analisi diffrattometrica in figura 4.80 effettuata sul materiale passante al crivello da 7,1 mm e trattenuta su quello da 4 mm evidenzia i picchi riferiti alle fasi cristalline di quarzo, calcare e piccole quantità di carbonato misto di calcio e magnesio.

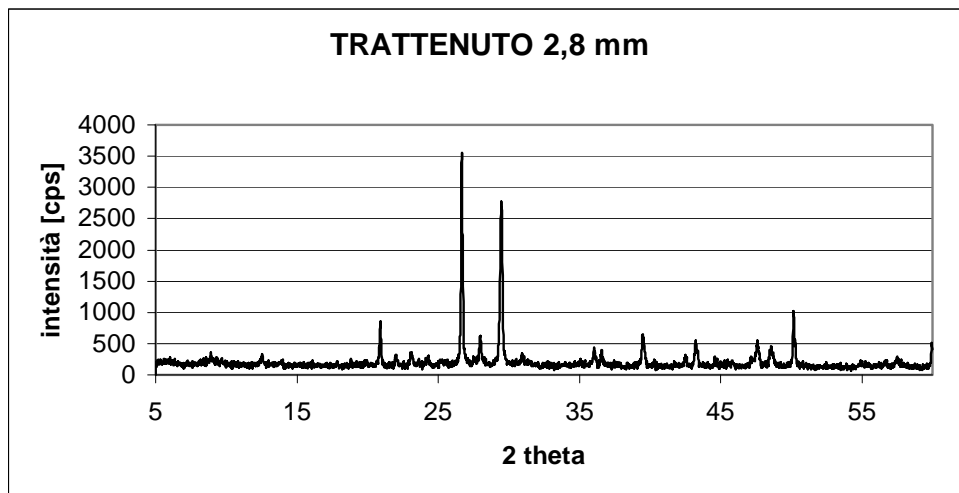


Fig. 4.81 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 2,8 mm

Lo spettro in figura 4.81 derivante dall'analisi diffrattometrica effettuata sul materiale passante al crivello da 4 mm e trattenuto su quello da 2,8 mm evidenzia la presenza della fase cristallina tipica del quarzo e calcare (calcite), con piccole quantità di Anortite.

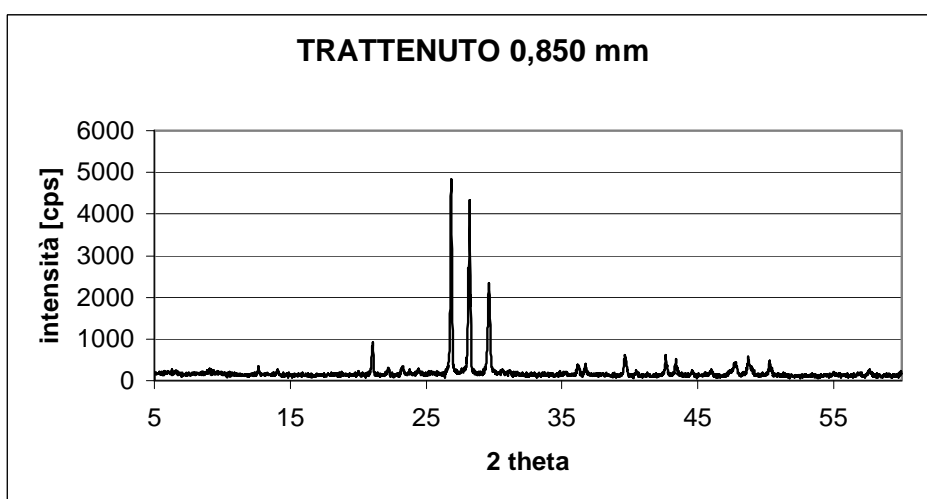


Fig. 4.82 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,850 mm

Lo spettro in figura 4.82 derivante dall'analisi diffrattometrica effettuata sul materiale passante al crivello da 4 mm e trattenuto su quello da 0,850 mm evidenzia nell'aggregato la presenza di tre fasi cristalline attribuite al quarzo, calcare e silico-alluminati di calcio e sodio (tipo anortite).

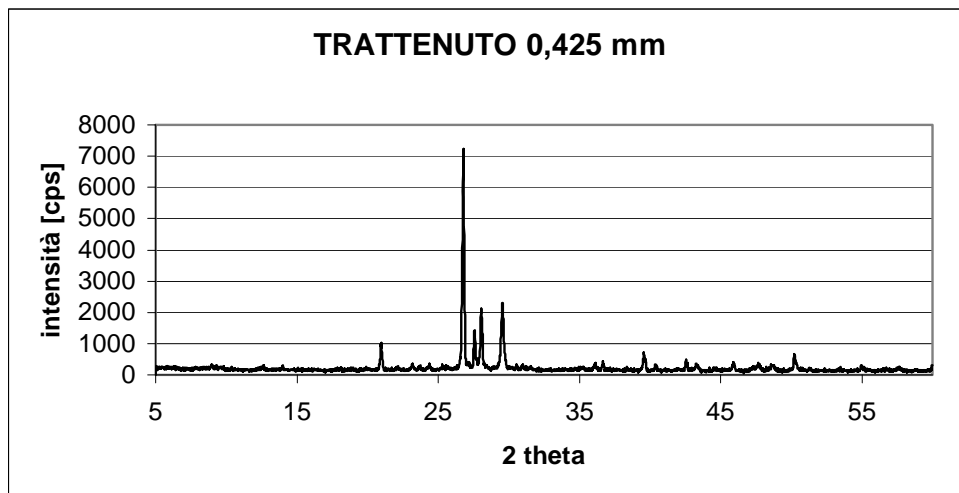


Fig. 4.83 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,425 mm

Lo spettro in figura 4.83 derivante dall'analisi diffrattometrica effettuata sul materiale passante al crivello da 0,850 mm e trattenuto su quello da 0,425 mm evidenzia nell'aggregato la presenza di più fasi cristalline significative associabili al quarzo, calcare (calcite), silico-alluminati di calcio e sodio tipo Anortite e albite.

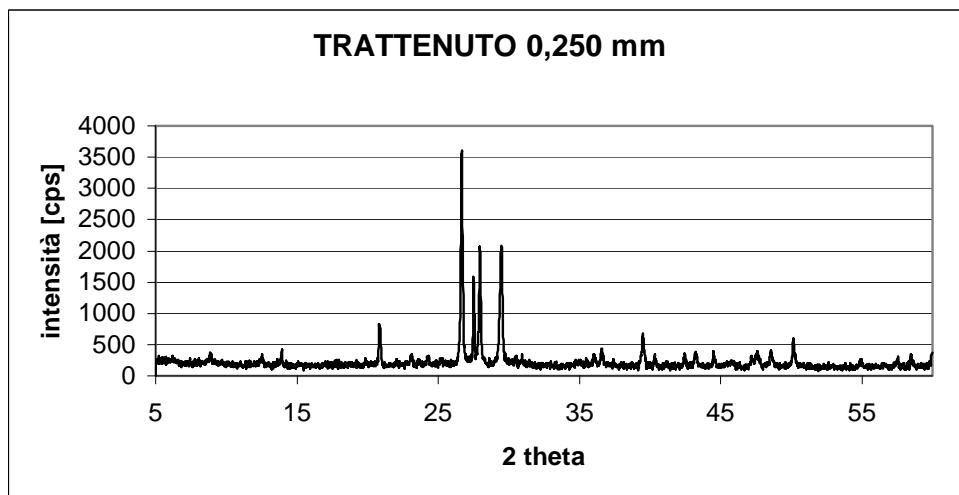


Fig. 4.84 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,250 mm

Anche lo spettro in figura 4.84 derivante dall'analisi diffrattometrica effettuata sul materiale passante al crivello da 0,425 mm e trattenuto su quello da 0,250 mm evidenzia nell'aggregato la presenza di più fasi cristalline significative associabili al quarzo, calcare (calcite), silico-alluminati di calcio e sodio tipo Anortite e albite.

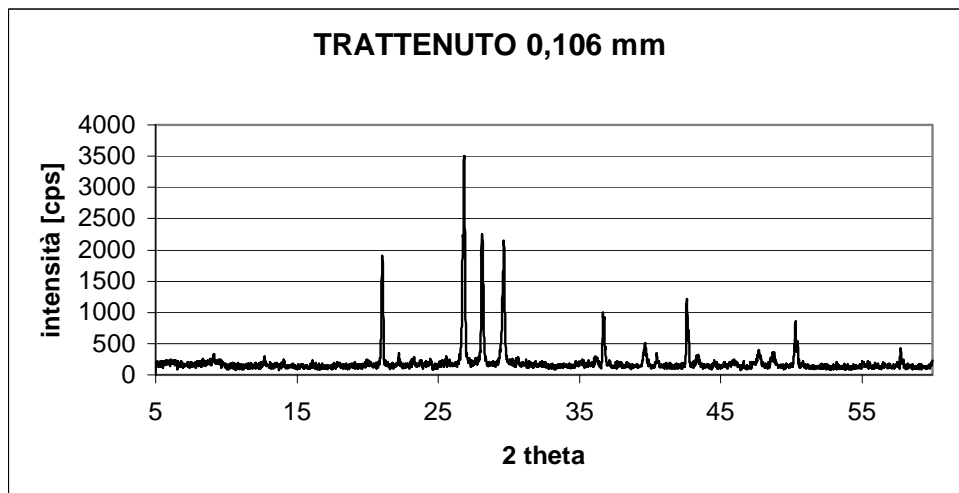


Fig. 4.85 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,106 mm

Lo spettro in figura 4.85 derivante dall'analisi diffrattometrica effettuata sul materiale passante al crivello da 0,250 mm e trattenuto su quello da 0,106 mm evidenzia nell'aggregato la presenza delle fasi cristalline significative associabili al quarzo, calcare (calcite), silico-alluminati di calcio e sodio tipo anortite.

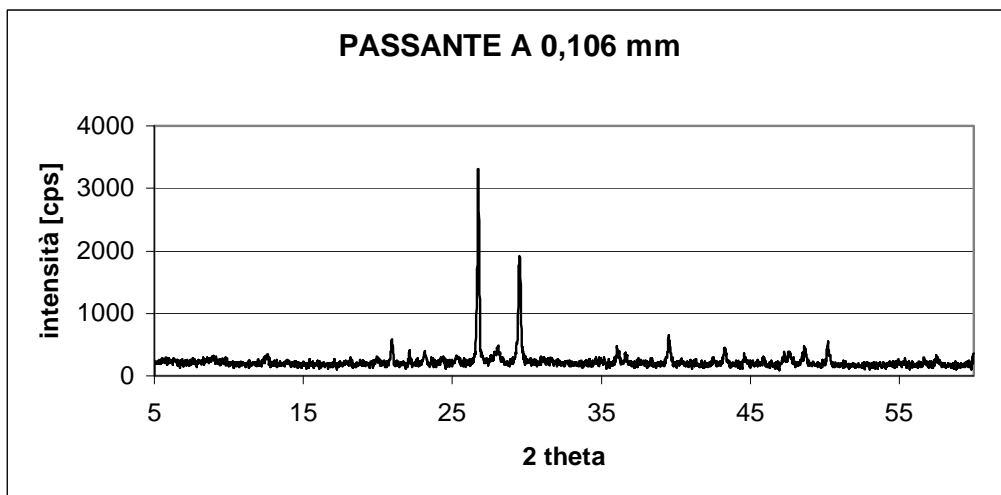


Fig. 4.86 - Difrattogramma del campione di aggregato riciclato passante a 0,106 mm

Lo spettro in figura 4.86 derivante dall'analisi diffrattometrica effettuata sul materiale passante al crivello da 0,106 mm e trattenuto su quello del fondo evidenzia nell'aggregato la presenza di fasi cristalline attribuibili a calcare, quarzo e silicati .

4.3.3.2.5. Microanalisi a dispersione di energia.

Tramite la microanalisi a dispersione di energia, di seguito riportate, si evidenziano i costituenti principali degli aggregati riciclati.

Nella figura 4.87 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 10 mm conferma quanto evidenziato nell'analisi diffrattometrica, cioè la presenza di calcio, di silice e magnesio.

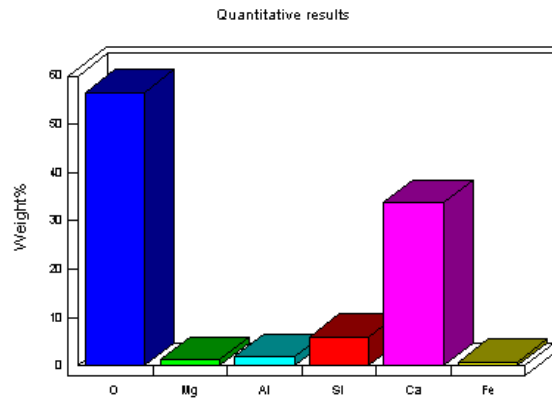


Fig. 4.87 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 10 mm.

Nella figura 4.88 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 7,1 mm ha evidenziato la presenza di calcio, silice e alluminio, confermando la presenza di anortite, come si evince dalle analisi ai raggi X.

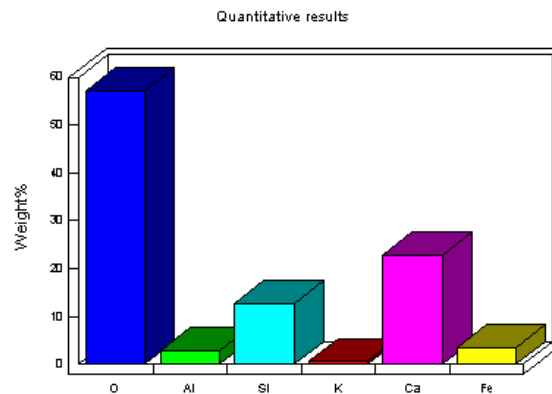


Fig. 4.88 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 7,1 mm.

Nella figura 4.89 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 4 mm conferma quanto evidenziato nell'analisi diffrattometrica, cioè la presenza di calcio, di silice e magnesio.

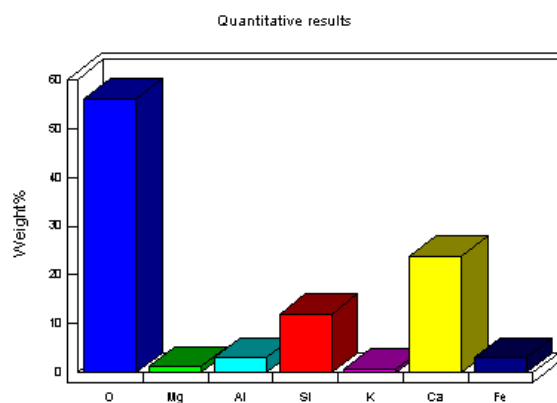


Fig. 4.89 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 4 mm.

L'analisi elementare riportata in figura 4.90 eseguita sul campione di materiale trattenuto a 0,850 mm evidenzia una significativa quantità di alluminio, oltre alla silice e al calcio e sodio, confermando la presenza di anortite, come evidenziato dall'analisi ai raggi X.

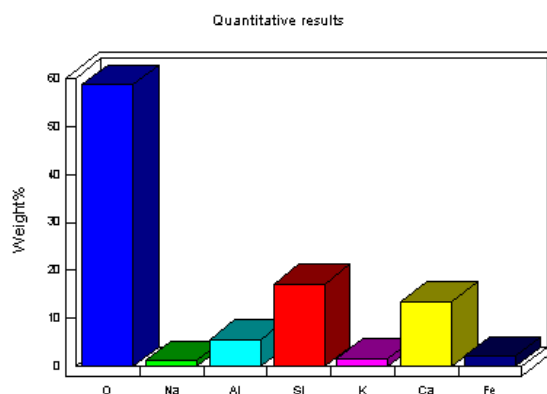


Fig. 4.90 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,850 mm.

Anche nella figura 4.91 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 0,425 mm evidenzia soprattutto la presenza di silice, calcio, alluminio e sodio.

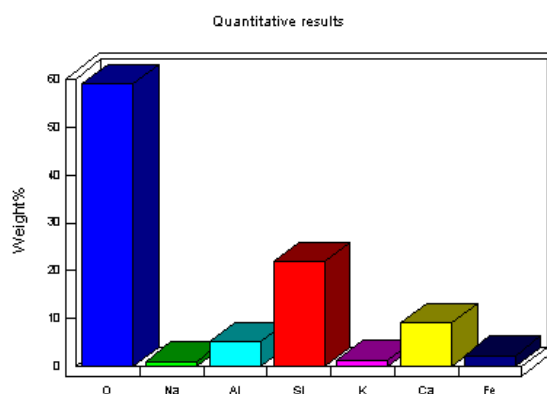


Fig. 4.91 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,425 mm.

Nella figura 4.92 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 0,250 mm conferma quanto evidenziato nell'analisi diffrattometrica, cioè la presenza di silice, calcio e alluminio.

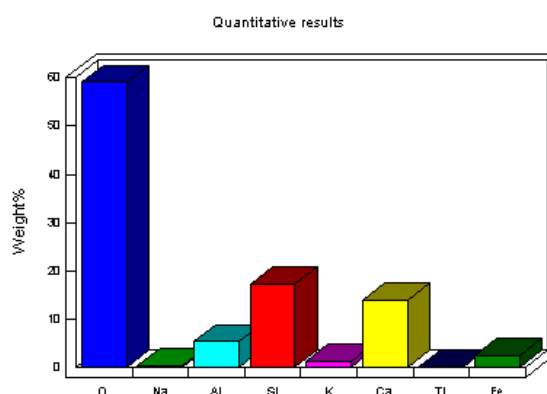


Fig. 4.92 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato trattenuto a 0,250 mm.

L'analisi elementare riportata in figura 4.93 eseguita sul campione di materiale fine (fondo) evidenzia una significativa quantità di calcio, oltre a silice e alluminio, attribuite alle fasi cristalline del quarzo, del calcare, dei silicati e degli alluminati, come evidenziato dall'analisi ai raggi X.

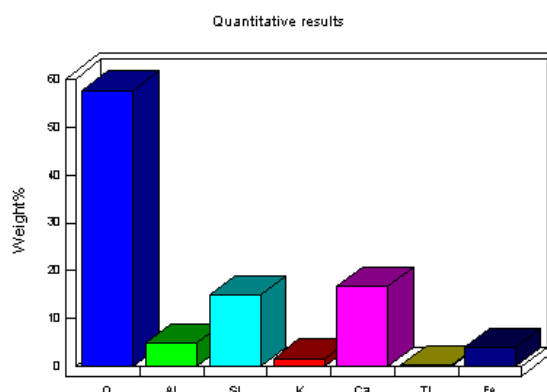


Fig. 4.93 - Microanalisi del campione di aggregato riciclato passante a 0,106 mm.

4.3.3.2.6. Prova al solfato di magnesio.

Selezionato un campione di circa 1 Kg di aggregato riciclato, nella gamma dimensionale da 10 mm a 14 mm, si è provveduto a essiccazione in forno ad una temperatura di (110 ± 5) °C. Il materiale è stato poi stacciato e suddiviso in due campioni, in modo da ottenere una massa di circa 500 g ciascuno. Dopo aver lavato con acqua distillata ciascun campione per eliminare la polvere ed asciugato in forno si è ripetuta la stacciatura, per essere sicuri di utilizzare soltanto materiale della gamma compresa tra 10 mm e 14 mm. Da ciascun campione si è ricavato, mediante pesatura, una quantità compresa tra (420 ± 0.1) g e (430 ± 0.1) g, e si sono annotate le masse:

- $M1_i = 420,03$ g
- $M2_i = 420,08$ g

Ciascun campione di prova è stato poi sottoposto a cinque cicli di immersione in una soluzione satura di solfato di magnesio, mediante dei cestelli sospesi a 20 mm dal fondo dei contenitori, per un periodo di (17 ± 0.5) h, seguiti da essiccazione in forno a (110 ± 5) °C per (24 ± 1) h.

Al completamento dei cinque cicli dopo aver lasciato raffreddare i campioni a temperatura ambiente per un periodo di $(5 \pm 0,25)$ h, si è provveduto al lavaggio sotto acqua corrente di rubinetto fino a che l'acqua di lavaggio non è risultata libera dal solfato di magnesio.

Dopo essere stati essiccati nuovamente in forno, gli aggregati, sono stati setacciati manualmente con lo staccio da 10 mm e sono state annotate le masse:

- $M_{1f} = 418,89 \text{ g}$
- $M_{2f} = 416,62 \text{ g}$



Fig. 4.94 - Aggregati dopo la prova al solfato di magnesio.

La degradazione degli aggregati derivante dagli effetti dirompenti viene misurata dalla quantità di materiale più fine di 10 mm che viene prodotto sotto forma di particelle.

Nel caso in esame si è osservato che gli aggregati oltre ad essere visibilmente integri (fig. 4.94), a non aver subito, cioè, effetti dirompenti dovuti alla ripetuta cristallizzazione e reidratazione del solfato di magnesio all'interno dei pori, hanno evidenziato una lieve perdita in peso, riscontrabile dal confronto tra le masse iniziale M_i e quelle finali M_f .

4.3.3.3. Gli aggregati naturali.

In questo paragrafo si analizzano gli aspetti degli aggregati naturali utilizzati negli impasti di calcestruzzo, tenendo presente che provengono dal territorio locale, si presentano sotto forma tondeggianti, e che la loro normale utilizzazione avviene nel confezionamento di calcestruzzi ordinari.

4.3.3.3.1. Analisi granulometrica della sabbia.

Nel presente lavoro l'analisi granulometrica della sabbia è stata eseguita utilizzando stacci del diametro compresi tra 7,1 mm e 0,250 mm riportati nella tabella 4.19, mentre il pietrisco è stato separato in frazioni granulometriche da 16 mm, 10 mm, 7,1 mm e 4 mm, da utilizzare nelle opportune percentuali in peso per riprodurre al meglio la distribuzione granulometrica ideale.

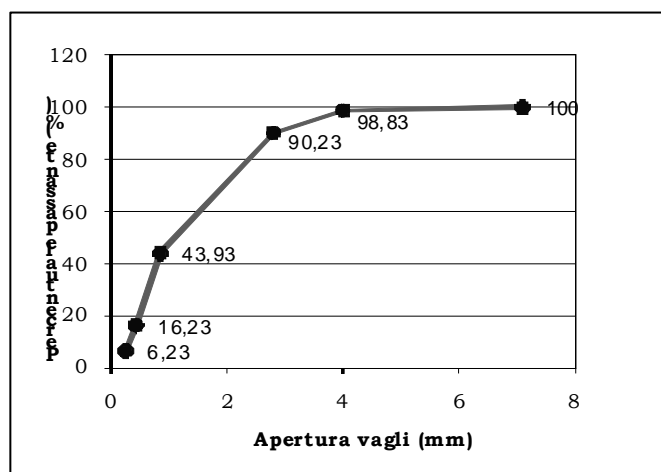


Fig. 4.95 - Curva granulometrica della sabbia.

| Apertura vagli (mm) | Peso trattenuto (g) | Percentuale trattenuta (%) | Percentuale cumulativa passante (%) |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 7.1 | 0 | 0 | 100 |
| 4 | 11,75 | 1,17 | 98,83 |
| 2.8 | 86,25 | 8,6 | 90,23 |
| 0,850 | 463 | 46,3 | 43,93 |
| 0,425 | 277 | 27,7 | 16,23 |
| 0.250 | 100 | 10 | 6,23 |
| Trattenuto fondo | 53 | 5,3 | - |

Tab. 4.19 - Analisi granulometrica della sabbia.

4.3.3.3.2. Analisi diffrattometrica.

Sono riportati di seguito le analisi diffrattometriche delle varie frazioni granulometriche: trattenuto a 10 mm, a 4 mm, del passante a 4 mm e della sabbia.

Dal diffrattogramma ai raggi X del campione trattenuto a 10 mm (fig. 4.96) si evidenzia una ricca presenza di silice cristallina e di apprezzabili quantità di anorthite e dolomite.

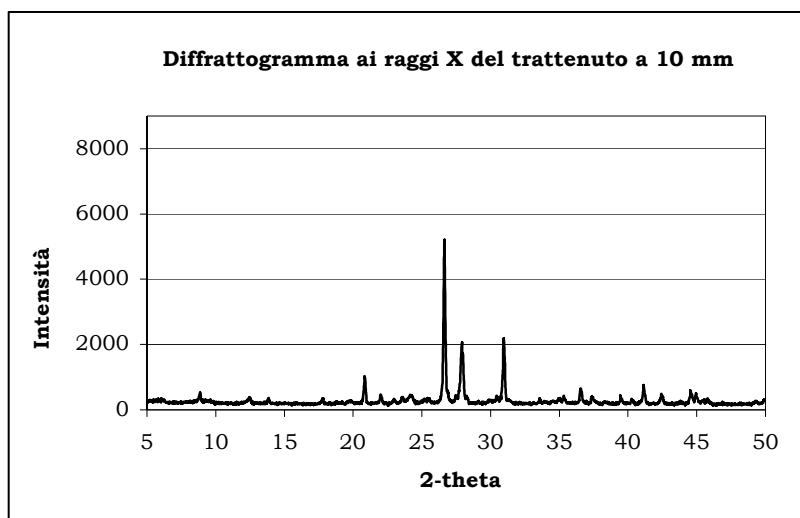


Fig. 4.96 - Diffattogramma del campione di aggregato naturale trattenuto a 10 mm.

Nel diffattogramma del trattenuto a 4 mm (fig. 4.97) le quantità di anorthite e dolomite sono trascurabili rispetto alla quantità di silice cristallina.

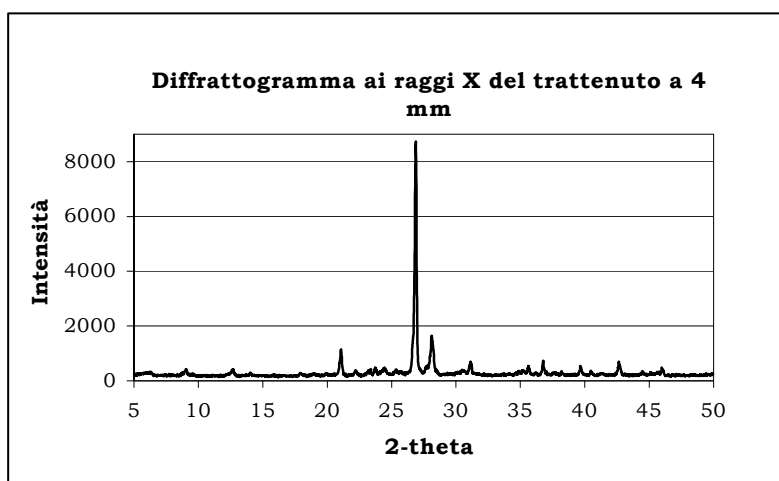


Fig. 4.97 - Diffattogramma del campione di aggregato naturale trattenuto a 4 mm.

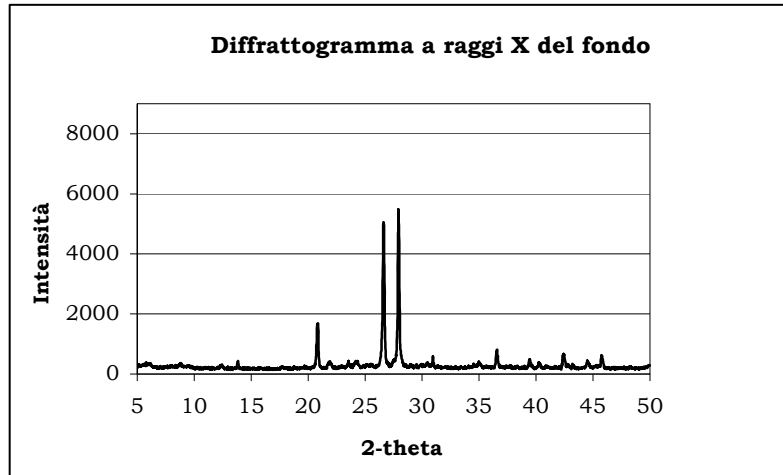


Fig. 4.98 - Diffratogramma del campione di aggregato naturale passante a 4 mm.

Dal diffratogramma del fondo (passante a 4 mm), figura 4.98, si evince la presenza di quarzo e anorthite, nonché di piccole quantità di dolomite.

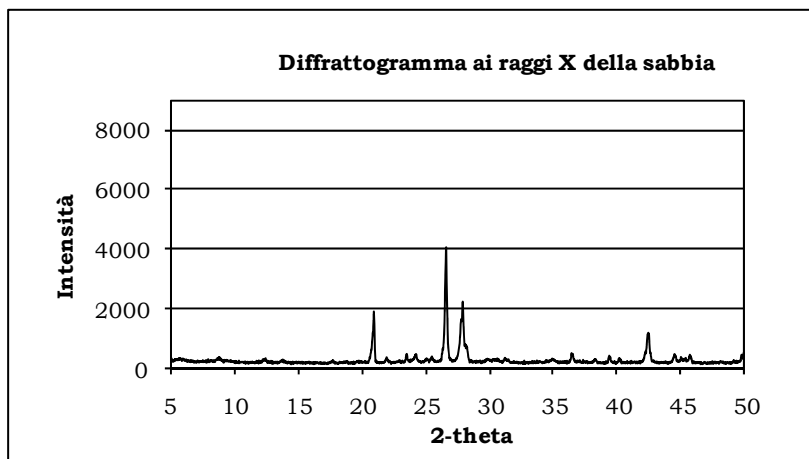


Fig. 4.99 - Diffratogramma del campione di sabbia.

Infine per quanto riguarda il diffratogramma della sabbia di figura 4.99 si evidenzia principalmente la presenza di silice cristallina nella forma di quarzo e da un silico-alluminato di calcio e sodio (anorthite).

4.3.3.3. Microanalisi a dispersione di energia.

Vengono qui di seguito riportate le analisi chimiche dei diversi aggregati.

Nella figura 4.100 l'analisi elementare condotta sul trattenuto a 10 mm conferma quanto evidenziato nell'analisi diffrattometrica, cioè la presenza di silice, di magnesio, di calcio ed alluminio (quarzo, anorthite e dolomite).

Anche nella figura 4.101 l'analisi elementare del trattenuto a 4 mm evidenzia soprattutto la presenza di silice.

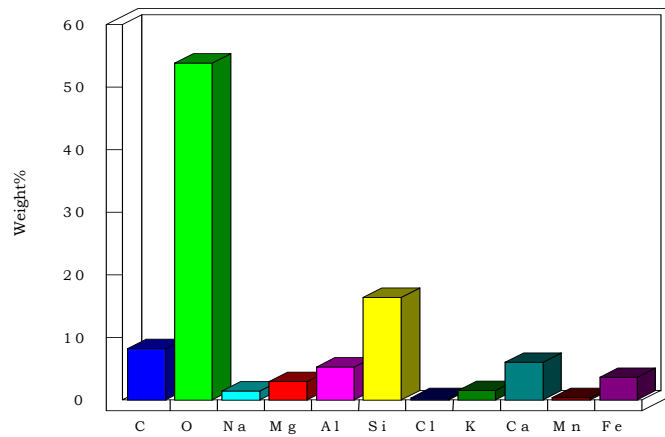


Fig. 4.100 - Analisi chimica del campione di aggregato naturale trattenuto a 10mm.

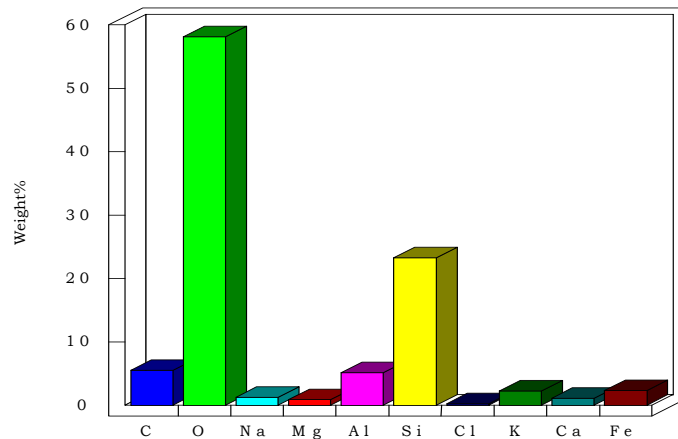


Fig. 4.101 - Analisi chimica del campione di aggregato naturale trattenuto a 4 mm.

L'analisi elementare riportata in figura 4.102 eseguita sul campione di materiale fine (fondo) evidenzia una significativa quantità di alluminio, oltre alla silice, confermando la presenza di anorthite, come evidenziato dall'analisi ai raggi X.

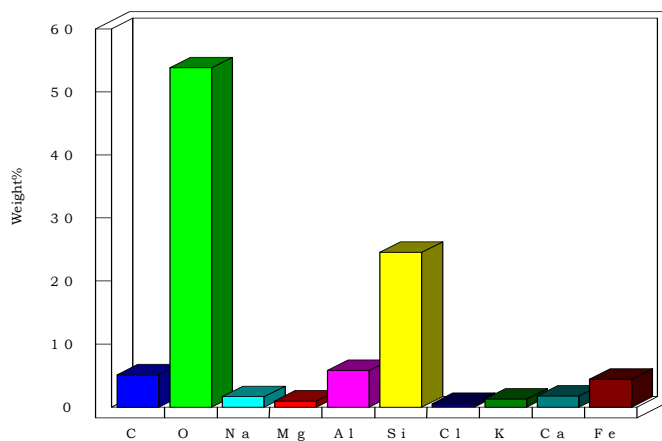


Fig. 4.102 - Analisi chimica del campione di aggregato naturale passante a 4 mm.

Dall'analisi elementare eseguita sul campione di sabbia (fig. 4.103) si evince che il silicio e l'alluminio sono presenti in quantità significative, attribuite alle fasi cristalline del quarzo e dell'anorthite.

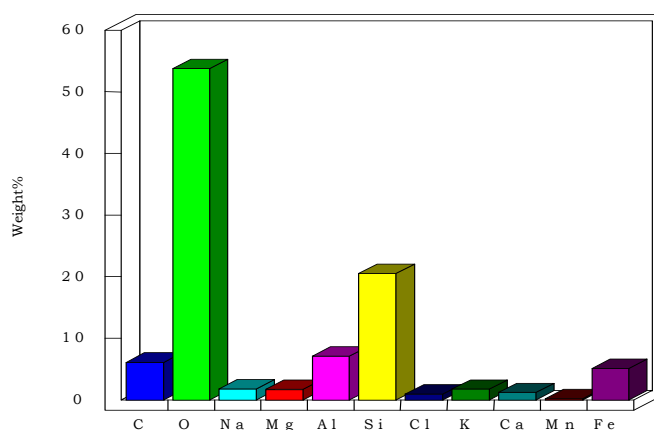


Fig. 4.103 - Analisi chimica del campione di sabbia.

4.3.3.4. Acqua d'impasto.

La funzione dell'acqua di impasto è quella di idratare il legante, di bagnare l'inerte in modo da favorire l'aderenza con la pasta legante e di portare la massa alla consistenza voluta così come è richiesto dalle condizioni di trasporto, di getto e di costipamento.

La presenza di impurezze nell'acqua di impasto può causare effetti nocivi quali: variazioni dei tempi di presa, riduzione delle resistenze finali, efflorescenze e macchie superficiali e, non ultima per importanza, corrosione delle armature nelle strutture in calcestruzzo armato.

Si può asserire che la maggior parte delle acque naturali è ritenuta idonea all'utilizzo come acqua di impasto.

Fra tutte le sostanze comunemente presenti nell'acqua, quelle che al disopra di certe concentrazioni possono modificare lo sviluppo delle resistenze meccaniche sono i carbonati, i solfati ed i cloruri; questi ultimi sono importanti anche ai fini della corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo armato.

E' da ritenersi tollerabile una quantità di carbonati e bicarbonati fino a 2000 ppm senza danno eccessivo; gli effetti delle due sostanze sono diversi tra di loro e per differenti tipi di clinker, nel caso dei carbonati si può avere, a seconda delle quantità, azione accelerante o ritardante sull'indurimento. È buona norma effettuare una prova di resistenza meccanica e la misura del tempo di presa quando nell'acqua di impasto il contenuto di una delle due sostanze superi i 1000 ppm.

I solfati ed i cloruri possono essere tollerati in quantità eccezionalmente elevata senza che le resistenze meccaniche debbano risentirne; il cloruro sodico non ha influenza sino a concentrazioni del 2,0%, mentre ne ha molto poca in concentrazioni del 5%.

Dai dati della letteratura si desume che, ai fini della resistenza meccanica, si può ritenere idonea un'acqua nella quale la concentrazione globale dei cloruri e dei solfati sia pari a 10.000 ppm cioè 1% in peso.

La presenza di solidi sospesi può aumentare in modo indesiderabile il tempo di presa del calcestruzzo, e un'acqua che abbia una torbidità superiore a 2000 ppm dovrebbe esser lasciata decantare in apposite vasche prima dell'uso.

Per la produzione degli impasti in laboratorio si è utilizzata acqua potabile di rubinetto, che risulta essere priva di sostanze dannose e con un pH neutro, la quantità utilizzato è tale da fornire un rapporto a/c di 0,45.

4.3.3.5. Gli additivi.

Attualmente il calcestruzzo è il materiale più impiegato nella realizzazione di un gran numero di costruzioni. Questo primato è attribuito soprattutto al basso costo di costruzione e di manutenzione rispetto ad altri materiali utilizzati per la realizzazione delle stesse strutture.

Pertanto l'evoluzione tecnologica del calcestruzzo deriva dalla riduzione dei tempi esecutivi, atti ad abbassare i costi di costruzione, e dal miglioramento della durabilità per contenere le spese manutentive di restauro.

Nel periodo tra il 1940 e il 1970 la disponibilità di cementi Portland puri, ad elevata resistenza meccanica, consentì l'uso di alti quantitativi di acqua di impasto senza grandi penalizzazioni per la resistenza meccanica del calcestruzzo. Però, l'elevata porosità, in conseguenza dell'elevato rapporto a/c, comportò seri problemi per la durabilità delle opere, soprattutto per quelle esposte ad ambienti aggressivi.

Si è capito nel frattempo che, oltre alla velocità esecutiva ed alla durabilità delle opere, lo sviluppo tecnologico del calcestruzzo andava verso la disponibilità del legante (cemento) e/o del calcestruzzo stesso ad ospitare altri ingredienti¹⁹, provenienti da altri processi industriali, che favorivano prestazioni qualitative migliori.

Un ulteriore miglioramento qualitativo del calcestruzzo si è avuto con l'avvento dagli additivi chimici.

Gli additivi, aggiunti in modeste quantità negli impasti, migliorano le proprietà del calcestruzzo, ricoprendo notevole interesse dal punto di vista tecnologico e scientifico.

Il miglioramento derivante dall'utilizzo degli additivi può realizzarsi, potenzialmente, variando la composizione del calcestruzzo e la sua tecnologia di applicazione.

Per cui l'aggiunta degli additivi viene giustificata dal fatto che il miglioramento di una determinata proprietà deve risultare più vantaggiosa, dal punto di vista tecnico-economico, di qualsiasi altra soluzione (Malhotra et al., 1998; Ramchandran, 1995; Collepari et al., 1994).

A seconda della funzione coinvolta nel miglioramento gli additivi possono essere classificati in vari tipi, i più importanti dei quali sono:

- Acceleranti
- Ritardanti

¹⁹ Ceneri, scorie, ecc.

- Superfluidificanti (e fluidificanti)
- Aeranti

Gli *additivi acceleranti (accelerators)* e quelli *ritardanti (retarders)* hanno la funzione di modificare il grado d'idratazione (α) del cemento solo alle brevi stagionature e modificano, quindi, le prestazioni del calcestruzzo in corso d'esecuzione ma non le prestazioni delle strutture in esercizio. Gli *acceleranti*, in particolare, aumentano il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature in modo da accorciare i tempi di presa, *acceleranti di presa*, o di incrementare la resistenza meccanica nei primi giorni, *acceleranti di indurimento*, sopra tutto nei climi invernali quando la bassa temperatura rallenta il decorso della reazione iniziale tra l'acqua ed il cemento.

L'effetto accelerante serve, per esempio, all'impresa costruttrice per stagionare e rifinire più in fretta un pavimento in calcestruzzo che presenta tempi di presa troppo lunghi, o per scasserare più in fretta i getti di calcestruzzo senza immobilizzare troppo a lungo le casseforme. Gli acceleranti non modificano la resistenza meccanica del calcestruzzo alle lunghe stagionature, cioè in servizio, pertanto le prestazioni delle strutture in opera non risentono beneficamente della eventuale presenza di acceleranti²⁰. Particolarmente interessanti, sempre per ragioni esecutive, sono gli acceleranti per il calcestruzzo proiettato (*shotcrete*, o *spritz beton*), detto anche *gunite* dall'inglese *to gun*, che significa "parare". Essi consentono di accelerare l'indurimento nelle prime 24 ore senza penalizzazione delle prestazioni meccaniche in servizio, purché s'impieghino acceleranti privi di alcali (*alkali-free*). Difatti gli acceleranti alcalini, a base di silicato o alluminato o carbonato di sodio, poiché sono molto caustici, provocano danni all'epidermide ed alle mucose degli operai, penalizzano le resistenze meccaniche alle lunghe stagionature, cioè le prestazioni in servizio. Gli acceleranti *alkali-free*, a base di solfato ferrino o di alluminio, invece, non riducono le prestazioni in servizio e, proprio per l'assenza di alcali, non creano problemi agli utilizzatori del calcestruzzo spruzzato.

Gli *additivi ritardanti* riducono il grado d'idratazione (α) del cemento nelle prime ore dopo l'impasto, vengono utilizzati soprattutto in presenza di climi caldi quando l'alta temperatura accelera l'idratazione del cemento ostacolando il trasporto del calcestruzzo, perdita di lavorabilità, le operazioni di getto e quelle di finitura.

²⁰ In passato l'impiego di acceleranti a base di cloruri ha provocato fenomeni di corrosione delle armature quando si eccedeva nel dosaggio di questi.

L'utilizzo di questi additivi permette all'impresa costruttrice di risolvere qualche problema esecutivo in fase di realizzazione, ma non modifica sostanzialmente le prestazioni del materiale in servizio. Gli *additivi aeranti* (*air-entraining agents, AEA*), invece, modificano le prestazioni del calcestruzzo in servizio migliorandone la resistenza in presenza di ghiaccio. Gli *additivi superfluidificanti* (*superplasticizers*) ed in minor misura gli additivi *fluidificanti* (*plasticizers*), modificano, a seconda del loro impiego, le prestazioni del calcestruzzo in corso di esecuzione e/o quelle in esercizio (durabilità, resistenza meccanica, ritiro, ecc.).

L'impiego dei superfluidificanti ha rivoluzionato il mondo delle costruzioni in c.a. e c.a.p. E' possibile, infatti, a seconda della modalità di impiego:

- migliorare la lavorabilità e l'affidabilità delle strutture in opera (a pari rapporto a/c);
- aumentare R_{ck} e durabilità riducendo l'acqua (a) e quindi il rapporto a/c (a pari lavorabilità);
- ridurre il ritiro igrometrico, il gradiente termico e la deformazione viscosa riducendo sia l'acqua (a) che il cemento (c), a pari rapporto a/c e pari lavorabilità.

Gli additivi superfluidificanti sono costituiti da polimeri idrosolubili capaci di essere adsorbiti sulla superficie dei granuli di cemento. Questi ultimi, in assenza di additivo superfluidificante, tendono ad agglomerarsi in grossi flocculi per la presenza di cariche elettrostatiche.

In presenza di additivo superfluidificante i granuli di cemento sono dispersi per la presenza di additivo sulla superficie del cemento. La mancata flocculazione del cemento rende il sistema più fluido. La trasformazione di un sistema flocculato in uno disperso provoca un aumento significativo nella fluidità della pasta cementizia.

Conseguentemente, il calcestruzzo con additivo superfluidificante diventa molto più lavorabile ancorché confezionato con basso rapporto a/c .

I superfluidificanti più diffusi sono a base di naftalina o melammina o polimeri acrilici e, più recentemente di eteri policarbossilici (Damtoft et al., 1999; Collepardi et al., 1994). Qualche formulazione può contenere ritardanti o acceleranti di presa.

Nel confezionamento del calcestruzzo sperimentato in laboratorio si è reso necessario l'utilizzo di additivi per ottimizzare la lavorabilità degli impasti realizzati.

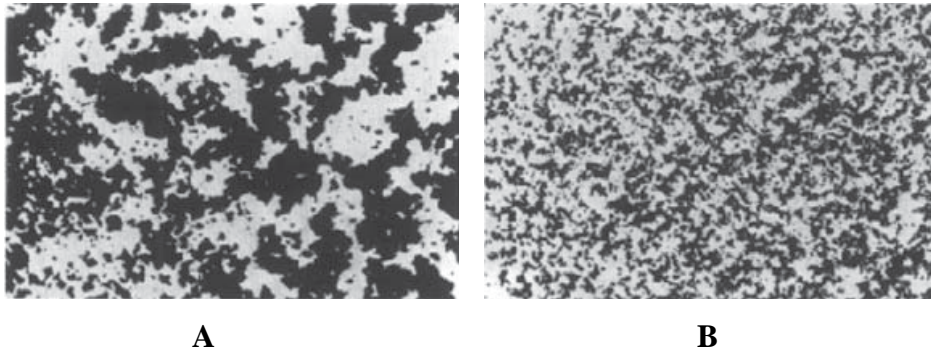


Fig. 4.104 - Matrice cementizia (A) senza e (B) in presenza di additivo fluidicante.

Per le loro caratteristiche tecniche sono stati utilizzati gli additivi Fluid Premia 150, già trattato in precedenza negli SCC e l'ERGOMIX 180, che è indicato per soddisfare le più esigenti ed articolate richieste.

Questo additivo non contiene cloruri, è conforme alle norme ASTM C-494/86 tipo "F" e UNI-EN 934-2.

L'aggiunta di Ergomix 180 consente di:

- confezionare calcestruzzi ad alta lavorabilità;
- confezionare calcestruzzi trasportabili su lunghe distanze;
- confezionare calcestruzzi a basso rapporto a/c, senza influenzare negativamente la lavorabilità e la reologia dell'impasto;
- realizzare calcestruzzi di pregiata finitura e qualità estetica, poiché la ridotta porosità e la facilità di lavorazione dell'impasto riducono drasticamente le bolle superficiali;
- essere impiegato con diverse classi e tipologie di cementi conformi alle norme UNI-EN 197/1.

Il dosaggio impiegato varia tra lo 0,7 % e l' 1,5 % sul peso del cemento (0,7 - 1,5 litri ogni 100 Kg di cemento).

Per un ottimo rendimento, Ergomix 180 deve essere introdotto nella miscela, solo al termine dell'aggiunta dell'acqua d'impasto.

CAPITOLO 5

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI

5.1 Premessa

In questo capitolo si discutono i risultati ottenuti con le varie miscele preparate con l'aggiunta di zeoliti, con silica fume e con solo cemento.

5.2 Malte

La ricerca è stata rivolta inizialmente allo studio della compatibilità, in termini fisici e meccanici, tra i cementi e le zeoliti, pertanto sono state preparate delle malte con questi materiali non convenzionali e confrontate con delle malte confezionate con aggiunta tradizionale come la silica fume. Inoltre è stato effettuato il confronto delle prestazioni delle malte ottenute con le zeoliti con quelle realizzate solo con i cementi.

5.3 Preparazione e stagionatura dei provini

Le malte sono state realizzate preparando delle miscele con il cemento e sostituendo parte di esso, il 10% in peso, con materiale zeolitico o con silica fume. Le miscele sono state preparate conformemente alla normativa UNI EN 196-1.

Sono stati pertanto realizzati per ogni impasto 3 provini prismatici di dimensioni 40x40x160 mm, e dopo stagionatura, a 20°C ed U.R.>95% per tempi 2, 7 e 28 giorni, sono state saggiate le resistenze sia a compressione che a flessione in accordo alla UNI EN 196-1.

5.3.1 Resistenza a compressione dei provini realizzati con il CEM I 42,5 R.

Nella tabella 5.1 sono riportati i valori di resistenza a compressione, misurati sui provini di malta, ognuno media dei valori ottenuti su 3 provini.

| Cemento (90%) | Sostituzione (10%) | R _c (MPa) 2 gg | R _c (MPa) 7 gg | R _c (MPa) 28 gg |
|------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| CEM I | CEM I | 18,9 | 29,2 | 34,0 |
| CEM I | ZEOLITE 4A LAB. | 17,7 | 21,2 | 25,3 |
| CEM I | ZEOLITE 4A IND. | 21,9 | 30,1 | 31,3 |
| CEM I | ZEOLITE 5A LAB. | 26,1 | 34,5 | 36,2 |
| CEM I | ZEOLITE 5A IND. | 25,9 | 33,4 | 39,1 |
| CEM I | SILICA FUME | 20,3 | 29,5 | 36,4 |

Tab. 5.1 – Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni

In figura 5.1 sono diagrammati i valori delle resistenze meccaniche a compressione dei provini ottenuti con le varie miscele.

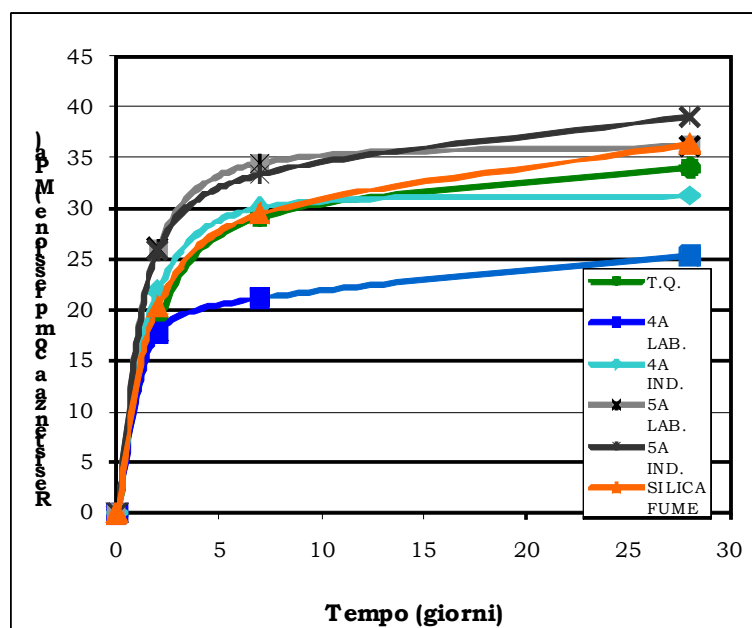


Fig. 5.1 - Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni

Nella tabella 5.2 e nelle figure 5.2, 5.3, 5.4 vengono riportati gli incrementi percentuali delle resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni, stagionati a 2 – 7 – 28 giorni, rispetto alle resistenze meccaniche dei provini realizzati con il solo il CEM I 42,5 R.

| SOSTITUZIONE (10%) | CEM I 42.5 R (90%) | | |
|-----------------------|--------------------|--------|--------|
| | 2 gg. | 7gg. | 28 gg. |
| 4 A LAB. | -6,15 | -27,24 | -25,66 |
| 4 A IND. | 16,29 | 3,22 | -12,70 |
| 5 A LAB. | 38,46 | 18,37 | 6,50 |
| 5 A IND. | 37,14 | 14,60 | 14,99 |
| SILICA FUME | 7,16 | 1,10 | 7,05 |

Tab. 5.2 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R, alle varie stagionature.

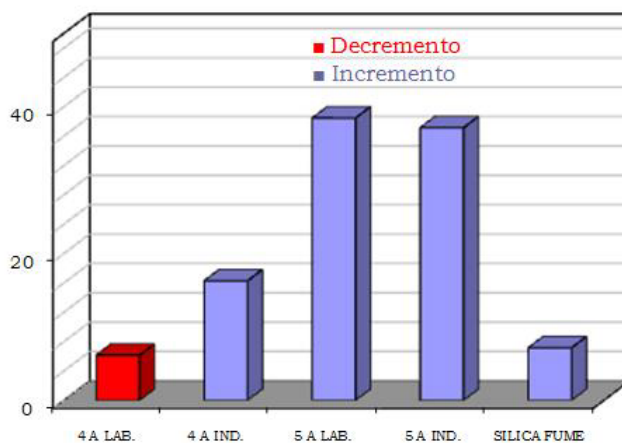


Fig. 5.2 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 2 giorni, realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R.

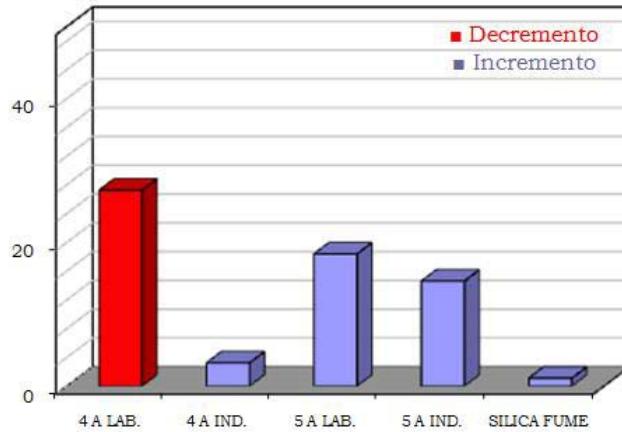


Fig. 5.3 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 7 giorni, realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R.

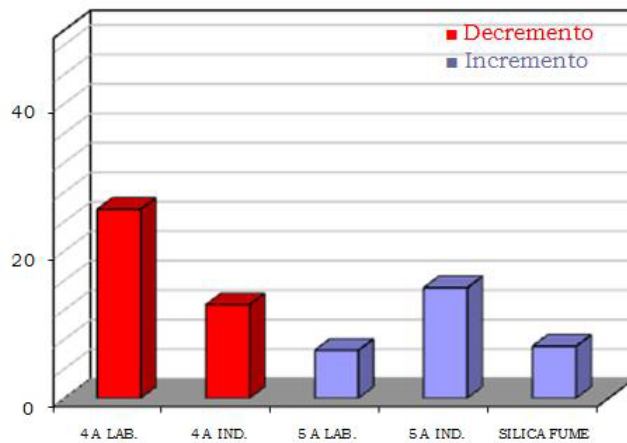


Fig. 5.4 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 28 giorni, realizzati con il 90% di CEM I 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM I 42,5 R.

La sostituzione del 10% di zeoliti al CEM I 42,5 R migliora le prestazioni meccaniche sia alle brevi che alle lunghe stagionature dei provini di malta.

Solo la sostituzione della zeolite 4A sodica, sintetizzata in laboratorio, non incrementa le

resistenze meccaniche dei provini. Ciò conferma l'effetto negativo degli alcali sullo sviluppo della resistenza del cemento Portland, come riportato in letteratura (Frigione et al., 1985; Oldler et al., 1983; Osbaeck, 1979).

L'incremento delle prestazioni meccaniche con la silice fume, rispetto al cemento tal quale, è confermato dai dati riportati in letteratura (Colleparidi, 2002). I migliori risultati sono stati ottenuti con la zeolite 5A.

Si osserva inoltre che sia per le zeoliti 4A che per le 5A, la variazione delle dimensioni delle particelle non comporta un significativo incremento delle resistenze, essendo le malte standard (UNI EN 196-1) realizzate ad un rapporto a/c uguale a 0,50 e pertanto caratterizzate da una maggiore porosità della pasta cementizia. In particolar modo alle brevi stagionature, indipendentemente dalle dimensioni delle particelle, la zeolite 5A esibisce maggiori resistenze di quelle ottenute con il 10% di silice fume.

5.3.2 Resistenza a compressione dei provini realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R

I valori di resistenza a compressione misurati sui provini di malta, dopo le varie stagionature, sono riportati in tabella 5.3.

| Cemento (90%) | Sostituzione (10%) | R _c (MPa) 2 gg | R _c (MPa) 7 gg | R _c (MPa) 28 gg |
|------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| CEM II | CEM II | 22,5 | 32,6 | 40,3 |
| CEM II | ZEOLITE 4A LAB. | 20,6 | 27,5 | 28,9 |
| CEM II | ZEOLITE 4A IND. | 28,0 | 34,3 | 35,7 |
| CEM II | ZEOLITE 5A LAB. | 26,8 | 35,7 | 36,2 |
| CEM II | ZEOLITE 5A IND. | 30,0 | 36,2 | 39,8 |
| CEM II | SILICA FUME | 21,1 | 27,6 | 37,5 |

Tab. 5.3 – Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni.

Nella figura 5.5 sono riportate le resistenze meccaniche dei provini di malta alle varie stagionature.

Gli istogrammi di figura 5.6 – 5.7 – 5.8 riportano gli incrementi percentuali delle resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni rispetto alla resistenza meccanica a compressione dei provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R.

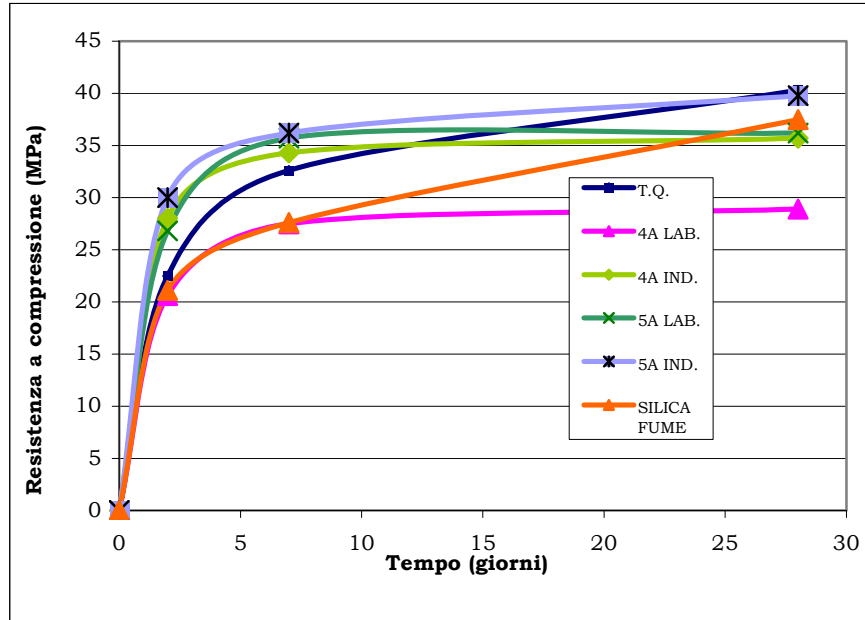


Fig. 5.5 - Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni.

Tab. 5.4 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R, alle varie stagionature.

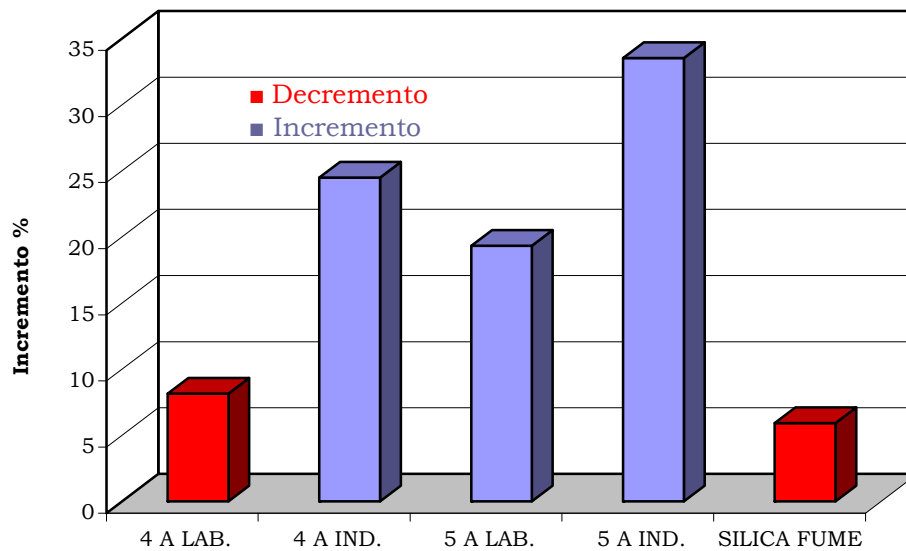


Fig. 5.6 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 2 giorni, realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R.

| SOSTITUZIONE (10%) | CEM II/A-S 42.5 R (90%) | | |
|-----------------------|-------------------------|--------|--------|
| | 2 gg. | 7gg. | 28 gg. |
| 4 A LAB. | -8,15 | -15,64 | -28,29 |
| 4 A IND. | 24,49 | 5,03 | -11,47 |
| 5 A LAB. | 19,32 | 9,41 | -15,21 |
| 5 A IND. | 33,53 | 11,01 | -1,19 |
| SILICA FUME | -5,92 | -15,67 | -6,85 |

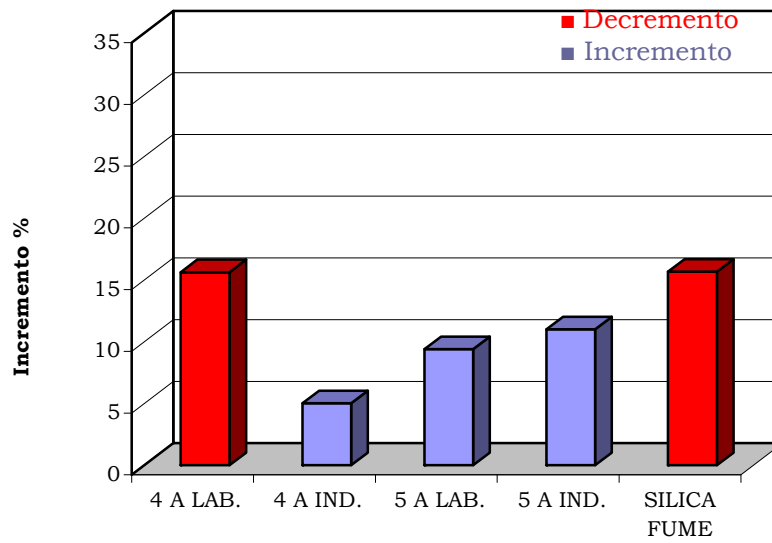


Fig. 5.7 - cremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 7 giorni, realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R.

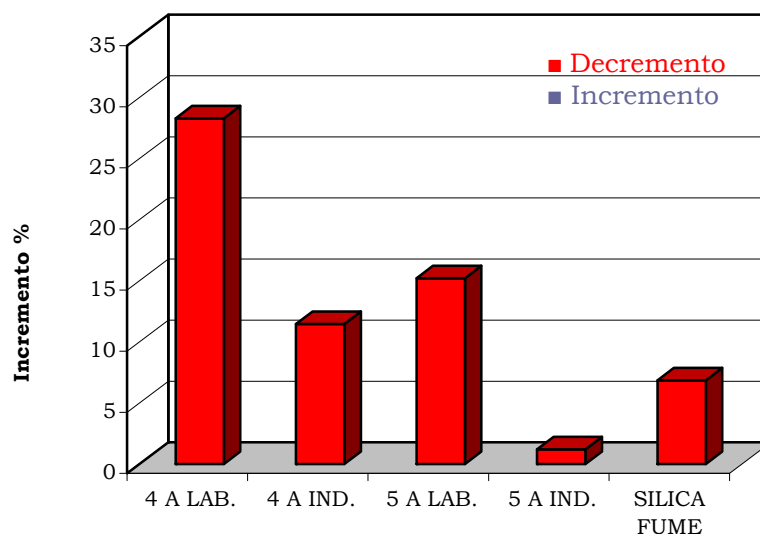


Fig. 5.8 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 28 giorni, realizzati con il 90% di CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM II/A-S 42,5 R.

Dai valori riportati in tabella 5.3 si evidenzia come la zeolite 5A industriale sia quella che riesce a dare le migliori prestazioni meccaniche sia alle brevi che alle lunghe stagionature. Simili risultati sono stati raggiunti con la zeolite 5A prodotta in laboratorio, ma con resistenze meccaniche a lunghe stagionature paragonabili a quelle ottenute con la silica fume.

E' visibile dal grafico riportato in figura 5.5 come la resistenza meccanica, a 28 giorni, dei provini realizzati con il solo CEM II/A-S 42,5 R sia leggermente superiore rispetto alle resistenze meccaniche ottenute dai provini realizzati con le varie sostituzioni, in particolare con il 10% di 5A industriale, il 10% di 5A di laboratorio ed il 10% di silica fume.

E' altrettanto evidente come i risultati meno performanti si ottengano con la zeolite 4A di laboratorio; infatti nonostante la presenza di circa il 20% di loppa si rileva l'effetto negativo degli alcali sullo sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione.

Con la zeolite 5A industriale si ottengono dei valori di resistenza a compressione caratteristici di un cemento 52,5 R.

La presenza di piccole quantità di alcali nella zeolite 5A industriale favorisce, probabilmente, l'attivazione della loppa.

5.3.3 Resistenza a compressione dei provini realizzati con il CEM III/A 42,5 N

I valori di resistenza a compressione misurati sui provini di malta, dopo le varie stagionature, sono riportati in tabella 5.5.

| Cemento (90%) | Sostituzione (10%) | R _c (MPa) 2 gg | R _c (MPa) 7 gg | R _c (MPa) 28 gg |
|------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| CEM III | CEM III | 15,7 | 23,5 | 42,5 |
| CEM III | ZEOLITE 4A LAB. | 15,7 | 20,9 | 23,9 |
| CEM III | ZEOLITE 4A IND. | 20,4 | 26,7 | 30,5 |
| CEM III | ZEOLITE 5A LAB. | 20,1 | 30,4 | 38,0 |
| CEM III | ZEOLITE 5A IND. | 22,3 | 32,6 | 40,8 |
| CEM III | SILICA FUME | 13,5 | 22,9 | 39,0 |

Tab. 5.5 – Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 R ed il 10% delle varie sostituzioni.

Nella figura 5.9 sono riportate le resistenze meccaniche dei provini di malta alle varie stagionature. Gli istogrammi di figura 5.10 – 5.11 – 5.12 riportano gli incrementi percentuali delle resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N. ed il 10% delle varie sostituzioni rispetto alla resistenza meccanica dei provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N.

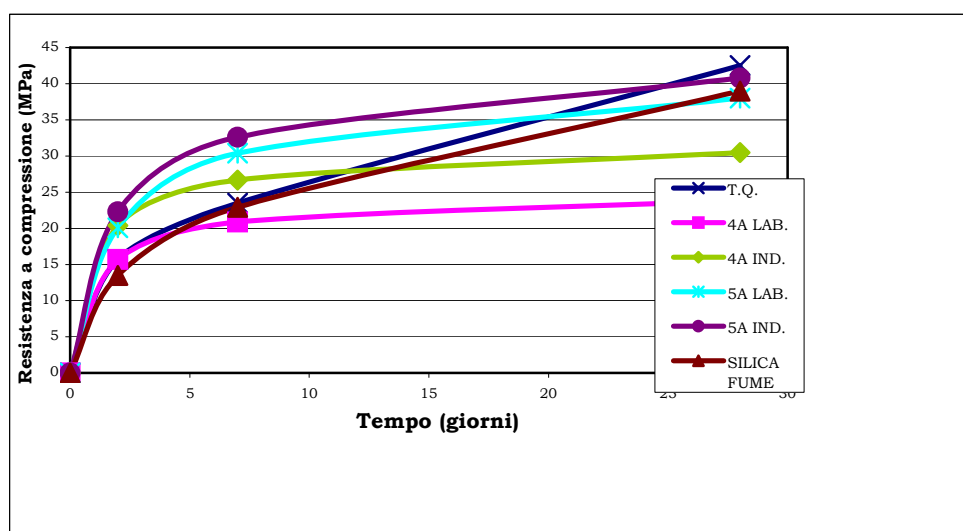


Fig. 5.9 - Resistenze meccaniche dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N ed il 10% delle varie sostituzioni.

| SOSTITUZIONE (10%) | CEM III/A 42.5 N (90%) | | |
|-----------------------|------------------------|--------|--------|
| | 2 gg. | 7gg. | 28 gg. |
| 4 A LAB. | 0 | -10,91 | -43,77 |
| 4 A IND. | 29,52 | 13,98 | -28,36 |
| 5 A LAB. | 27,99 | 29,62 | -10,75 |
| 5 A IND. | 41,86 | 38,92 | -4,02 |
| SILICA FUME | -14,00 | -1,96 | -8,21 |

Tab. 5.6 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N, alle varie stagionature

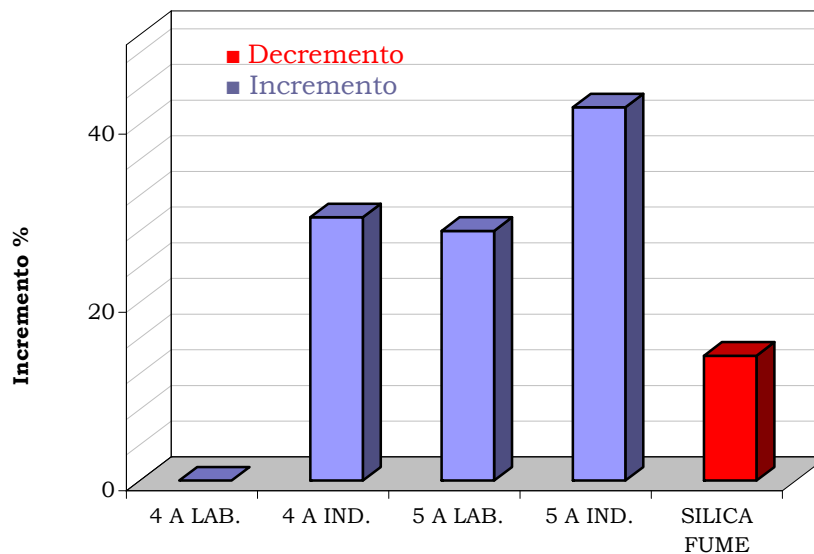


Fig. 5.10 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 2 giorni, realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N.

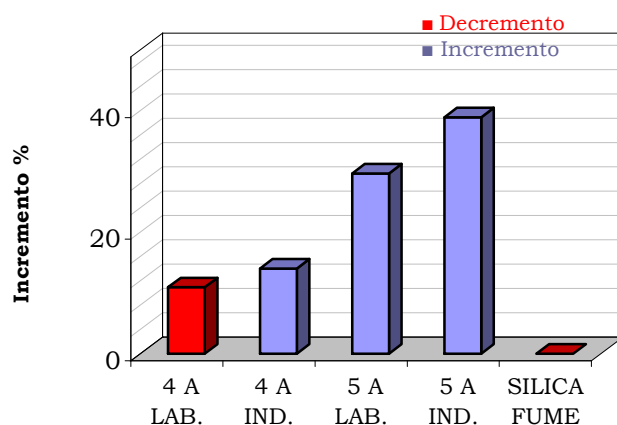


Fig. 5.11 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 7 giorni, realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N.

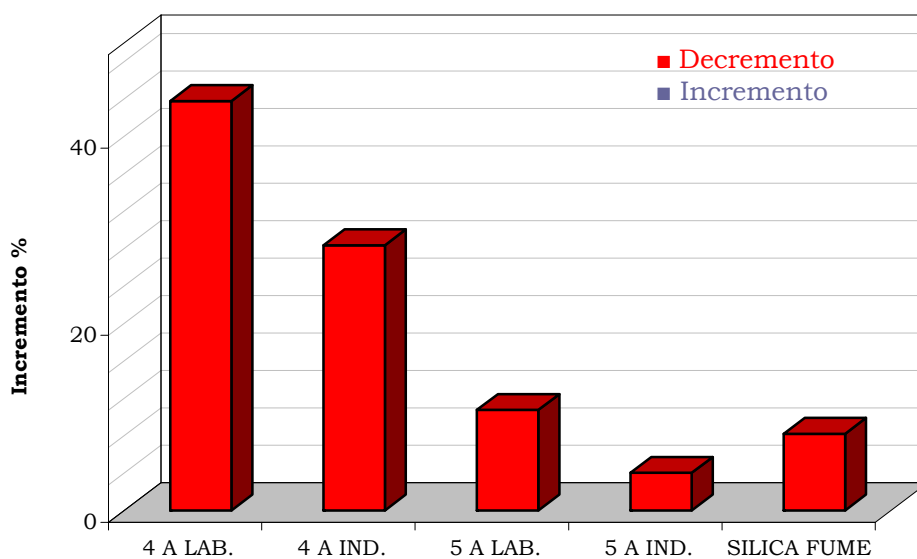


Fig. 5.12 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di malta, stagionati a 28 giorni, realizzati con il 90% di CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie sostituzioni, rispetto ai provini realizzati con il 100% di CEM III/A 42,5 N.

Il terzo tipo di legante adoperato è un cemento d'altoforno che è caratterizzato da una lenta velocità di idratazione, rispetto ai due precedentemente trattati che presentano un'elevata resistenza a compressione iniziale. Si può così notare dalla tabella 5.5 che tale cemento parzialmente sostituito (10%) con le zeoliti 5A e con la 4A industriale mostra

caratteristiche di resistenza meccanica iniziali tipiche di un cemento a rapido indurimento. Alle lunghe stagionature con il 10% di 5A industriale i provini mostrano una resistenza meccanica a compressione simile ai provini confezionati con il solo CEM III/A 42,5 N. Si nota come l'effetto del 10% di silica fume non sia significativo.

E' da sottolineare che l'aggiunta della zeolite 5A migliora notevolmente il comportamento meccanico del cemento III/A, rendendolo paragonabile ad un cemento Portland, soprattutto alle brevi stagionature.

5.3.4 Valutazione dell'effetto delle zeoliti sulle resistenze a compressione

In questo paragrafo viene messa in evidenza come le varie sostituzioni zeolitiche influenzano positivamente il comportamento dei vari cementi.

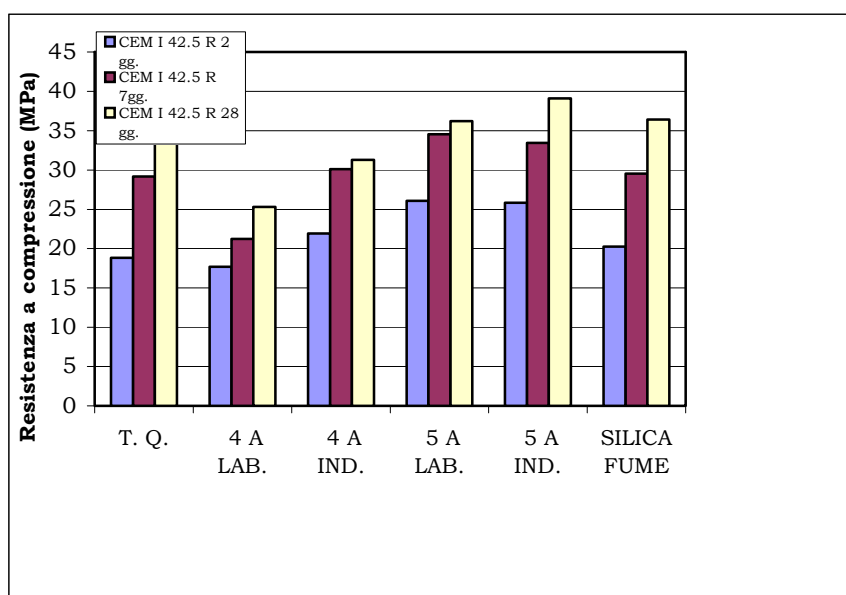


Fig. 5.13 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini confezionati con il CEM I 42,5 R a varie stagionature.

Dall'analisi degli istogrammi riportati nelle figure 5.13-5.14-5.15 si rileva che le malte realizzate con le zeoliti 5A esibiscono resistenze a compressione, sia alle brevi che alle lunghe stagionature, superiori a quelle ottenute con i provini realizzati con la silica fume, indipendentemente dal tipo di cemento utilizzato.

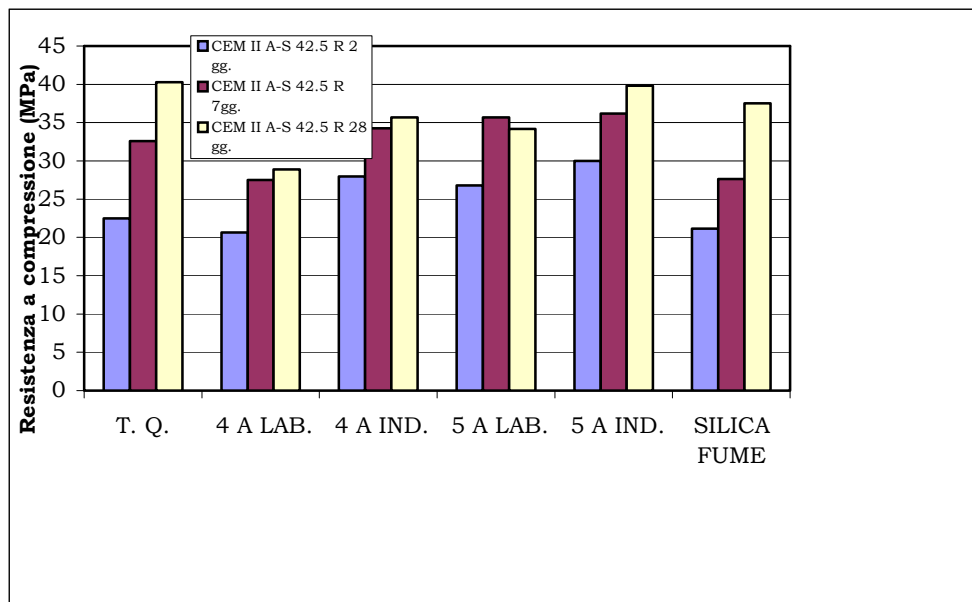


Fig. 5.14 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini confezionati con il CEM II/A-S 42,5 R a varie stagionature.

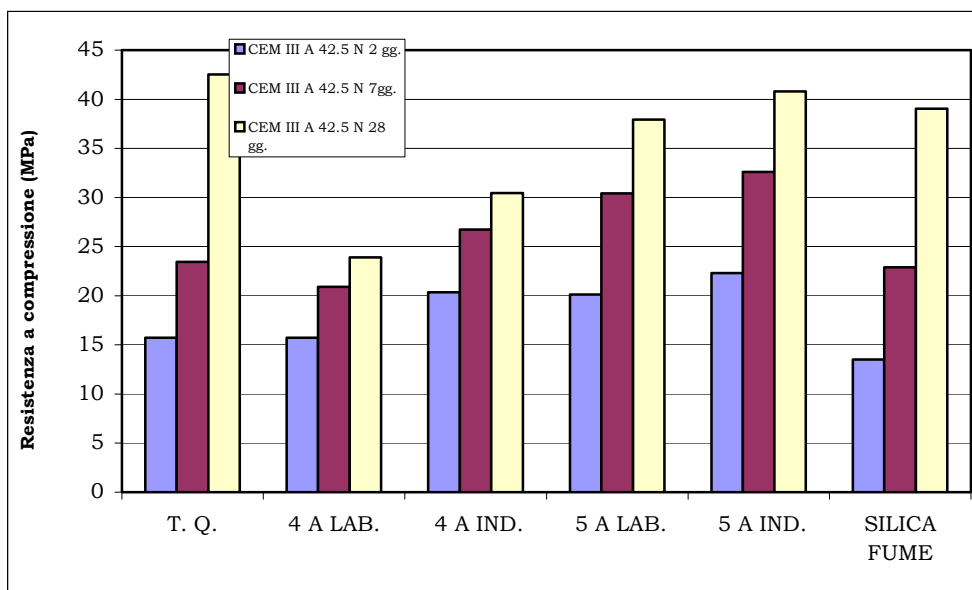


Fig. 5.15 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini confezionati con il CEM III/A 42,5 N a varie stagionature.

I provini confezionati con le zeoliti 5A hanno mostrato resistenze nettamente superiori, alle brevi stagionature, rispetto a quelli di malta realizzati con il solo cemento (T.Q.),

mentre alle lunghe stagionature si sono rilevate resistenze meccaniche a compressione leggermente inferiori.

Con il 10% di zeolite 5A e il 90% di CEM II/A-S 42,5 R, a 48 ore di stagionatura, i provini di malta hanno dato resistenze tipiche di un cemento 52,5.

Mentre con il 90% di CEM III/A 42,5 N ed il 10% di zeolite 5A, alle brevi stagionature, si sono ottenute resistenze simili al CEM II/A-S 42,5 R ed al CEM I 42,5 R.

5.4 Calcestruzzi HPC

Verificata l'efficacia delle zeoliti nella preparazione delle malte si è proceduto alla preparazione di calcestruzzi utilizzandole come aggiunte.

Le aggiunte zeolitiche, 10% in peso rispetto al cemento, sono state apportate nel confezionamento dei calcestruzzi con i tre tipi di leganti considerati:

- ✓ Cemento Portland: CEM I 42,5 R;
- ✓ Cemento di miscela: CEM II/A-S 42,5 R;
- ✓ Cemento d'altoforno: CEM III/A 42,5 N.

5.4.1 HPC con cemento Portland.

I calcestruzzi sono stati realizzati con la zeolite 5A (sintetizzata in laboratorio), avente dimensioni delle particelle inferiori al micron, con le zeoliti 4A e 5A (prodotte industrialmente) con dimensioni delle particelle da 1 a 5 micron, ciò al fine di verificare sia l'influenza delle dimensioni delle particelle che il tipo di zeolite sullo sviluppo delle caratteristiche meccaniche degli HPC.

Come termini di paragone sono stati realizzati calcestruzzi con l'aggiunta del 10% di silice fume (fornita dalla Mapei, commercialmente denominata "Mapeplast SF") e calcestruzzi senza nessun tipo di aggiunta per poter verificare e mettere a confronto le caratteristiche di resistenza a compressione.

5.4.1.1 Prove eseguite.

Sono stati realizzati provini in calcestruzzo 100x100x100 mm, dosati a 500 kg/m³ di cemento. Il rapporto acqua-cemento utilizzato è stato pari a 0,35. Sono stati utilizzati aggregati alluvionali tondeggianti del diametro massimo inferiore ai 16 mm. Le aggiunte delle diverse zeoliti e della silice fume sono state sempre del 10 % rispetto al peso del

cemento. In tutti i calcestruzzi è stato aggiunto l'1% di superfluidificante SP1, fornito dalla Mapei.

Sui provini è stata valutata la resistenza a compressione a 2, 7 e 28 giorni e la lavorabilità sul calcestruzzo fresco. Termine di paragone sono stati calcestruzzi realizzati con uguale aggiunta in peso di silica fume commerciale, e calcestruzzi realizzati con solo cemento.

- Lavorabilità.

Nessuno dei metodi di prova proposti od in uso per la misura della consistenza è pienamente soddisfacente e le proprietà del calcestruzzo fresco che vengono prese ad indice della sua lavorabilità sono diverse da metodo a metodo. Pertanto, in generale la massima sensibilità di ogni metodo riguarda campi differenti di lavorabilità, e, a seconda del tipo di opera e delle condizioni di getto, va scelto il metodo più appropriato di controllo del grado di consistenza.

I metodi di misura della consistenza più largamente adottati sono i seguenti:

- abbassamento al cono (UNI 9418)
- prova Vébé (UNI 9419)
- indice di compattabilità (UNI 9420)
- spandimento (UNI 8020 - Metodo B).

Su tali metodi è basata la classificazione del calcestruzzo in funzione della consistenza (Tab. 5.7 - 5.10).

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

Tab. 5.7 - Classi di consistenza mediante la misura dell'abbassamento al cono richiesta per alcune tipologie strutturali (UNI 9418).

| Classe di consistenza | Tempo Vébés |
|-----------------------|-------------|
| V0 | ≥ 31 |
| V1 | da 30 a 21 |
| V2 | da 20 a 11 |
| V3 | da 10 a 6 |
| V4 | da 5 a 3 |

Tab. 5.8 - Classi di consistenza mediante il metodo Vébé (UNI 9419).

| Classe di consistenza | Indice di compattabilità |
|-----------------------|--------------------------|
| C0 | $\geq 1,46$ |
| C1 | da 1,45 a 1,26 |
| C2 | da 1,25 a 1,11 |
| C3 | da 1,10 a 1,04 |

Tab. 5.9 - Classi di consistenza mediante la misura della compattabilità (UNI 9420).

| Classe di consistenza | Spandimento mm |
|-----------------------|----------------|
| FB1 | ≤ 340 |
| FB2 | da 350 a 410 |
| FB3 | da 420 a 480 |
| FB4 | da 490 a 550 |
| FB5 | 560-620 |
| FB6 | ≥ 630 |

Tab. 5.10 - Classi di consistenza mediante la misura dello spandimento (UNI 8020 - Metodo B).

Il metodo di misura più diffuso per la valutazione della lavorabilità, universalmente più utilizzato per la sua semplicità, è quello che propone la valutazione della consistenza mediante la misura dell'abbassamento al cono, slump test.

Questo consiste nel misurare l'abbassamento, slump, del calcestruzzo sformato da un tronco di cono metallico, cono di Abrams, rispetto all'altezza dello stesso calcestruzzo costipato in modo standardizzato.

Lo stampo deve avere la forma di tronco di cono cavo con le seguenti dimensioni interne:

- diametro della base inferiore (200 ± 2) mm;
- diametro della base superiore (100 ± 2) mm;
- altezza (300 ± 2) mm.

Le basi inferiore e superiore sono aperte e formano angoli retti con l'asse del cono. Per facilitarne lo sfilamento dal provino, lo stampo deve essere provvisto di due maniglie, poste a $2/3$ dell'altezza, nella parte superiore. Per poter tenere fermo lo stampo, questo deve essere munito, nella parte inferiore, di ganci di fissaggio alla piastra di base oppure di staffe sulle quali appoggiare i piedi. Lo sblocco degli eventuali ganci di fissaggio deve avvenire senza che si determini alcun movimento dello stampo stesso.

Si hanno tre principali forme di abbassamento, come indicato in figura 5.16.

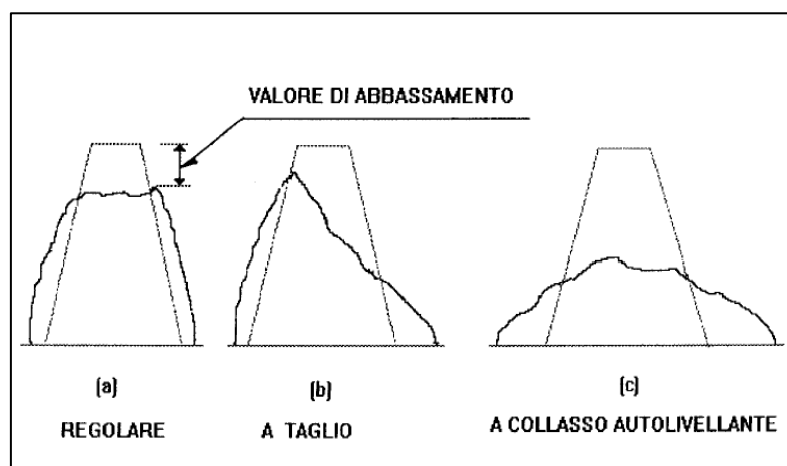


Fig. 5.16 - Forme di abbassamento al cono.

La prima forma, con abbassamento uniforme, senza alcuna rottura della massa, indica comportamento regolare.

La seconda con abbassamento asimmetrico (a taglio) spesso indica mancanza di coesione; essa tende a manifestarsi con miscele tendenti alla segregazione. In caso di riproducibilità dell'abbassamento asimmetrico ripetendo la prova, il calcestruzzo è da ritenere inidoneo al getto.

La terza, con abbassamento generalizzato (collasso), indica miscele magre oppure molto umide o calcestruzzi autolivellanti, additivati con superfluidificanti.

- Resistenza a compressione.

Le prove di resistenza a compressione sono state effettuate sui provini confezionati e stagionati, in accordo alla normativa vigente; sono stati sformati dopo 24 ore e successivamente stagionati sino alla scadenza di prova a 20 °C ed U.R. > 95%.

- Curva carico – spostamento.

Le prove di resistenza a compressione sono state effettuate utilizzando una macchina di prova di tipo elettroidraulico dotata di un apparato di comando elettronico che consente di condurre le prove in controllo di forza o di spostamento o di deformazione. E' possibile infatti selezionare la grandezza di controllo e regolare la legge di variazione della stessa in relazione alle esigenze sperimentali. La macchina è gestita da un software applicativo per mezzo di un computer. Il diagramma forza – spostamento è direttamente riportato sul monitor e memorizzato su file.

5.4.1.2 Lavorabilità.

Nella tabella 5.11 e nella figura 5.17 sono riportati i risultati della lavorabilità dei calcestruzzi come abbassamento al cono “slump test”.

| | CEM I (T.Q.) | 4A IND. (10%) | 5A IND. (10%) | 5A LAB. (10%) | SILICA FUME (10%) |
|------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| SLUMP (cm) | 19,0 | 1,5 | 16,0 | 18,0 | 14,0 |

Tab. 5.11 – Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM I 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta.

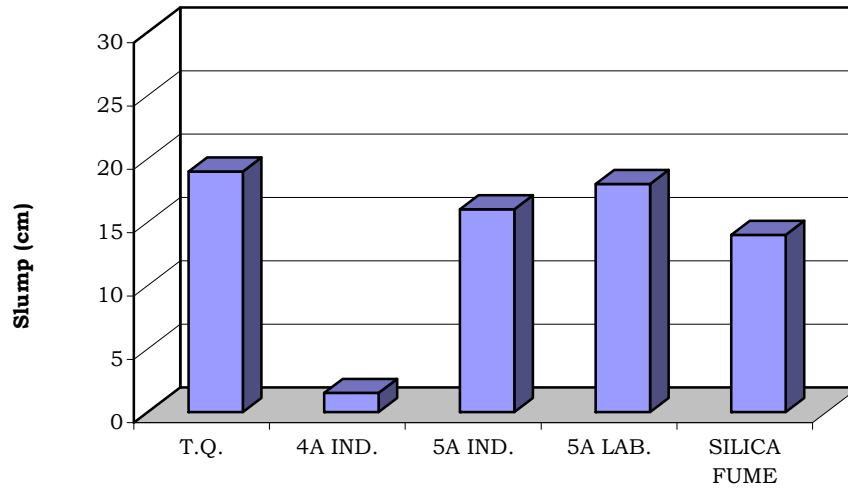


Fig. 5.17 - Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM I 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta.

Si denota come le zeoliti 5A abbiano una maggiore lavorabilità, rispetto alla silice fume.



Fig. 5.18 - Lavorabilità dell'impasto di calcestruzzo realizzato con il CEM I 42,5 R senza aggiunta (T.Q.)

5.4.1.3 Resistenza a compressione.

Nella tabella 5.12 sono riportati i valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo ottenuti con le varie aggiunte e stagionati a 2, 7 e 28 giorni.

| Cemento | Aggiunta (10%) | R _c (MPa) | | |
|---------|-------------------|----------------------|------|-------|
| | | 2 gg | 7 gg | 28 gg |
| CEM I | - | 36,4 | 47,7 | 56,2 |
| CEM I | ZEOLITE 4A IND. | 34,7 | 39,7 | 46,3 |
| CEM I | ZEOLITE 5A LAB. | 48,0 | 57,7 | 67,4 |
| CEM I | ZEOLITE 5A IND. | 40,0 | 57,2 | 65,8 |
| CEM I | SILICA FUME | 40,5 | 51,4 | 62,6 |

Tab. 5.12 - Resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte.

I valori delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo sono diagrammati in fig.5.19.

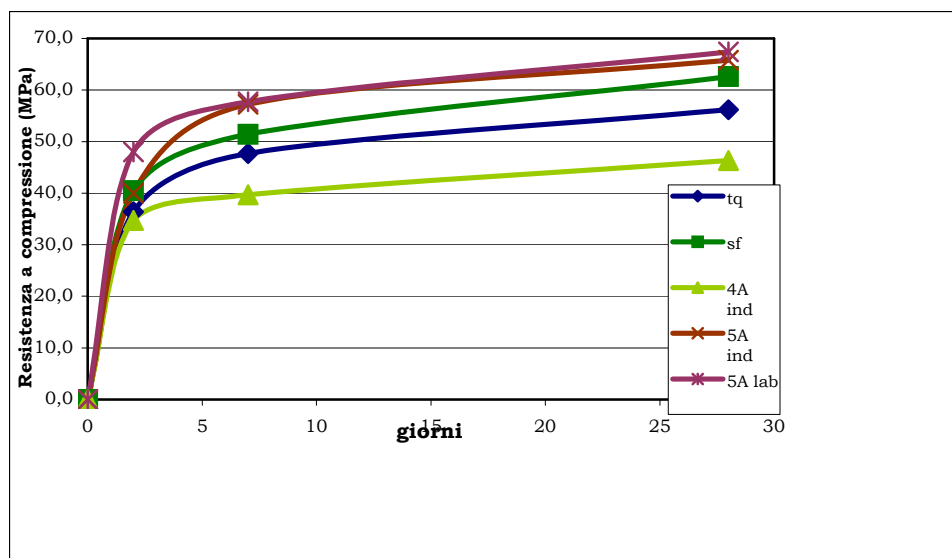


Fig. 5.19 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte.

| AGGIUNTA (10%) | CEM I 42.5 R | | |
|-------------------|--------------|--------|--------|
| | 2 gg. | 7gg. | 28 gg. |
| 4 A IND. | -4,48 | -16,82 | -17,62 |
| 5 A LAB. | 31,84 | 20,78 | 19,93 |
| 5 A IND. | 9,98 | 19,82 | 17,08 |
| SILICA FUME | 11,38 | 7,76 | 11,39 |

Gli incrementi percentuali delle resistenze a compressione, dei provini di calcestruzzo, rispetto a quelli realizzati con il solo CEM I 42,5 R, alle varie stagionature, sono riportati in tabella 5.13 e diagrammati nelle figure 5.20 – 5.21 – 5.22.

Tab. 5.13 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R, alle varie stagionature.

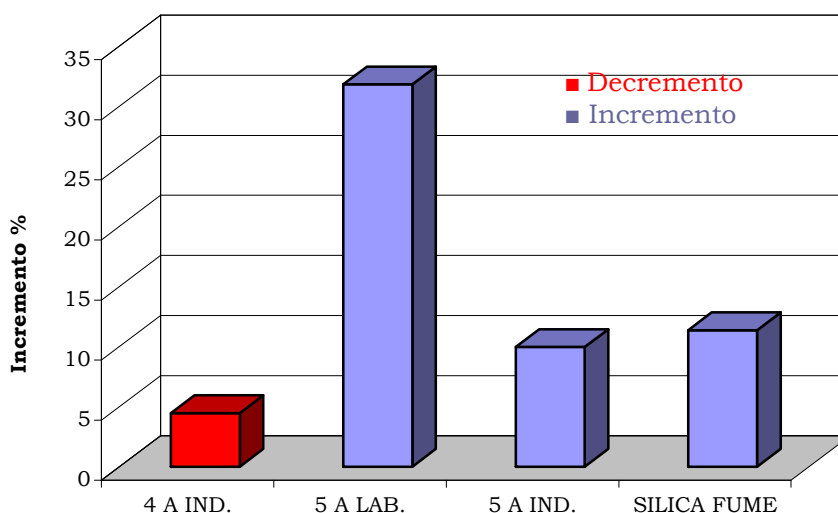


Fig. 5.20 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 2 giorni, realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R.

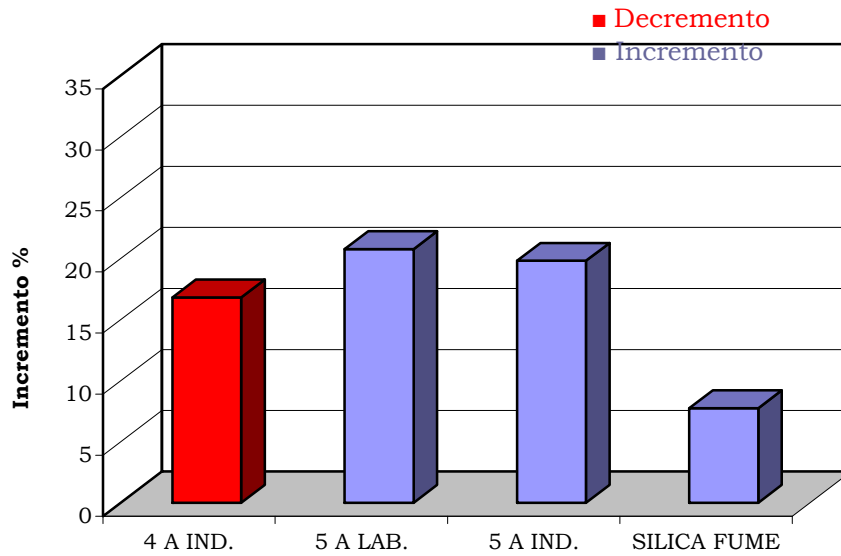


Fig. 5.21 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 7 giorni, realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R.

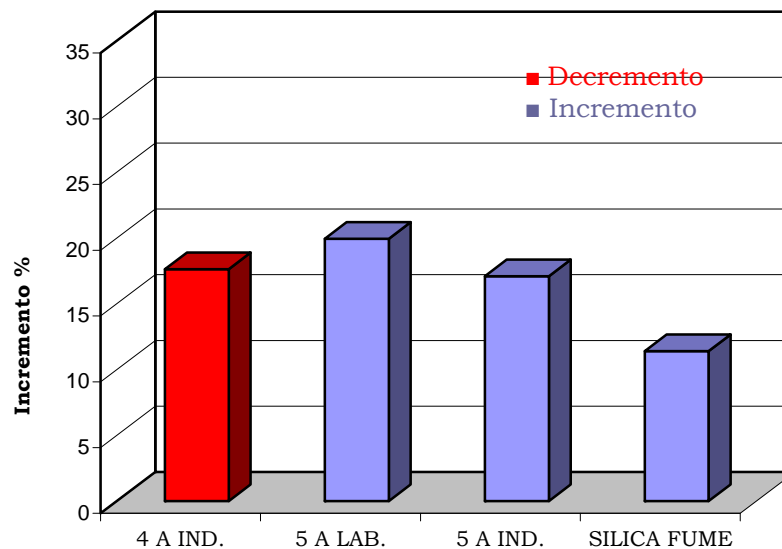


Fig. 5.22 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 28 giorni, realizzati con il CEM I 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM I 42,5 R.

Si rileva, confrontando i risultati delle resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con le zeoliti 5A, che non vi sono apprezzabili differenze legate alla dimensione delle particelle di zeolite, probabilmente a rapporti a/c pari a 0,35 prevale più l'effetto pozzolanico che il particle packing.

In particolare alle brevi stagionature si nota un maggiore incremento di resistenza imputabile ad un effetto accelerante della zeolite.



Fig. 5.23 - Provino di calcestruzzo realizzato con CEM I 42,5 R ed il 10% di aggiunta di zeolite 5A industriale, dopo rottura a 28 giorni.

5.4.1.4 Curve carico – spostamento.

Nelle figure 5.24 – 5.28 sono riportate le curve carico – spostamento delle prove di compressione.

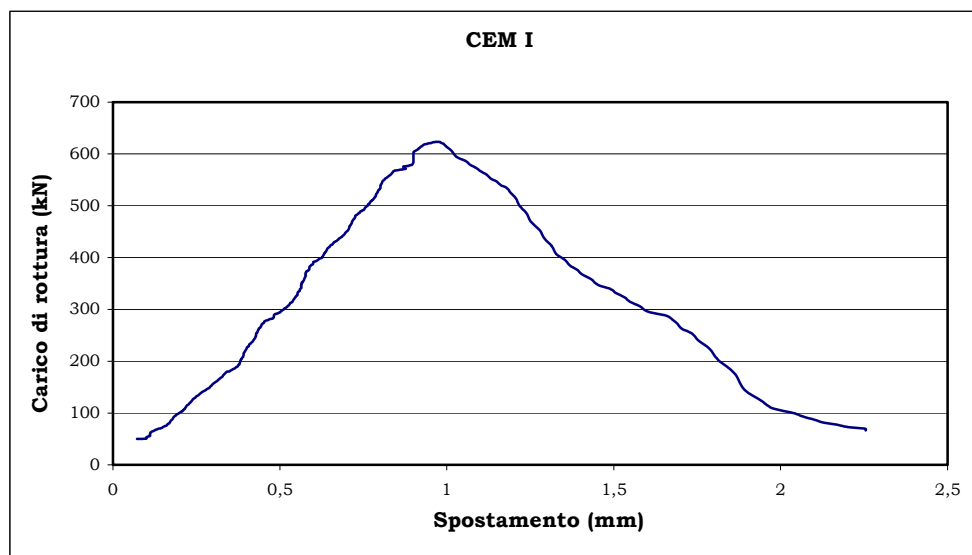


Fig. 5.24 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R (T.Q.).

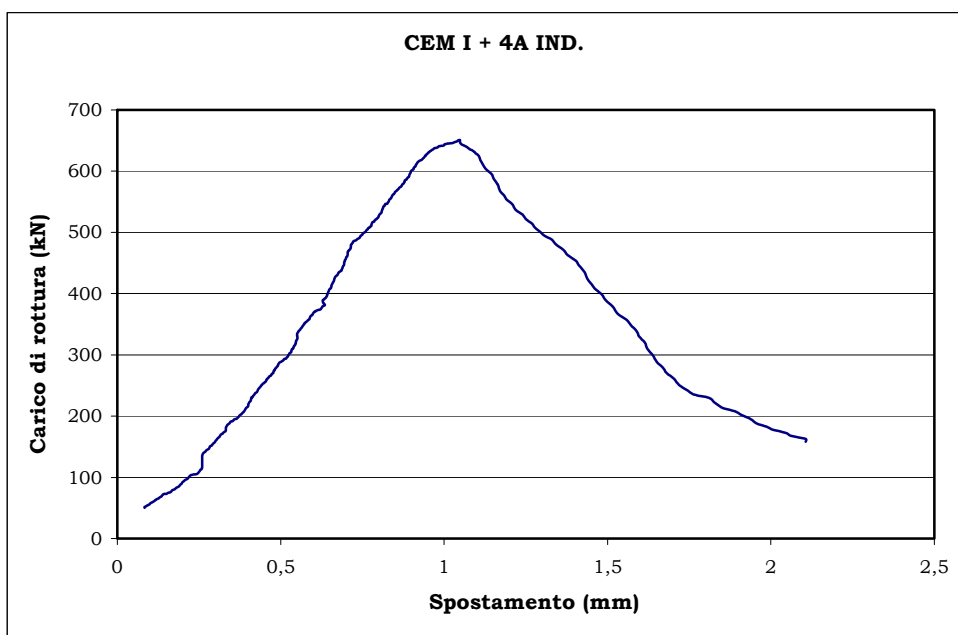


Fig. 5.25 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + 4A IND.

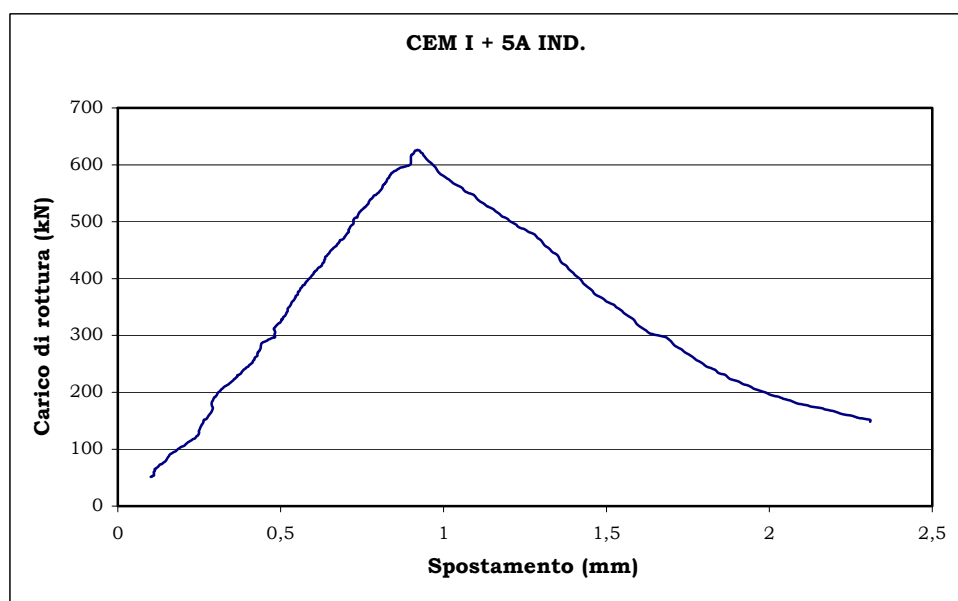


Fig. 5.26 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + 5A IND.

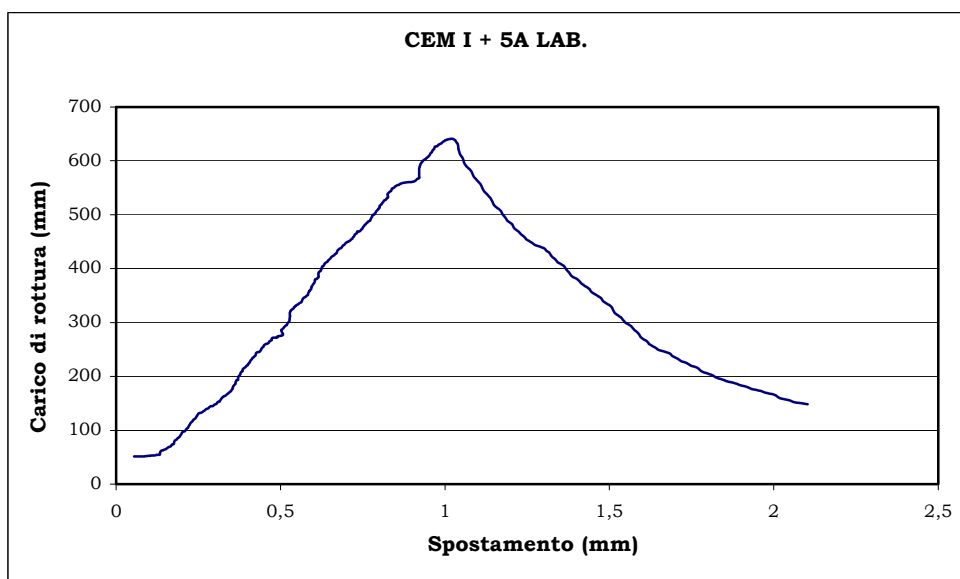


Fig. 5.27 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + 5A LAB.

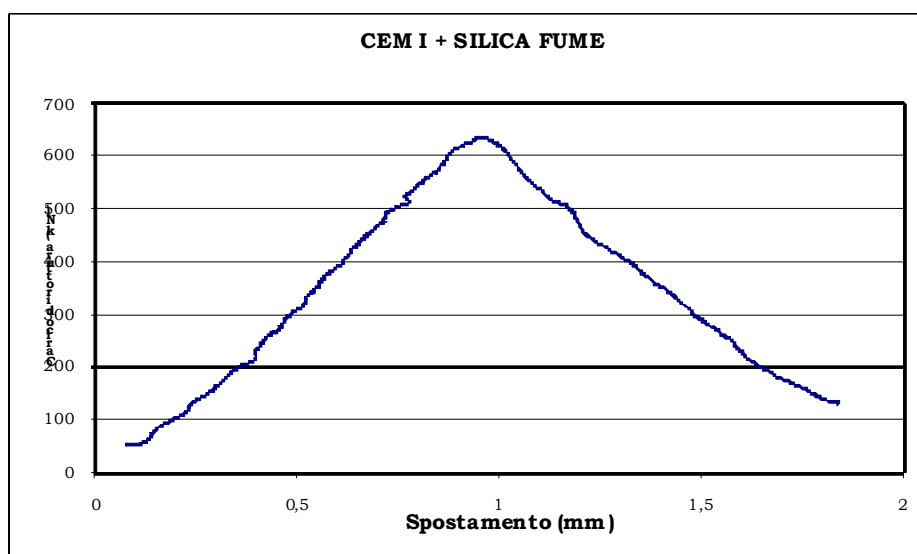


Fig. 5.28 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM I 42,5 R + Silica fume.

5.4.2 HPC con cemento Portland alla loppa.

Dopo aver utilizzato il cemento Portland, si è proceduto alla preparazione delle miscele utilizzando un cemento Portland con un basso contenuto di loppa (CEM II/A-S 42,5 R) per la produzione di calcestruzzi HPC.

Sono state utilizzate le stesse aggiunte considerate prima in modo da poter confrontare i risultati conseguiti.

5.4.2.1 Prove eseguite.

Sono stati realizzati provini in calcestruzzo 100x100x100 mm, dosati a 500 kg/m³ di cemento utilizzando un rapporto acqua-cemento $a/c = 0,35$. Negli impasti sono stati utilizzati gli stessi aggregati considerati in precedenza con diametro massimo inferiore ai 16 mm. Le aggiunte delle diverse zeoliti e della silica fume sono state sempre del 10 % rispetto al peso del cemento. Il superfluidificante SP1 aggiunto è stato dell'1% in peso in tutte le miscele.

Sui provini confezionati è stata valutata la resistenza a compressione a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura e la lavorabilità del calcestruzzo fresco.

Termine di paragone sono stati i calcestruzzi realizzati senza aggiunta e quelli confezionati con il 10% di silica fume commerciale.

5.4.2.2 Lavorabilità.

Dall'istogramma riportato in Fig. 5.29 si nota una maggiore lavorabilità degli impasti effettuati con la zeolite 5A. In particolare con la zeolite 5A di laboratorio l'impasto si è dimostrato più lavorabile sia di quello con la silica fume che di quello con il solo CEM II/A-S 42,5 R.

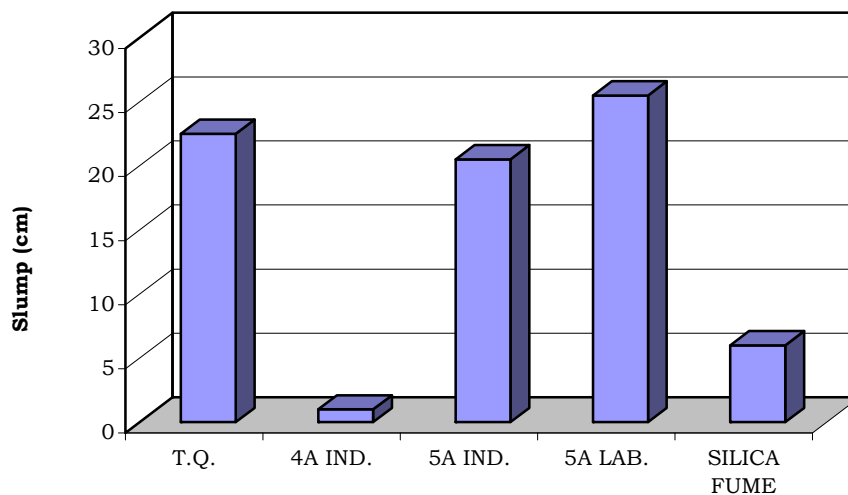


Fig. 5.29 - Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta.

Successivamente si è osservato che ad una maggiore lavorabilità si è avuta una maggiore resistenza meccanica a compressione (Tab.5.15).

| | CEM II (T.Q.) | 4A IND. (10%) | 5A IND. (10%) | 5A LAB. (10%) | SILICA FUME (10%) |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| SLUMP (cm) | 22,5 | 1,0 | 20,5 | 25,5 | 6,0 |

Tab. 5.14 – Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta.

5.4.2.3 Resistenza a compressione

Nella tabella 5.15 sono riportate le resistenze meccaniche a compressione dei provini realizzati con le varie miscele, a diversi tempi di stagionatura.

| Cemento | Aggiunta (10%) | R _c (MPa) 2 gg | R _c (MPa) 7 gg | R _c (MPa) 28 gg |
|---------|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| CEM II | - | 40,6 | 52,6 | 62,1 |
| CEM II | ZEOLITE 4A IND. | 38,1 | 48,8 | 55,0 |
| CEM II | ZEOLITE 5A LAB. | 47,2 | 56,7 | 63,2 |
| CEM II | ZEOLITE 5A IND. | 46,5 | 54,6 | 62,3 |
| CEM II | SILICA FUME | 44,1 | 58,0 | 67,3 |

Tab. 5.15 - Resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte.

L'andamento delle resistenze meccaniche a compressione è riportato in Fig. 5.30.

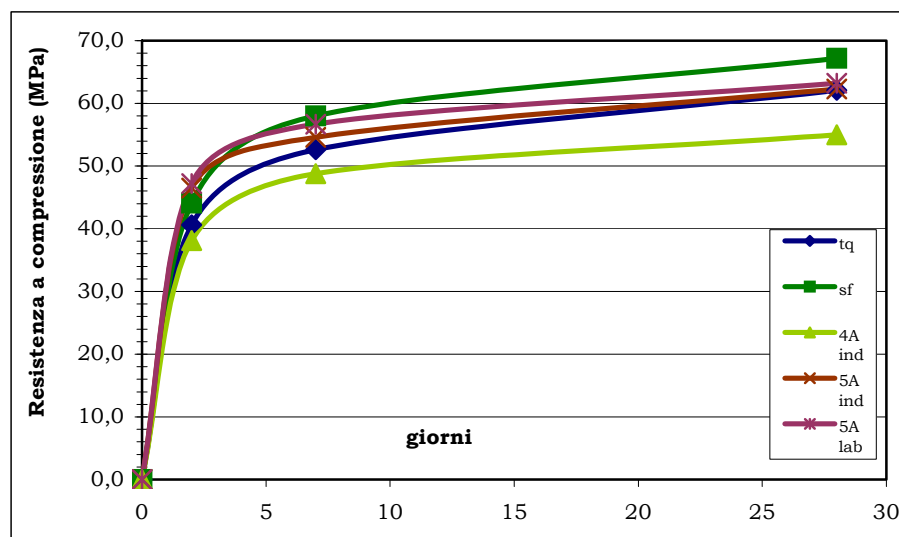


Fig. 5.30 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R ed il 10% delle varie aggiunte.

Gli incrementi percentuali delle resistenze meccaniche a compressione dei provini, alle varie stagionature sono riportati negli istogrammi di fig. 5.31 – 5.32 – 5.33.

| AGGIUNTA (10%) | CEM II/A-S 42.5 R | | |
|-------------------|-------------------|-------|--------|
| | 2 gg. | 7gg. | 28 gg. |
| 4 A IND. | -6,11 | -7,30 | -11,43 |
| 5 A LAB. | 16,08 | 7,73 | 1,77 |
| 5 A IND. | 14,57 | 3,80 | 0,32 |
| SILICA FUME | 8,52 | 10,28 | 8,37 |

Tab. 5.16 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R, alle varie stagionature.

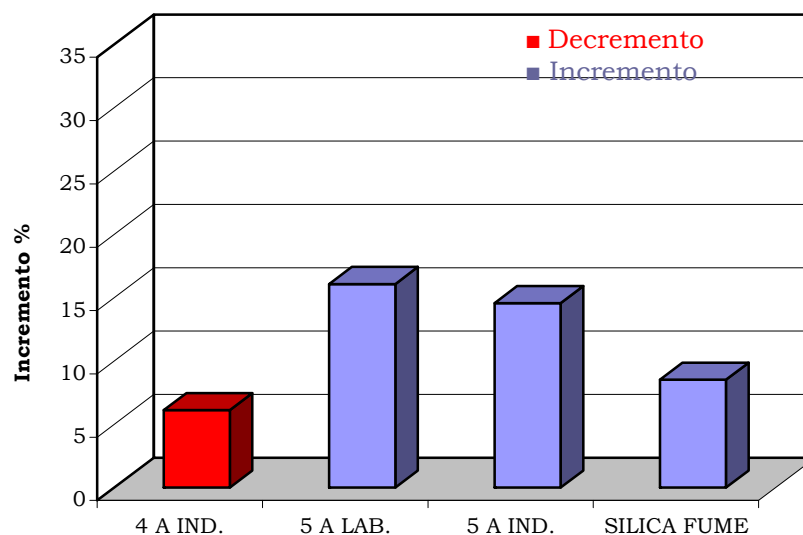


Fig. 5.31 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 2 giorni, realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R.

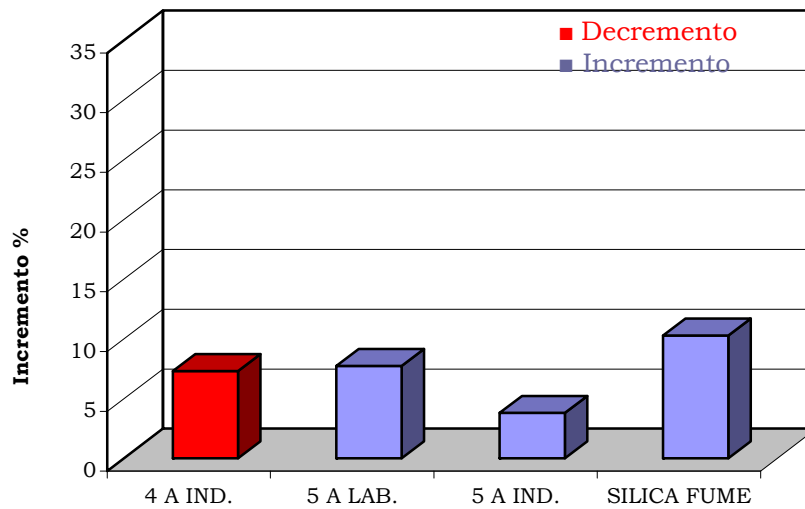


Fig. 5.32 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 7 giorni, realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R.

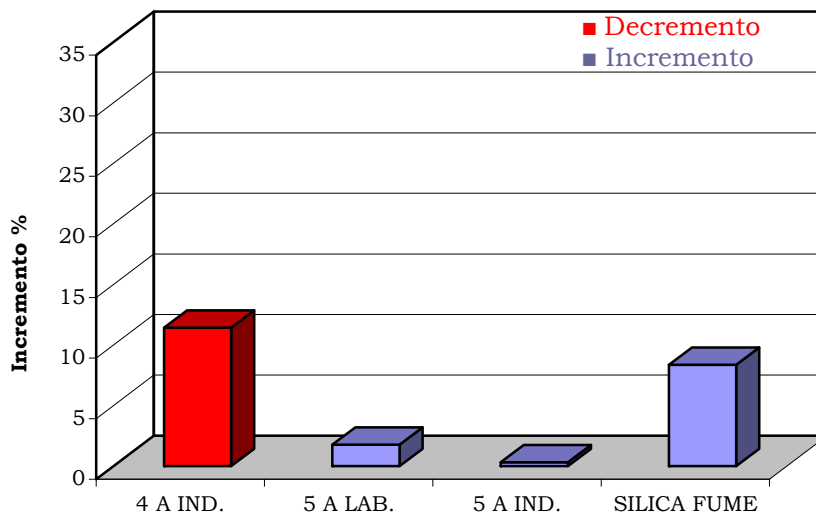


Fig. 5.33 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 28 giorni, realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R.

La maggiore finezza del CEM II utilizzato comporta una maggiore resistenza meccanica dei provini confezionati senza aggiunte.

Alle brevi stagionature si nota l'effetto positivo dell'aggiunta delle zeoliti 5A, mentre alle lunghe stagionature si raggiungono resistenze a compressione leggermente superiori con le aggiunte più fini, cioè con la silica fume (Neville, 1995).

5.4.2.4 Curve carico – spostamento.

Sono riportate nelle figure 5.34 – 5.38 le curve carico – spostamento delle prove di compressione.

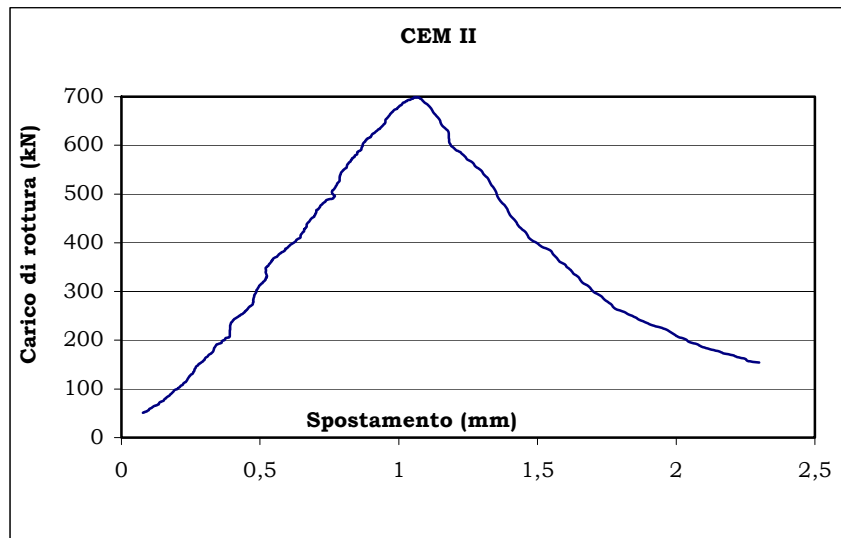


Fig. 5.34 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R (T.Q.).

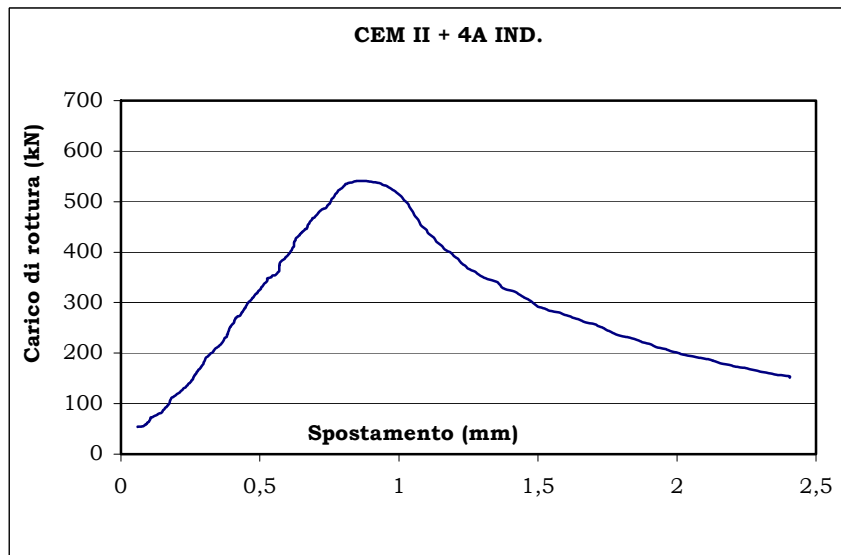


Fig. 5.35 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + 4A IND.

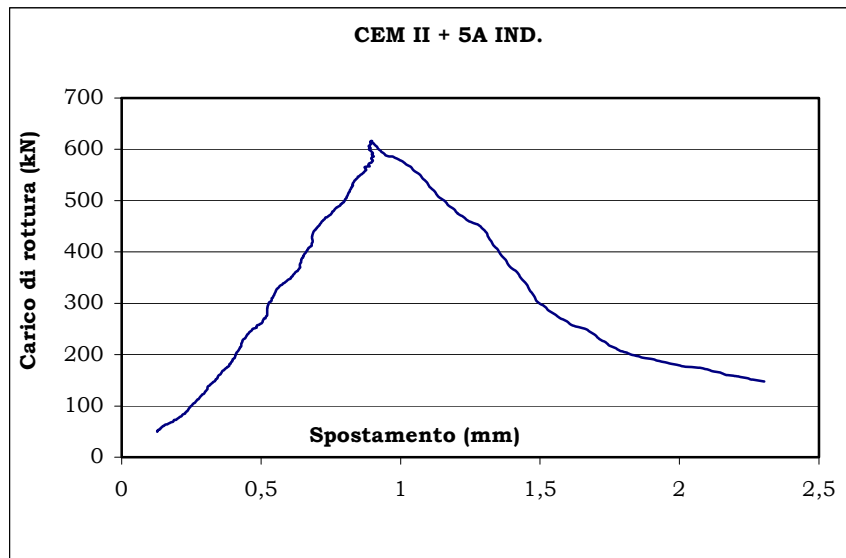


Fig. 5.36 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + 5A IND.

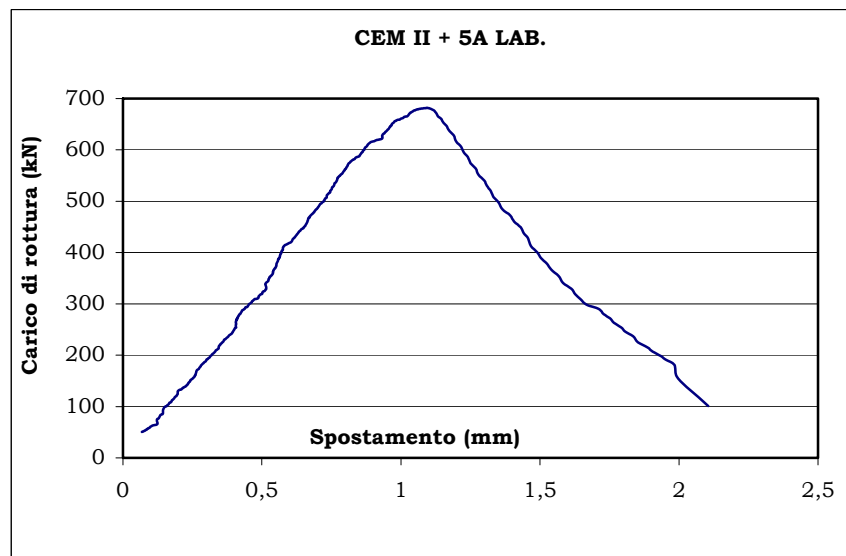


Fig. 5.37 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + 5A LAB.

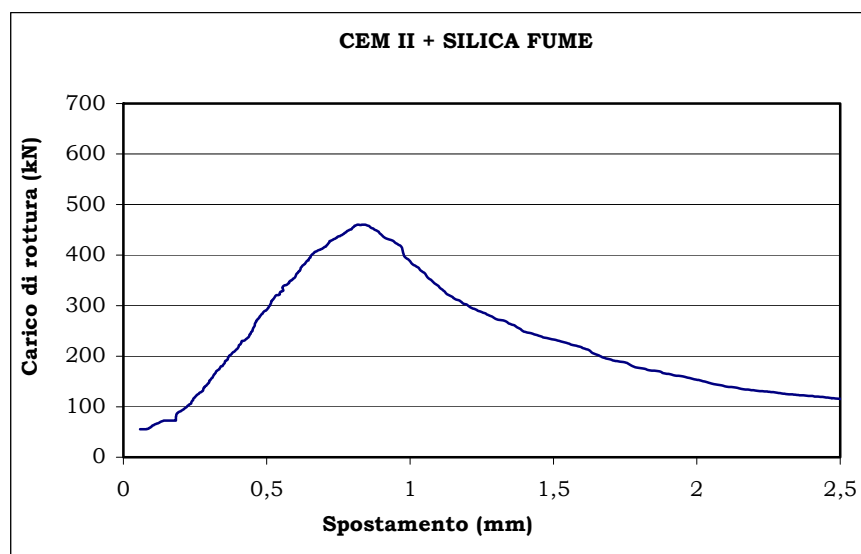


Fig. 5.38 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM II/A-S 42,5 R + Silica fume.

5.4.3 HPC con cemento d’altoforno.

I calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC) presentano elevate caratteristiche di durabilità e di resistenze meccaniche a medio-lunghe stagionature.

In letteratura è, a tal proposito, consigliato un cemento tipo Portland con elevato contenuto di C_2S , per ottenere elevati incrementi di resistenza meccanica, a lungo termine, e basso contenuto di C_3A , per salvaguardare la durabilità (Neville, 1995). D’altronde, quest’ultimo aspetto comporta un non sufficiente contrasto alla penetrazione dello ione cloro nel calcestruzzo e l’eventuale conseguente degrado.

Si è pertanto pensato di utilizzare un cemento d’altoforno, ad elevato contenuto di loppa, così da ottenere sia elevate resistenze meccaniche finali, sia elevata durabilità verso tutti gli agenti aggressivi, compresa la formazione di una barriera protettiva alla penetrazione dei cloruri.

Tenendo presente che precedenti studi avevano evidenziato come i cementi ricchi in loppa d’altoforno fossero positivamente influenzati nelle resistenze a medio e lungo termine dalla presenza di alcali (Frigione et al., 1985) e sfruttando i risultati ottenuti con cemento Portland, si è pensato di preparare HPC utilizzando cementi a medio contenuto di loppa (Tipo III/A 42,5 N UNI-EN 197/1) aggiungendo alla miscela del calcestruzzo, in luogo della silica fume, un materiale ad elevata area superficiale specifica, tipo le zeoliti,

ma avente anche un quantitativo ottimale di alcali, così da incrementare ulteriormente l'attivazione della loppa.

I calcestruzzi preparati sono stati caratterizzati sia con prove di lavorabilità che con prove meccaniche.

5.4.3.1 Prove eseguite.

Sono stati realizzati provini in calcestruzzo 100x100x100 mm, dosati a 500 kg/m³ di cemento CEM III/A 42,5 N, utilizzando un rapporto a/c = 0,35 e aggregati alluvionali con diametro massimo inferiore a 16 mm. Le aggiunte delle diverse zeoliti e della silica fume sono state sempre del 10 % rispetto al peso del cemento. In tutti i calcestruzzi è stato aggiunto l'1% di superfluidificante SP1.

Su tali provini è stata valutata la resistenza a compressione e la lavorabilità del calcestruzzo fresco.

Termine di paragone sono stati calcestruzzi realizzati con uguale aggiunta di silica fume e calcestruzzi senza alcuna aggiunta.

5.4.3.2 Lavorabilità.

Per gli impasti realizzati solo con CEM III/A 42,5 N è stata eseguita, come sugli altri calcestruzzi la prova di abbassamento al cono (slump test). La miscela più lavorabile è stata quella realizzata con l'aggiunta di zeolite 5A industriale, seguita da quella realizzata con il solo CEM III/A 42,5 N.

Come già visto in precedenza (cfr.5.3.2.2) alla migliore lavorabilità corrisponde una migliore resistenza meccanica a compressione.

In figura 5.39 si riportano le lavorabilità dei calcestruzzi ottenuti sia con le varie aggiunte che con il solo CEM III/A 42,5 N.

| | CEM III (T.Q.) | 4A IND. (10%) | 5A IND. (10%) | 5A LAB. (10%) | SILICA FUME (10%) |
|------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| SLUMP (cm) | 22,0 | 1,0 | 24,0 | 20,0 | 12,5 |

Tab. 5.17 – Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM III/A 42,5 N ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta.

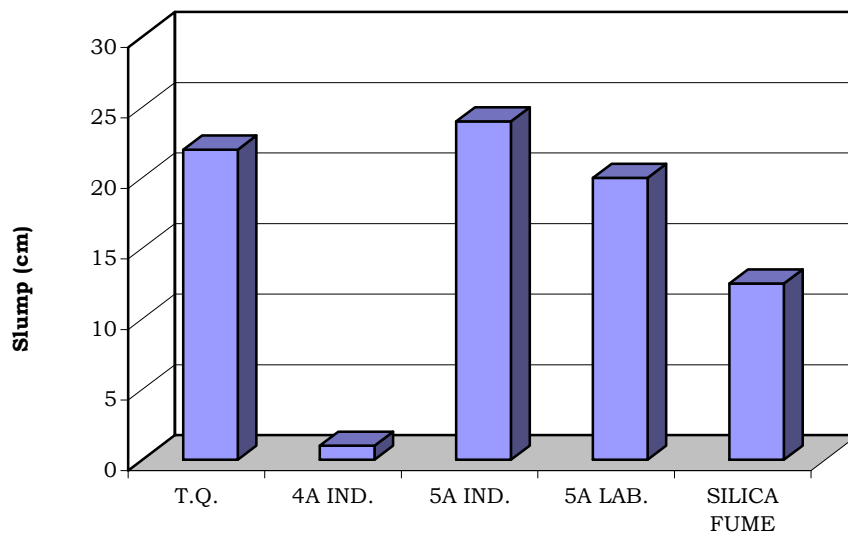


Fig. 5.39 - Lavorabilità degli impasti realizzati con CEM III/A 42,5 N ed il 10% dei diversi tipi di aggiunta.

5.4.3.3 Resistenza a compressione.

Nella tabella 5.18 e nella figura 5.40 sono riportate le resistenze meccaniche a compressione dei provini realizzati con le varie miscele, a diversi tempi di stagionatura.

| Cemento | Aggiunta (10%) | R _c (MPa) 2 gg | R _c (MPa) 7 gg | R _c (MPa) 28 gg |
|---------|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| CEM III | - | 27,5 | 40,7 | 58,0 |
| CEM III | ZEOLITE 4A IND. | 32,8 | 40,6 | 47,0 |
| CEM III | ZEOLITE 5A LAB. | 35,3 | 48,7 | 63,5 |
| CEM III | ZEOLITE 5A IND. | 29,0 | 50,8 | 63,9 |
| CEM III | SILICA FUME | 29,4 | 44,2 | 65,1 |

Tab. 5.18 - Resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM III/A 42,5 N ed il 10% delle varie aggiunte.

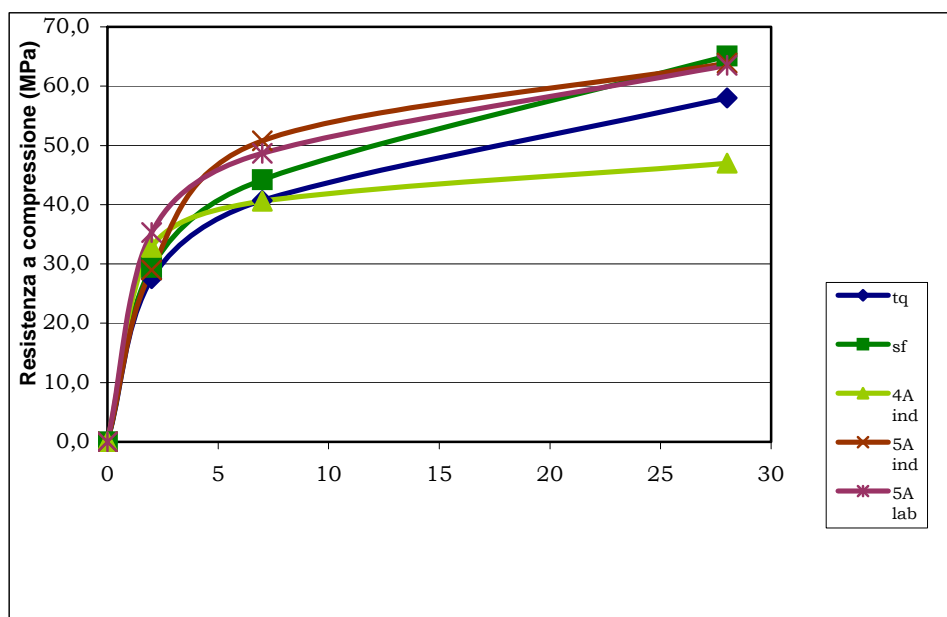


Fig. 5.40 - Resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM III/A 42,5 N ed il 10% delle varie aggiunte.

Gli incrementi di resistenza meccanica, rispetto ai provini realizzati con il solo CEM III/A 42,5 N, sono riportati negli istogrammi delle fig.5.41-5.42-5.43.

| AGGIUNTA (10%) | CEM III/A 42.5 N | | |
|-------------------|------------------|-------|--------|
| | 2 gg. | 7gg. | 28 gg. |
| 4 A IND. | 19,22 | - | -18,96 |
| 5 A LAB. | 28,42 | 19,83 | 9,48 |
| 5 A IND. | 5,52 | 25,02 | 10,17 |
| SILICA FUME | 6,76 | 8,63 | 12,24 |

Tab. 5.19 – Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N, alle varie stagionature.

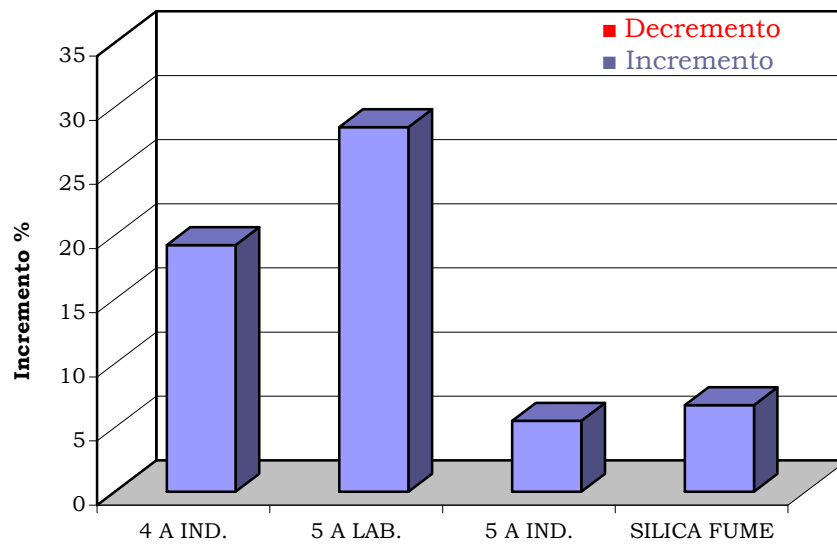


Fig. 5.41 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 2 giorni, realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N.

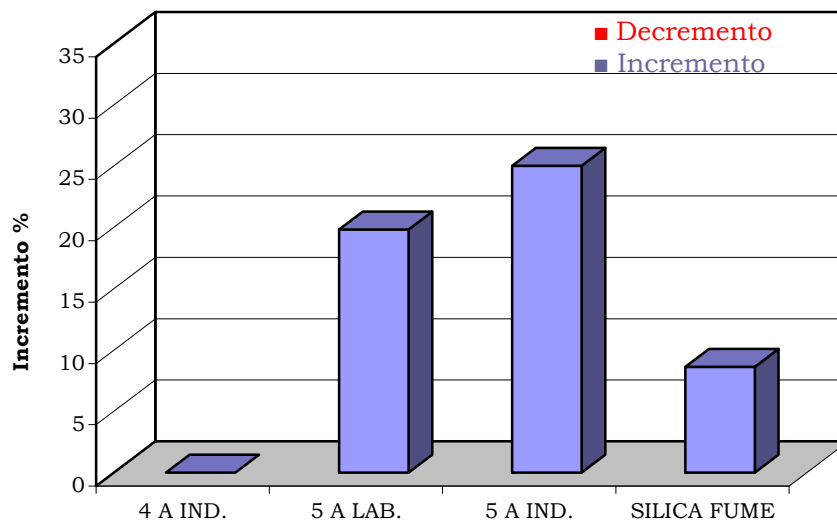


Fig. 5.42 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 7 giorni, realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N.

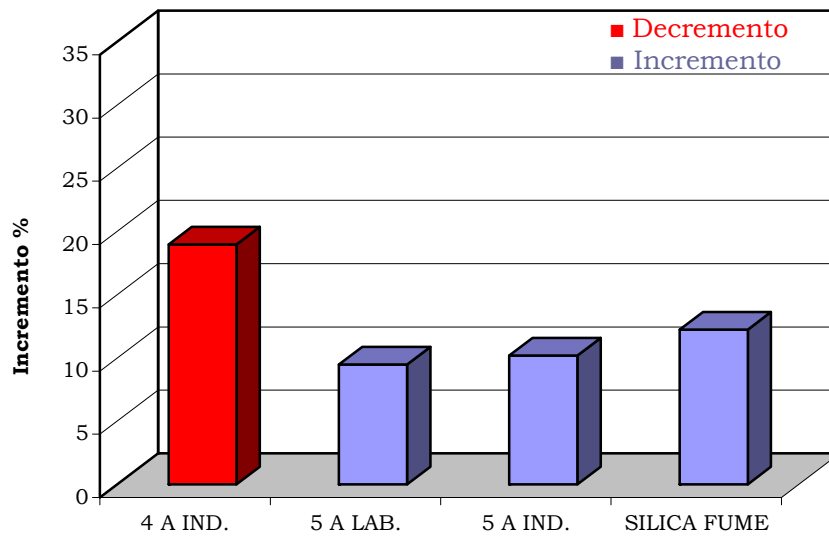


Fig. 5.43 - Incremento percentuale delle resistenze meccaniche a compressione dei provini di cls, stagionati a 28 giorni, realizzati con il CEM III/A 42,5 N e il 10% delle varie aggiunte, rispetto ai provini di cls realizzati con il CEM III/A 42,5 N.

Si denota un ottimo comportamento di tutte le zeoliti alle brevi stagionature. Alle lunghe stagionature l'effetto della zeolite 5A è molto simile a quello ottenuto con la silica fume. Le maggiori differenze ottenute alle brevi stagionature sono attribuibili oltre alle dimensioni delle particelle anche al contenuto di alcali responsabile dell'attivazione della loppa.

5.4.3.4 Curve carico – spostamento.

Sono riportate nelle figure 5.44 – 5.48 le curve carico – spostamento delle prove di compressione.

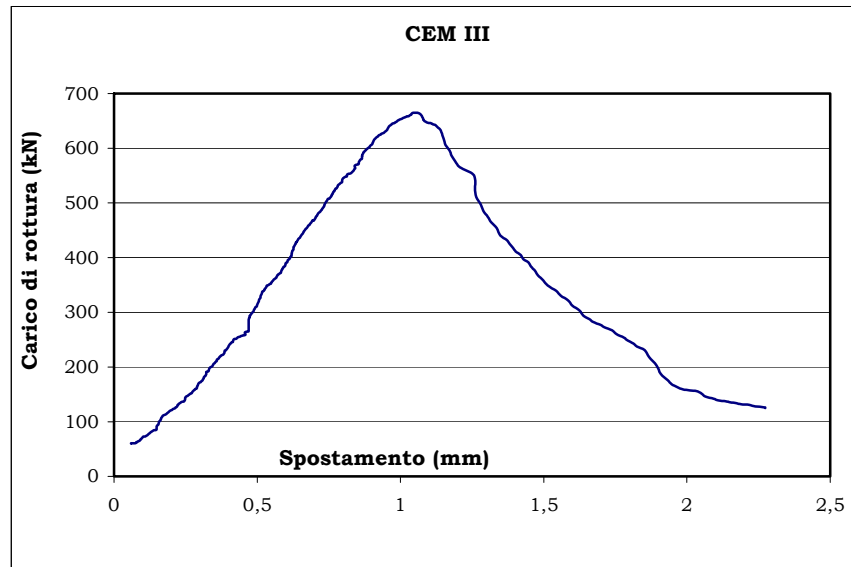


Fig. 5.44 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N (T.Q.).

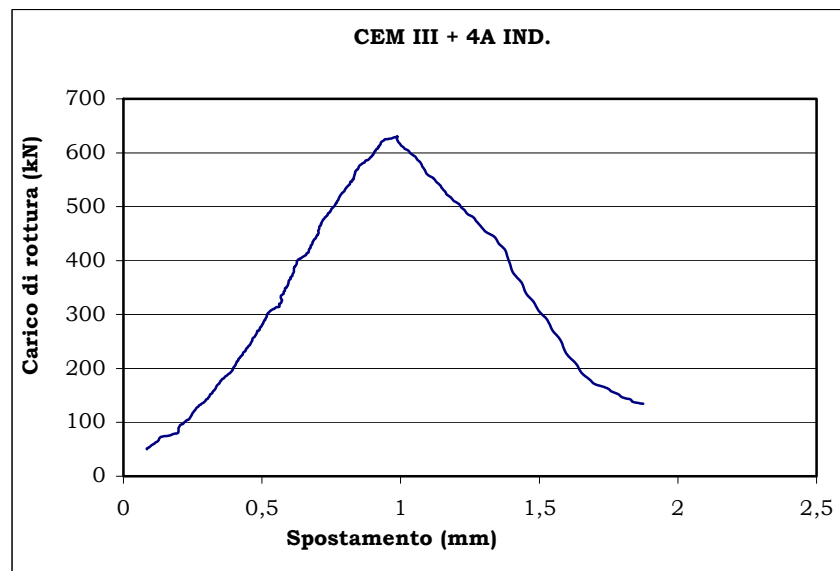


Fig. 5.45 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + 4A IND.

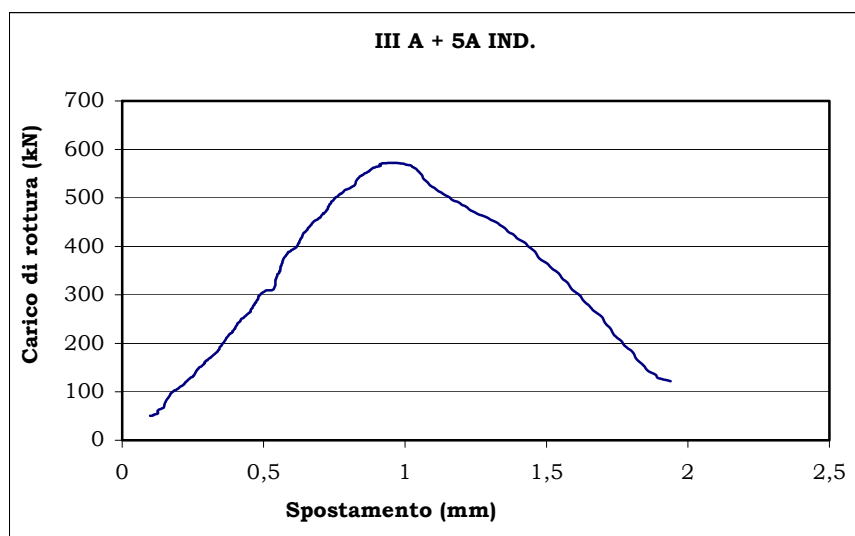


Fig. 5.46 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + 5A IND.

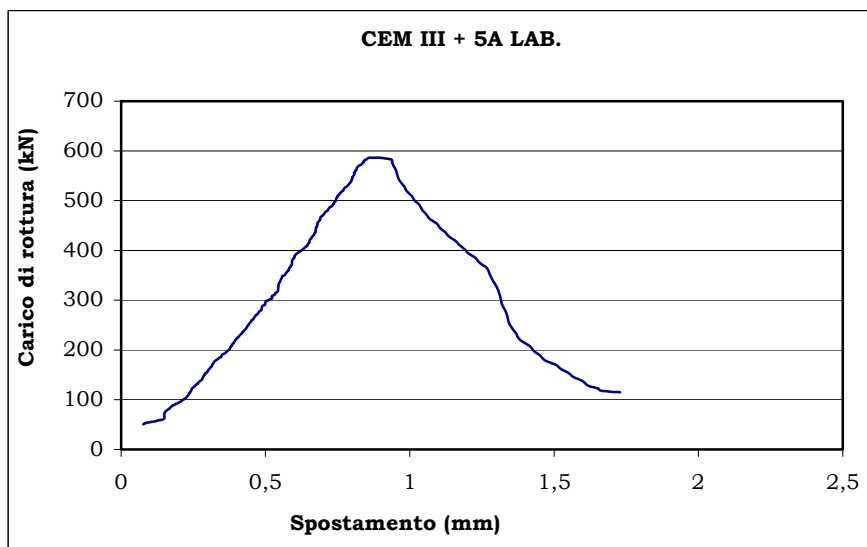


Fig. 5.47 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + 5A LAB.

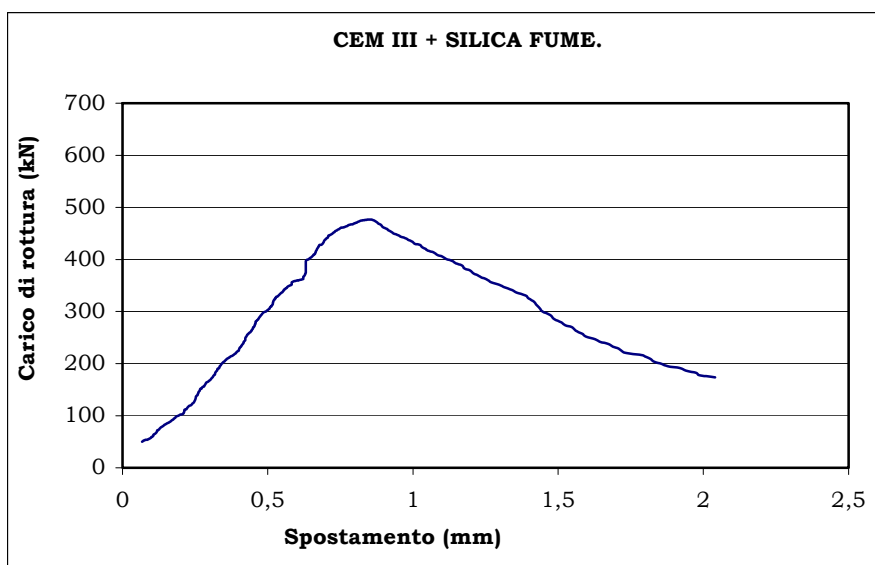


Fig. 5.48 - Curva carico – spostamento della prova a compressione effettuata sul provino di cls realizzato con CEM III/A 42,5 N + Silica fume.

5.4.4 Valutazione sull'effetto delle zeoliti sulle resistenze a compressione.

In questo paragrafo viene messa in evidenza, come fatto prima per le malte, l'influenza delle varie aggiunte zeolitiche sul comportamento dei vari calcestruzzi.

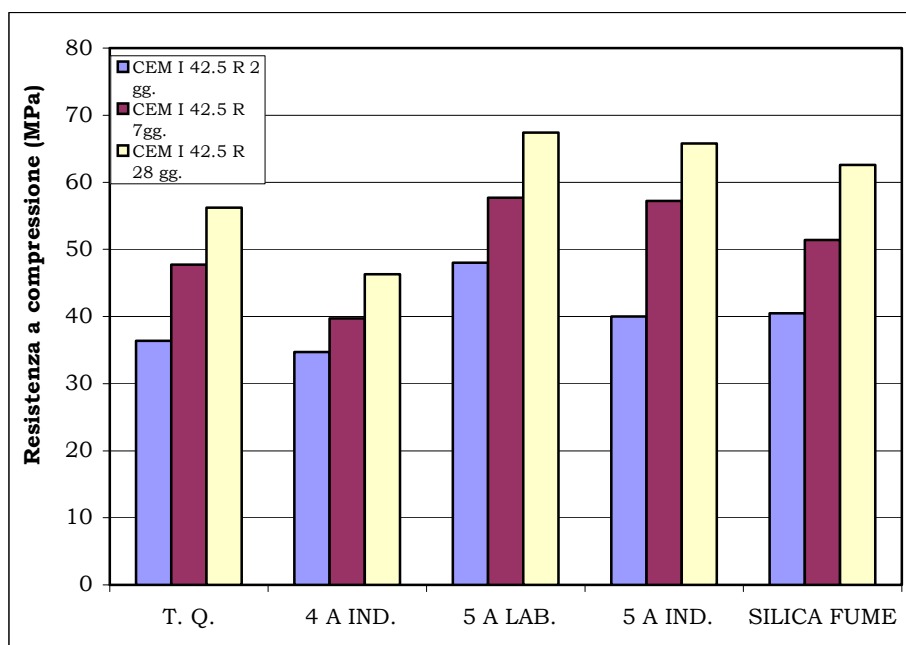


Fig. 5.49 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini di cls confezionati con il CEM I 42,5 R a varie stagionature.

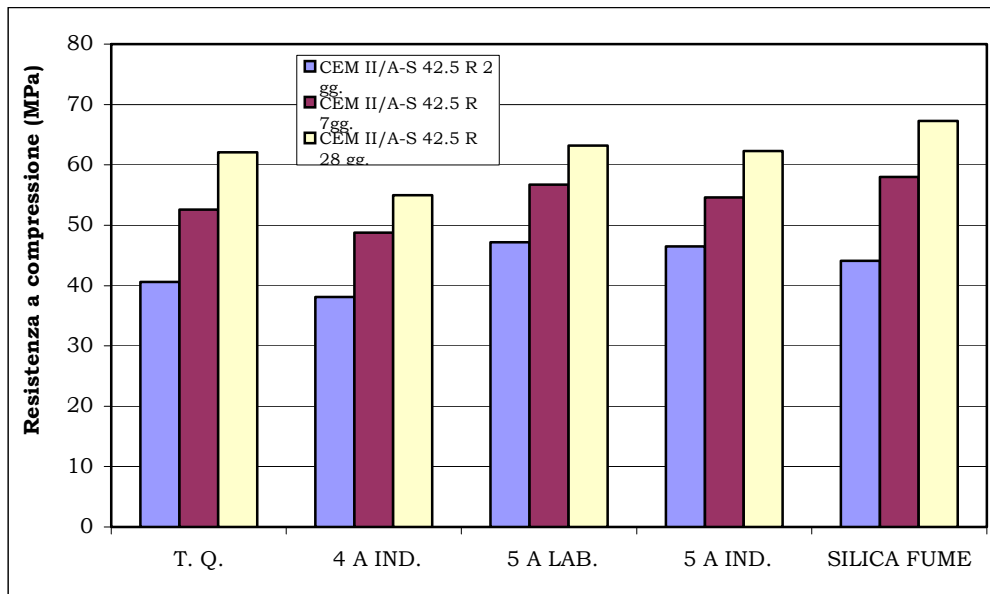


Fig. 5.50 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini di cls confezionati con il CEM II/A-S 42,5 R a varie stagionature.

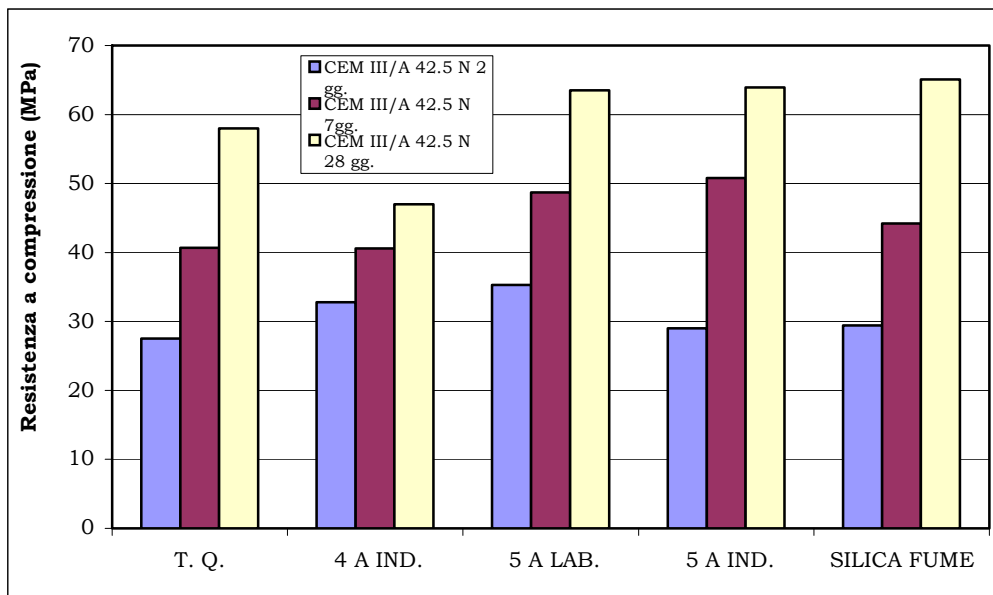


Fig. 5.51 - Effetto delle zeoliti sulla resistenza a compressione dei provini di cls confezionati con il CEM III/A 42,5 N a varie stagionature.

I provini di calcestruzzo confezionati con il CEM I 42,5 R e con l'aggiunta del 10% di zeolite 5A, industriale e di laboratorio, hanno mostrato caratteristiche meccaniche a compressione superiori a quelli confezionati con il 10% di silice fume, sia alle brevi che alle lunghe stagionature.

I provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/A-S 42,5 R, finemente macinato, e con l'aggiunta del 10% di zeolite 5A hanno mostrato una maggiore resistenza meccanica a brevi stagionature rispetto a quelli realizzati con il solo cemento ed a quelli confezionati con il 10% di aggiunta di silice fume, mentre a lunghe stagionature i valori di resistenza meccanica sono di poco inferiori a quelli ottenuti dai provini confezionati con la silice fume.

I provini di calcestruzzo preparati con il CEM III/A 42,5 N e l'aggiunta del 10% di zeolite 5A hanno mostrato alte resistenze meccaniche alle brevi stagionature, mentre alle lunghe stagionature i valori delle resistenze meccaniche sono uguali a quelli ottenuti aggiungendo alla miscela il 10% di silice fume.

5.5 Durabilità

In questo paragrafo si discutono i risultati inerenti le prove di durabilità eseguite sui provini di calcestruzzo ad alte prestazioni preparati con l'aggiunta di zeoliti e di silice fume.

Le prove effettuate hanno riguardato la verifica dei fenomeni di deterioramento chimico e fisico delle varie miscele di calcestruzzo seguendo le indicazioni prescritte dalle normative UNI.

Le prove chimiche effettuate sono state le seguenti:

- ✓ Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro (UNI 7928)
- ✓ Determinazione della penetrabilità dello ione solfato (UNI 8019)
- ✓ Determinazione della profondità di carbonatazione (UNI 9944)

La prova fisica effettuata è stata la seguente:

- ✓ Determinazione della resistenza alla degradazione per cicli di gelo e disgelo (UNI 7087-72).

5.5.1 Attacco ai cloruri

Le prove sono state eseguite in conformità con la norma UNI 7928, che fornisce le indicazioni per determinare la profondità di penetrazione dello ione cloruro (Cl⁻) in dei provini di calcestruzzo dopo essere stati posti a contatto con una soluzione di cloruro di calcio per tempi prefissati. Dopo aver rilevato la linea di penetrazione che si è formata nei provini di calcestruzzo si è determinata inoltre l'eventuale variazione di resistenza meccanica, che questi hanno subito a causa del contatto per 12 mesi con la soluzione ricca in cloruri.

5.5.1.1 Procedimento della prova

I provini di calcestruzzo di dimensioni pari a (100x100x100 mm) da sottoporre alla prova sono il risultato della preparazione in laboratorio di diverse miscele ottenute dalla combinazione degli ingredienti: cementi (CEM I 42,5R, CEM II/A-S 42,5 R e CEM III/A 42,5N), aggiunte (5A e silice fume) e additivo (SP1).

I provini dopo 28 giorni di stagionatura in condizioni di umidità > 95% e alla temperatura di 20 °C sono stati trattati in stufa a 105°C fino a massa costante, cioè fino a quando le pesate effettuate a 24h di distanza hanno dato una differenza di massa inferiori allo 0,1%. Una volta raggiunta la massa costante a ogni provino è stato inserito per 30 mm della sua lunghezza un tubo modificato di polietilene avente lunghezza di circa 100 mm (fig. 5.52) e spessore di circa 4 mm.

Per garantire la tenuta della soluzione contenuta nel tubo di polietilene, come previsto dalla normativa, è stato utilizzato un rivestimento di paraffina che ha avvolto completamente il provino e parte del tubo al fine di far penetrare la soluzione nel calcestruzzo lungo la superficie di contatto con la soluzione (fig. 5.52). A questo punto sono stati versati dentro il tubo di polietilene 150 cm³ di soluzione titolata di cloruro di calcio di concentrazione pari a 0,27M. I provini a contatto costante con la soluzione sono stati conservati per 12 mesi in ambiente chiuso e termostato a 20 °C.

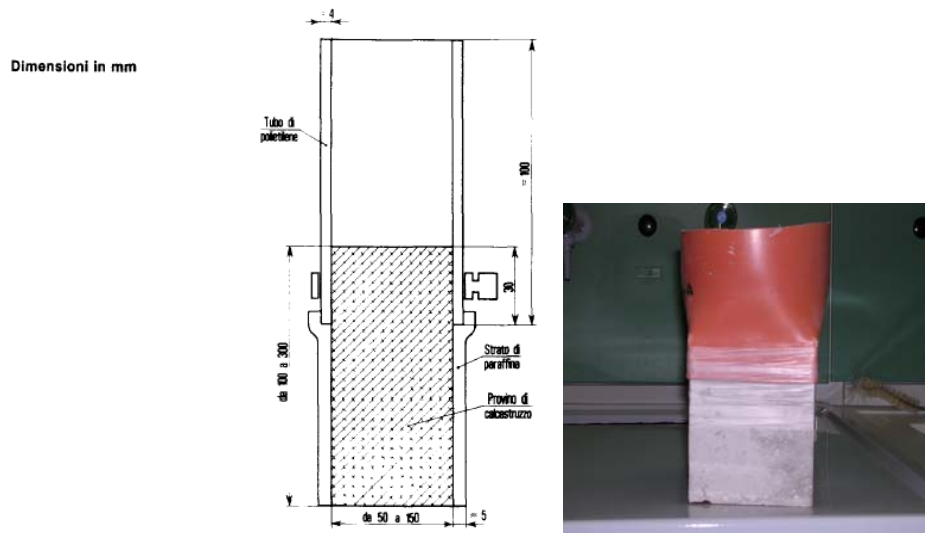


Fig. 5.52 - Preparazione del provino di cls

Alla scadenza del 12° mese, i provini sono stati prelevati dal recipiente termostato, liberati dal tubo di polietilene, asciugati e tagliati longitudinalmente come prescritto dalla normativa. Seguendo sempre le indicazioni della normativa sono state preparate delle soluzioni per rilevare la profondità di penetrazione dello ione cloruro; e in particolare una soluzione di Nitrato d'argento, avente concentrazione $(\text{AgNO}_3)=0,1\text{M}$ e una soluzione composta da 0,1g di fluoresceina in 100 cm^3 di alcol etilico al 70% (fig. 5.53).

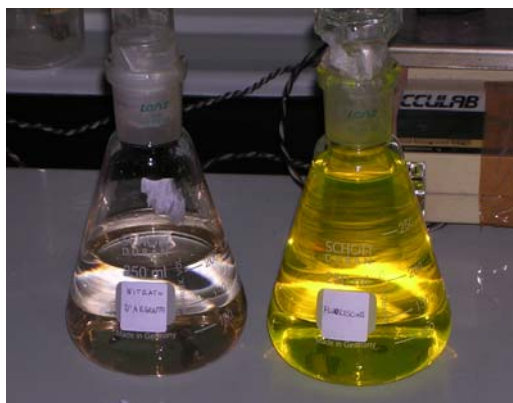


Fig. 5.53 - Soluzione di Nitrato d'argento e Fluoresceina

Per rendere più evidente la profondità della penetrazione dello ione, una delle due superfici ottenute dalla sezione dei provini è stata essiccata a 105°C per 30 min e quindi spruzzata, mediante un nebulizzatore, con la soluzione di fluoresceina (fig. 5.54).



Fig. 5.54 - Provini impregnati con fluoresceina

Dopo aver ripetuto quest' ultimo trattamento per 5 volte, sulla superficie asciugata è stata spruzzata per due volte una soluzione di Nitrato d'argento. In presenza di ioni Cl^- si ha formazione di cloruro di argento che diventa progressivamente più scuro per azione della luce (fig. 5.55). La zona del cls non permeata dalla soluzione salina assorbe la fluoresceina mantenendo persistente su tutta la superficie del provino, per l'assenza dei cloruri la caratteristica colorazione rossa. E' possibile pertanto tracciare una linea di demarcazione sulla superficie del provino corrispondente al fronte di avanzamento dello ione cloruro e quindi determinare la profondità di penetrazione.



Fig. 5.55 - Provini a contatto con il Nitrato d'argento

Questo trattamento è stato eseguito sui diversi provini per riscontrare le varie linee di demarcazione della penetrazione dello ione cloruro e quindi evidenziare quale miscela è più adatta alla realizzazione di opere in classe di esposizione XC e XD. Nella tabella di

seguito riportata (tab. 5.20) si può notare che i provini realizzati con CEM III sono prevalentemente meno permeabili dei provini realizzati con CEM I e CEM II. In particolare tra i provini realizzati con CEM III, quello che ha subito una minore penetrazione allo ione cloruro è stato realizzato con l'aggiunta di zeolite 5A. Pertanto i provini realizzati con l'aggiunta di zeoliti si sono dimostrati, meno permeabili allo ione cloruro.

| PROVINO | CEMENTO | AGGIUNTA | ADDITIVO | PENETRAZIONE DELLO IONE CLORURO (mm) |
|---------|---------|----------------|----------|--------------------------------------|
| 9 | CEM III | 5A | SP1 | 0,7 |
| 10 | CEM III | Fumo di silice | SP1 | 2,4 |
| 14 | CEM II | 5A | SP1 | 4,2 |
| 15 | CEM II | Fumo di silice | SP1 | 5,7 |
| 19 | CEM I | 5A | SP1 | 10,2 |
| 20 | CEM I | Fumo di silice | SP1 | 12,8 |

Tab. 5.20 – Profondità di penetrazione dello ione cloruro nei vari provini



Fig. 5.56 - Provini trattati con il Nitrato d'argento

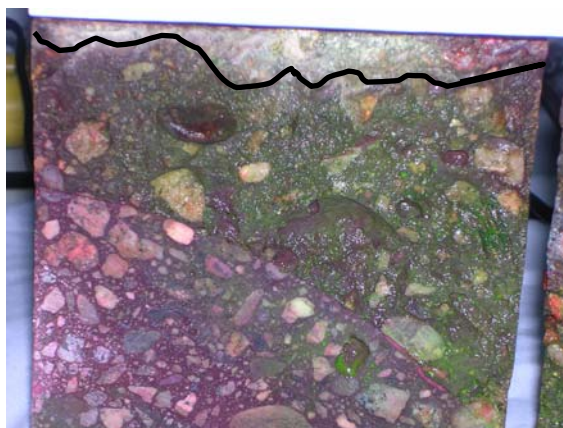


Fig. 5.57 - Particolare della linea di demarcazione fronte di avanzamento dello ione cloruro del provino realizzato con CEM I e fumo di silice.

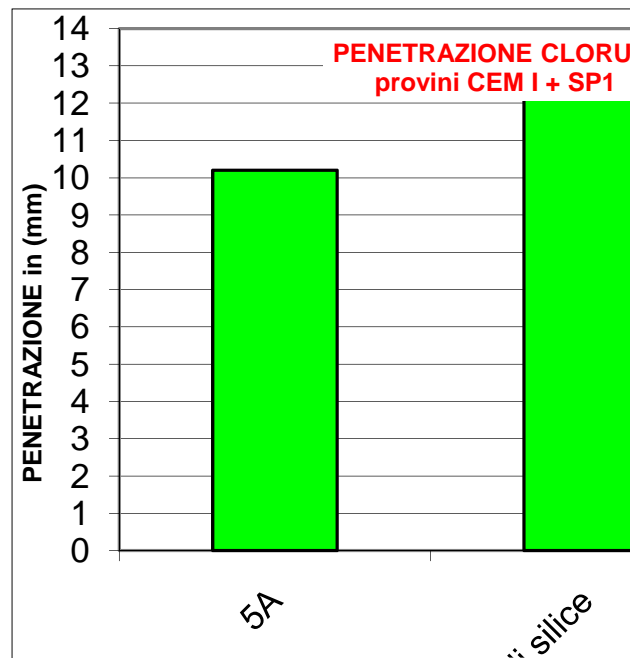


Fig. 5.58 - Penetrazione dei cloruri nei provini di cls realizzati con CEM I, SP1 e le varie aggiunte.

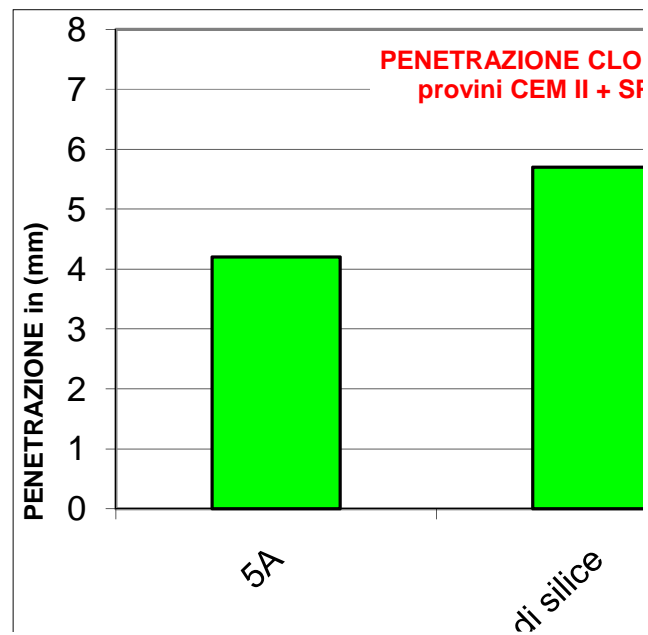


Fig. 5.59 - Penetrazione dei cloruri nei provini di cls realizzati con CEM II, SP1 e le varie aggiunte.

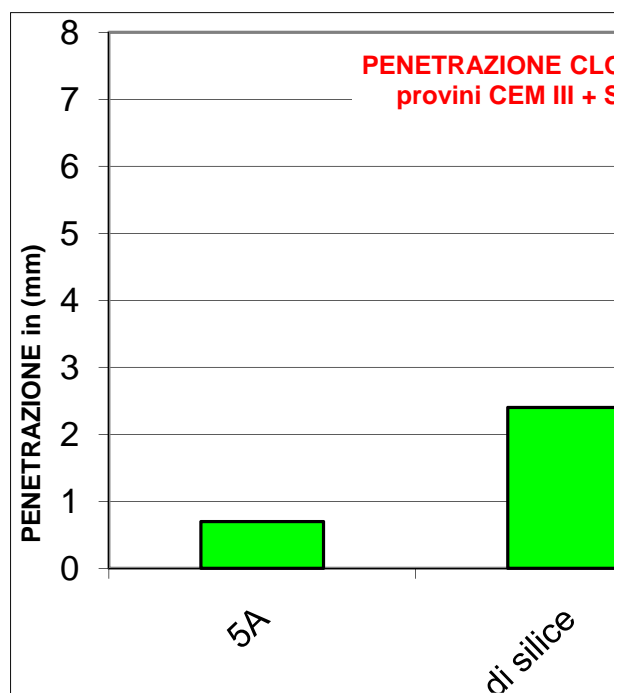


Fig. 5.60 - Penetrazione dei cloruri nei provini di cls realizzati con CEM III, SP1 e le varie aggiunte.

5.5.2 Attacco ai solfati.

Gli ioni solfato SO_4^{--} si possono trovare negli scarichi civili ed industriali, nelle piogge acide, nei terreni contenenti sali solfatici e nelle acque naturali che li attraversano. Si tratta in genere di solfati di sodio, potassio, calcio, magnesio e ammonio. Le reazioni che avvengono nel calcestruzzo esposto all'aggressione solfatica sono distruttive perché, in particolari condizioni, comportano fortissimi aumenti di volume dovuti alla formazione di particolari sostanze cristalline: l'ettringite e la thaumasite.

Le prove sono state eseguite in conformità con la norma UNI 8019, che fornisce la metodologia per determinare la profondità di penetrazione dello ione solfato (SO_4^{--}) in dei provini di calcestruzzo posti a contatto con una soluzione di solfato di sodio per tempi prefissati. Oltre a rilevare la linea di penetrazione che si forma nei provini di calcestruzzo si è determinata, inoltre la variazione di resistenza meccanica, che questi hanno subito a causa del contatto per 12 mesi con la soluzione ricca in solfati.

5.5.2.1 Procedimento della prova

I provini di calcestruzzo di dimensioni pari a (100x100x100 mm) da sottoporre alla prova sono stati ottenuti da diverse miscele contenenti: cementi (CEM I 42,5R, CEM II/A-S 42,5 R e CEM III/A 42,5N) aggiunte (5A e silica fume) e additivo (SP1) .

I provini dopo 28 giorni di stagionatura in condizioni di umidità > 95% e alla temperatura di 20 °C sono stati trattati in stufa a 105°C fino a massa costante, cioè fino a quando le pesate effettuate a 24h di distanza hanno dato una differenza di massa inferiore allo 0,1%. Una volta raggiunta la massa costante a ogni provino è stato inserito per 30 mm della sua lunghezza un tubo di polietilene avente lunghezza di circa 100 mm (fig. 5.61) e spessore di circa 4 mm. Per garantire la tenuta della soluzione contenuta nel tubo, come da normativa è stato utilizzato un rivestimento di paraffina che ha avvolto completamente il provino e parte del tubo al fine di far penetrare la soluzione solo attraverso il calcestruzzo lungo la superficie di contatto con la soluzione.

A questo punto sono stati versati dentro il tubo di polietilene 150 cm³ di soluzione titolata di solfato di sodio di concentrazione pari a 0,50M. I provini conservati in recipienti chiusi termostatati a 20°C sono rimasti a contatto per 12 mesi con la soluzione.

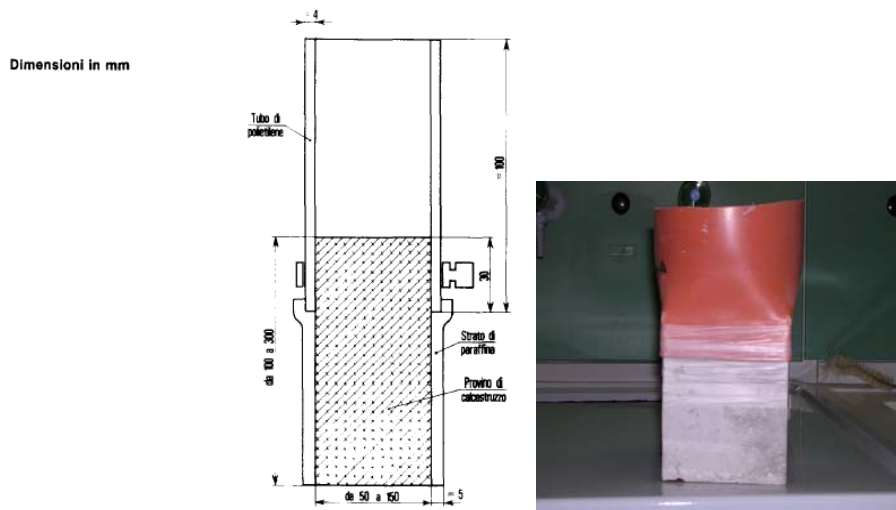


Fig. 5.61 - Preparazione del provino di cls

Alla scadenza del 12° mese, i provini sono stati prelevati dal recipiente termostatato, liberati dal tubo di polietilene, asciugati e tagliati longitudinalmente come previsto dalla normativa.

Per la suddetta prova si utilizzano due composti chimici, il Cloruro di bario e il permanganato di potassio. La normativa prevede per il Cloruro di bario una soluzione titolata di concentrazione $(\text{BaCl}_2)=2,1\text{M}$ e per il permanganato di potassio una soluzione titolata $(1/5\text{KMnO}_4)=2,1\text{M}$; infine occorre miscelare 3 parti di soluzione titolata di BaCl_2 con 1 parte di soluzione titolata di KMnO_4 . (fig. 5.62).



Fig. 5.62 - Soluzione di Cloruro di bario e Permanganato di potassio

Per rendere più evidente la profondità della penetrazione, una delle due superfici ottenute dalla sezione dei provini è stata essiccata a 105°C per 30 min (fig. 5.63a), quindi spruzzata, mediante un nebulizzatore la soluzione reagente (fig. 5.63b-c) ed infine i provini sono stati immersi per un minuto in acqua distillata per eliminare il Cloruro di bario ed il permanganato di potassio in eccesso (fig. 5.63d) .

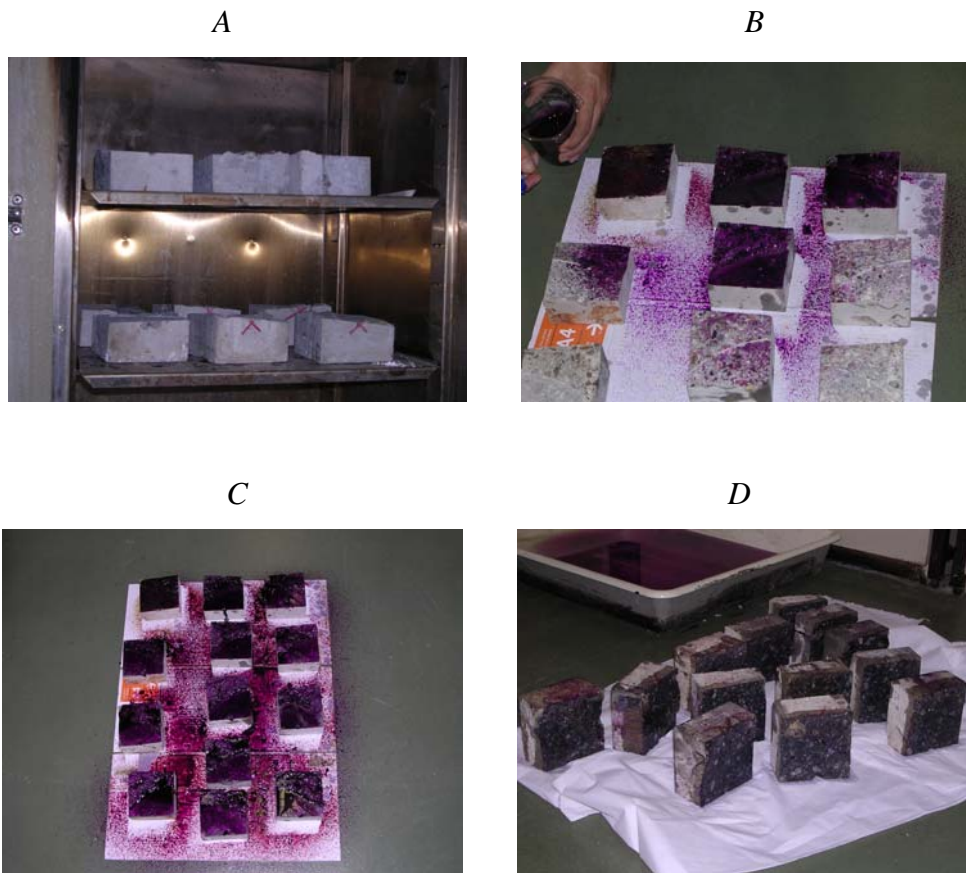


Fig. 5.63 - Fasi della prova

In presenza di ioni SO_4^{2-} si ha la formazione di solfato di bario che ingloba il permanganato di potassio, assumendo e conservando la sua colorazione violetta. La zona del calcestruzzo non permeata dalla soluzione salina di solfato di sodio si decolora rapidamente dopo il successivo lavaggio con acqua.

E' possibile pertanto tracciare la linea di demarcazione sulla superficie del provino corrispondente al fronte di avanzamento dello ione solfato e quindi determinare la profondità di penetrazione (fig. 5.65).



Fig. 5.64 - Provini di cls dopo il contatto con la miscela di cloruro di bario e permanganato di potassio



Fig. 5.65 - Provino di cls a fine prova con linea di demarcazione fronte di avanzamento dello ione solfato

Questo trattamento è stato eseguito su tutti i provini per riscontrare le varie linee di demarcazione del fronte di avanzamento dello ione solfato e quindi evidenziare quale provino di cls sarebbe più adatto ad un ambiente con alta quantità di solfati. Nella tabella di seguito riportata (tab. 5.21) si può notare che i provini confezionati hanno un valore di penetrazione allo ione solfato sempre basso, quelli migliori sono realizzati dall'aggiunta di silica fume. I provini di cls realizzati con cemento di tipo CEM III e le aggiunte di 5A e fumo di silice sono stati i meno permeabili allo ione solfato. Per quanto riguarda le miscele di cls realizzate con il cemento di tipo CEM I, quella contenente la zeolite 5A si è dimostrata meno impermeabile allo ione solfato.

| PROVINO | CEMENTO | AGGIUNTA | ADDITIVO | PENETRAZIONE DELLO IONE SOLFATO (mm) |
|---------|---------|----------------|----------|--------------------------------------|
| 4 | CEM III | 5A | SP1 | 1,8 |
| 5 | CEM III | Fumo di silice | SP1 | 0,1 |
| 9 | CEM II | 5A | SP1 | 2,9 |
| 10 | CEM II | Fumo di silice | SP1 | 1,9 |
| 14 | CEM I | 5A | SP1 | 3,4 |
| 15 | CEM I | Fumo di silice | SP1 | 1,9 |

Tab. 5.21 – Profondità di penetrazione dello ione solfato nei provini di cls.

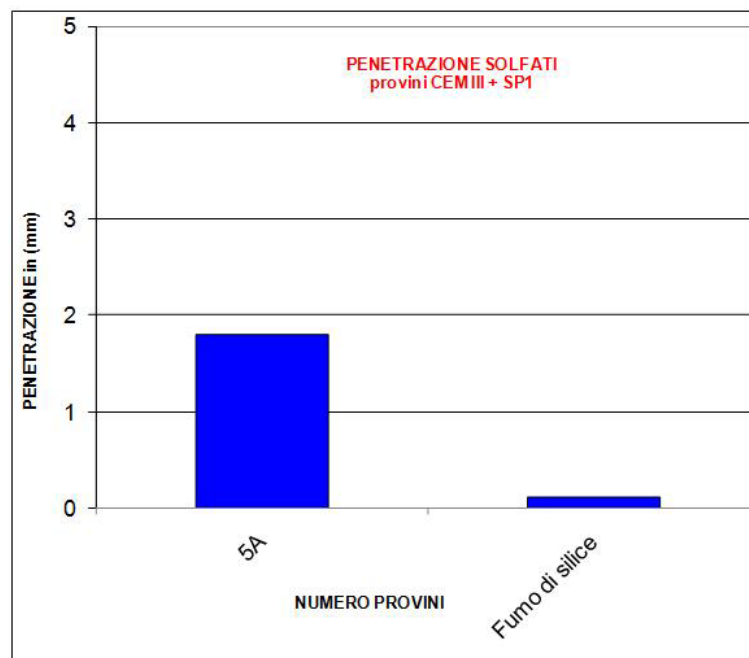


Fig. 5.66 - Penetrazione dei solfati nei provini di cls realizzati con CEM III, con SP1 e le varie aggiunte.

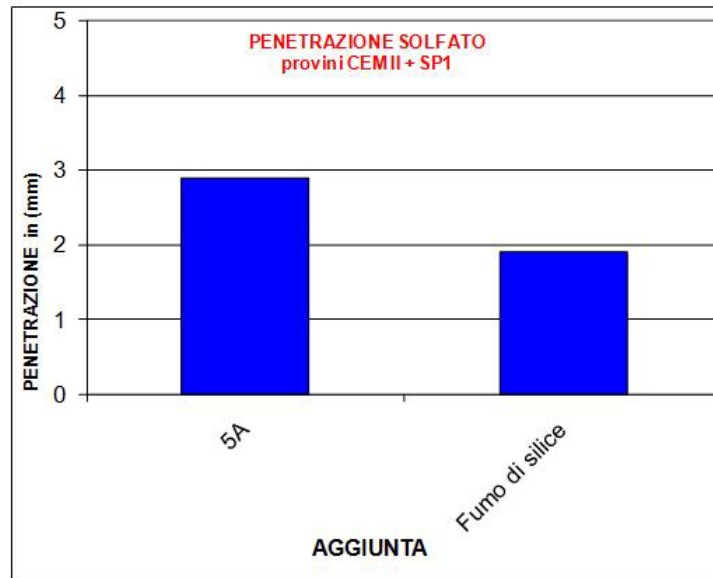


Fig. 5.67 - Penetrazione dei solfati nei provini di cls realizzati con CEM II, con SP1 e le varie aggiunte.

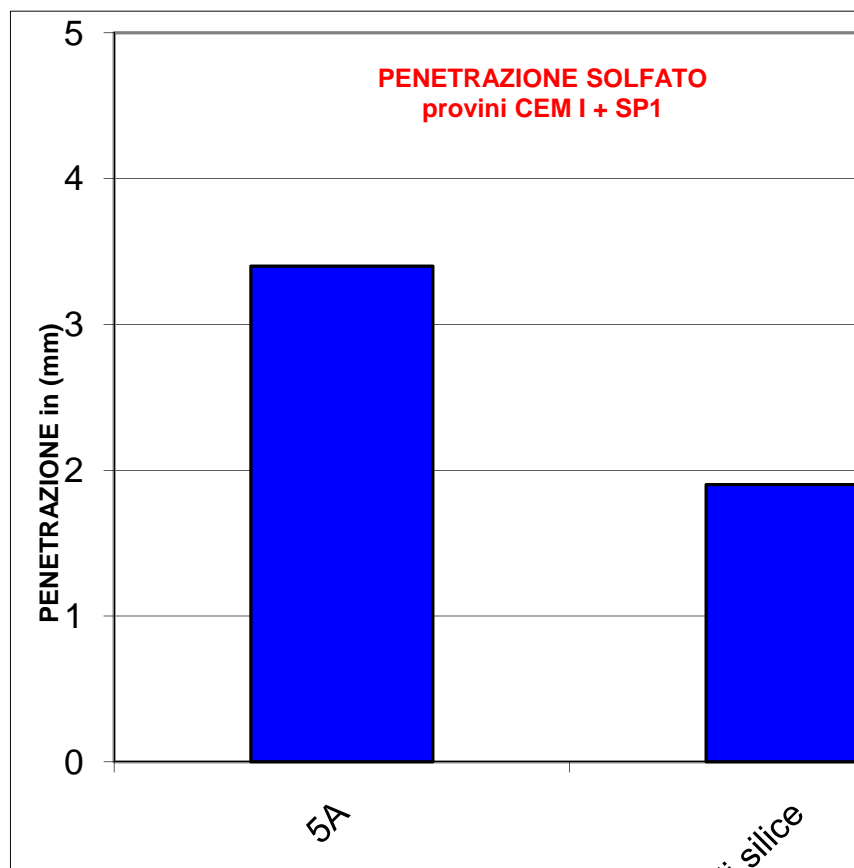


Fig. 5.68 - Penetrazione dei solfati nei provini di cls realizzati con CEM I, con SP1 e le varie aggiunte.

5.5.3 Carbonatazione.

La CO₂ disciolta nell'acqua pura dilava, cioè è capace di portare in soluzione più o meno lentamente alcuni costituenti del cls.

La CO₂ presente nell'aria, provoca il noto fenomeno della carbonatazione, cioè la progressiva trasformazione della calce libera Ca(OH)₂ in carbonato di calcio CaCO₃ e H₂O, con forte abbassamento del pH. L'ambiente gradualmente più acido, dovuto all'azione dell'anidride carbonica, facilita la distruzione dello strato protettivo di ossido ferrico passivante presente sui ferri di armatura, che così divengono molto più esposti alla corrosione.

5.5.3.1 Procedimento della prova.

Le prove sono state eseguite in conformità con la norma UNI 9944, che ha lo scopo di determinare la profondità di carbonatazione in dei provini di calcestruzzo dopo essere stati a contatto con l'aria per 12 mesi.

I provini di calcestruzzo di dimensioni pari a (100x100x100 mm) da sottoporre alla prova sono il risultato della preparazione in laboratorio di diverse miscele ottenute dalla combinazione degli ingredienti: cementi (CEM I 42,5R, CEM II/A-S 42,5 R e CEM III/A 42,5N), aggiunte (5A e silica fume) e additivo (SP1).

I provini dopo 28 giorni di stagionatura in condizioni di umidità > 95% e alla temperatura di 20 °C sono stati essiccati in stufa a 105°C per 30 minuti prima di essere esposti all'aria. La valutazione del grado di carbonatazione della struttura, è stata effettuata bagnando con una soluzione di fenolftaleina metà provino ottenuto tagliando secondo un piano normale alla superficie esposta all'aria. In presenza di C(OH)₂ dovrà assumere una colorazione rossastra (altrimenti significa che il pH è sceso a valori inferiori ad 11 e non è più protettivo per il ferro) (fig. 5.69).

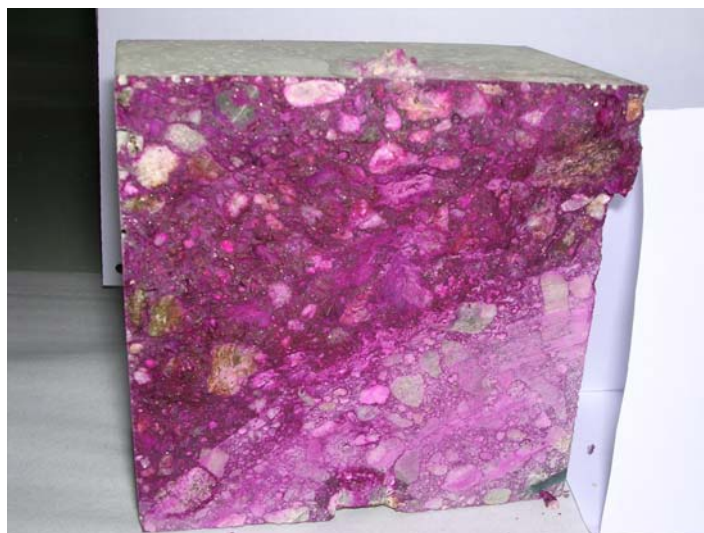


Fig. 5.69 -Provino trattato con la fenolftaleina

In tutti i provini realizzati con le diverse miscele non è stato rilevato alcun fenomeno di carbonatazione evidenziando la compatibilità delle zeoliti con i cementi e gli additivi utilizzati.

5.5.4 Cicli di gelo e disgelo

Il degrado provocato dai cicli di gelo e disgelo si verifica fundamentalmente nelle zone montane dove la temperatura scende spesso sotto lo zero in condizioni ambientali in cui il calcestruzzo è imbibito d'acqua. Se la struttura è soggetta all'impiego di sali disgelanti, generalmente a base di cloruro, il fenomeno viene aggravato anche per la contemporanea corrosione dei ferri. Il degrado causato dai cicli gelo-disgelo si manifesta con modalità diversa a secondo che siano presenti o meno sali disgelanti. La norma a cui si fa riferimento per la determinazione della resistenza alla degradazione per cicli di gelo e disgelo è la UNI 7087-72. I provini possono provenire da getti in cantiere od in laboratorio (confezionati secondo quanto specificato nella UNI 6128-72 od essere ricavati da calcestruzzi già induriti. Il numero minimo di provini necessari allo svolgimento della prova è 3: è necessario tuttavia confezionare un numero maggiore, almeno altri due, conservandoli come campioni di confronto, per le prove meccaniche. I provini dopo il confezionamento devono essere conservati per 1 giorno sotto panno umido e dopo sformatura, per 45 giorni in apposito locale (camera umida) a temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e ad umidità relativa non minore del 90%. In mancanza di un locale avente le

sopracitate condizioni, i provini devono essere immersi in sabbia mantenuta umida. Successivamente i provini vanno immersi in acqua mantenuta a $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ fino a raggiungere 60 giorni di stagionatura complessiva.

L'apparecchiatura, costituita da una cella entro cui si introducono i provini in esame, deve essere corredata dai seguenti dispositivi:

- a) impianto di raffreddamento e riscaldamento atto a realizzare nell'interno della cella temperature comprese tra -25 e $+5^{\circ}\text{C}$, con tolleranza di $\pm 2^{\circ}\text{C}$;
- b) programmatore ciclico in grado di provocare le alternanze di gelo (con raffreddamento dell'aria alle velocità prefissate di 15, 10 e $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ rispettivamente per provini con lato di 10, 15 e 20 o 30 cm) e disgelo;
- c) contatore di cicli;
- d) impianto di termostattizzazione per l'acqua da immettere all'interno della cella durante le fasi di disgelo;
- e) misuratori di temperatura, in numero minimo di 2, con sensibilità di $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, atti a rilevare la temperatura della cella e all'interno di un campione di riferimento. Il campione per il rilevamento termometrico deve avere dimensioni geometriche e caratteristiche fisiche uguali a quelle dei provini in esame;
- f) dispositivi atti ad assicurare una adeguata circolazione dell'aria o dell'acqua.
- g) Bilance atte a pesare i provini con precisione del 2%.

Il ciclo di gelo e disgelo consiste:

- nell'abbassare la temperatura dei provini immersi in aria raffreddata a velocità costante da $+5$ a -25°C ;
- nel mantenere la temperatura a -25°C ;
- nel riportare e mantenere la temperatura dei provini a $+5^{\circ}\text{C}$ mediante immissione nella cella di acqua termostattizzata.

La durata complessiva del ciclo deve risultare non minore di 8, 12 e 24 h rispettivamente per provini con lato di 10, 15 e 20 o 30 cm; è tollerata una variazione del +25% sui tempi indicati.

Terminato il periodo di stagionatura su campioni a 20°C e asciugati dell'acqua superficiale si effettuano le prime misure (misure di confronto): modulo elastico, lunghezza e massa.

I provini vengono quindi posti nella cella di gelo e disgelo; la serie di cicli inizia con la fase di immissione dell'acqua a + 5°C.

La distanza minima tra i provini all'interno della cella di prova deve essere di 5 cm.

Allo scadere dei primi 5 cicli si effettua una seconda misura; le successive vengono effettuate ogni 20 cicli (od al massimo ogni 25 cicli).

Contemporaneamente, si effettua la misura sui campioni di confronto mantenuti sempre in acqua a 20°C.

Le misure devono essere effettuate al termine del periodo di disgelo (+5°C), dopo aver portato i provini alla temperatura di 20°C mediante bagno di acqua; la temperatura all'interno del campione di riferimento non deve risultare minore di 18°C.

La prova prosegue fino a raggiungere 300 cicli. Si può arrestare la prova qualora il materiale subisca una riduzione del modulo elastico dinamico del 60%.

Nel resoconto di prova si devono riportare:

- a) le caratteristiche dell'impasto usato: tipo di cemento, tipo di inerti e loro granulometria, dosaggio in cemento, rapporto acqua/cemento;
- b) il dosaggio ed il tipo di eventuali additivi;
- c) contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco;
- d) massa e modulo elastico, dimensione e numero dei provini all'inizio dei cicli di gelo e disgelo;
- e) scostamenti delle temperature nominali prescritte a tempo di durata del ciclo;
- f) i risultati ottenuti tabellati: del modulo elastico, delle variazioni dimensionali, della massa dei provini messi a confronto con quelli relativi ai campioni di confronto (si consiglia di riportare i risultati anche graficamente);
- g) ogni altra forma utile con particolare riguardo a difetti riscontrati, a interruzione nei cicli ed a stagionature diverse da quanto prescritto nella norma.

5.5.4.1 Procedimento della prova.

I provini di calcestruzzo di dimensioni pari a (100x100x100 mm) da sottoporre alla prova sono il risultato della preparazione in laboratorio delle diverse miscele ottenute dalla combinazione degli ingredienti: cementi (CEM I 42,5R, CEM II/A-S 42,5 R e CEM III/A 42,5N), aggiunte (5A e silica fume) e additivo (SP1).

I provini dopo il confezionamento sono stati conservati per 1 giorno sotto panno umido e dopo sformatura, per 45 giorni in apposito locale (camera umida) a temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e ad umidità relativa non minore del 90%.

Le prove eseguite sono state condotte al fine di valutare l'influenza delle diverse aggiunte (zeoliti e silice fume) sulla durabilità al gelo-disgelo dei provini di cls realizzati con CEM I CEM II e CEM III.

Ogni provino ha subito delle escursioni termiche secondo un ciclo di gelo-disgelo che consta di 4 fasi, ognuna di 6 ore:

- 1) si porta il provino dalla temperatura ambiente alla temperatura di -20° lasciandolo nel congelatore per 6 ore;
- 2) si mantiene la temperatura costante a -20° per 6 ore;
- 3) si estrae il provino dal congelatore per riportarlo alla temperatura di 20° ponendolo in acqua;
- 4) si lascia il provino per 6 ore alla temperatura di 20° .

La figura 5.70 schematizza le fasi spiegate sopra.

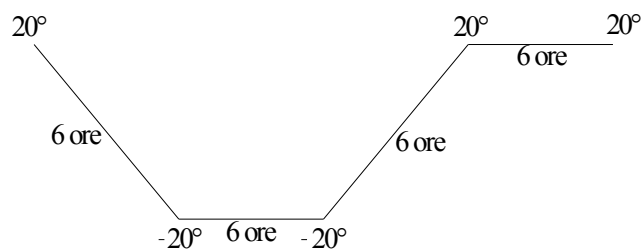


Fig. 5.70 - Schema fasi di gelo-disgelo

I provini di calcestruzzo dopo essere stati portati a peso costante in stufa a 105°C , sono stati pesati prima che si iniziassero i cicli (peso secco) e periodicamente (come da normativa) dopo aver concluso il ciclo di gelo-disgelo e asciugati in superficie (peso saturo a superficie asciutta).

Si riportano nella tab. 5.22 i pesi dei provini iniziali e saturi a superficie asciutta.

| provino | peso | peso saturo (g) ai diversi cicli | | | | | | | | |
|-----------|-------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | secco | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 2361 | 2464 | 2466 | 2467 | 2471 | 2472 | 2472 | 2472 | 2473 | 2473 |
| 3 | 2367 | 4224 | 2426 | 2426 | 2425 | 2428 | 2430 | 2430 | 2431 | 2432 |
| 4 | 2306 | 2378 | 2383 | 2383 | 2386 | 2388 | 2388 | 2388 | 2390 | 2391 |
| 5 | 2351 | 2417 | 2420 | 2420 | 2422 | 2423 | 2424 | 2424 | 2424 | 2425 |
| 6 | 2355 | 2443 | 2448 | 2449 | 2455 | 2457 | 2457 | 2458 | 2458 | 2460 |
| 7 | 2278 | 2368 | 2369 | 2371 | 2373 | 2375 | 2374 | 2375 | 2374 | 2375 |
| 8 | 2338 | 2395 | 2403 | 2404 | 2406 | 2408 | 2407 | 2406 | 2406 | 2408 |
| 9 | 2314 | 2367 | 2371 | 2371 | 2374 | 2375 | 2375 | 2375 | 2375 | 2378 |
| 10 | 2365 | 2420 | 2424 | 2423 | 2426 | 2426 | 2427 | 2426 | 2426 | 2427 |
| 11 | 2329 | 2432 | 2435 | 2437 | 2443 | 2445 | 2444 | 2446 | 2449 | 2452 |
| 12 | 2352 | 2405 | 2409 | 2409 | 2414 | 2417 | 2414 | 2414 | 2416 | 2415 |
| 13 | 2360 | 2413 | 2416 | 2417 | 2422 | 2424 | 2422 | 2422 | 2424 | 2423 |
| 14 | 2334 | 2395 | 2403 | 2403 | 2410 | 2415 | 2411 | 2413 | 2413 | 2412 |
| 15 | 2358 | 2423 | 2428 | 2430 | 2438 | 2438 | 2436 | 2436 | 2436 | 2435 |
| 16 | 2343 | 2438 | 2445 | 2446 | 2452 | 2454 | 2452 | 2453 | 2455 | 2453 |
| 17 | 2253 | 2356 | 2383 | 2382 | 2389 | 2390 | 2389 | 2389 | 2389 | 2389 |
| 18 | 2328 | 2377 | 2384 | 2384 | 2389 | 2391 | 2389 | 2389 | 2390 | 2389 |
| 19 | 2328 | 2386 | 2396 | 2397 | 2409 | 2407 | 2404 | 2405 | 2406 | 2404 |
| 20 | 2330 | 2389 | 2396 | 2397 | 2402 | 2406 | 2405 | 2405 | 2405 | 2404 |

Tab. 5.22 - Pesi iniziali (secco) e durante la prova gelo-disgelo (saturo a superficie asciutta) dei provini di cls.

Per una migliore lettura dei dati ottenuti si è calcolata la variazione percentuale in peso dei provini (tab. 5.23).

Dalla tabella 5.23 si evince che tutti i provini dopo i cicli di gelo-disgelo hanno avuto solo un modesto incremento di peso.

I provini confezionati senza aggiunte, cioè solo con cemento e additivo superfluidificante hanno avuto maggiori incrementi di peso per effetto dei trattamenti di gelo-disgelo.

| PROVA | CEMENTO | AGGIUNTA | ADDITIVO | PESO SECCO | PESO SATURO | VAR % |
|-------|---------|-------------|----------|------------|-------------|-------------|
| | | | | (g) | (g) | (%) |
| 16 | CEM I | | SP1 | 2343 | 2453 | 4,69 |
| 19 | CEM I | 5A | SP1 | 2328 | 2404 | 3,26 |
| 20 | CEM I | silica fume | SP1 | 2330 | 2404 | 3,18 |
| 1 | CEM II | | SP1 | 2361 | 2473 | 4,74 |
| 4 | CEM II | 5A | SP1 | 2306 | 2391 | 3,69 |
| 5 | CEM II | silica fume | SP1 | 2351 | 2425 | 3,15 |
| 6 | CEM III | | SP1 | 2355 | 2460 | 4,46 |
| 9 | CEM III | 5A | SP1 | 2314 | 2378 | 2,77 |
| 10 | CEM III | silica fume | SP1 | 2365 | 2427 | 2,62 |

Tab. 5.23 - Aumento peso in percentuale

In figura 5.71 viene evidenziato l'incremento di peso dei provini di calcestruzzo su un istogramma a barre.

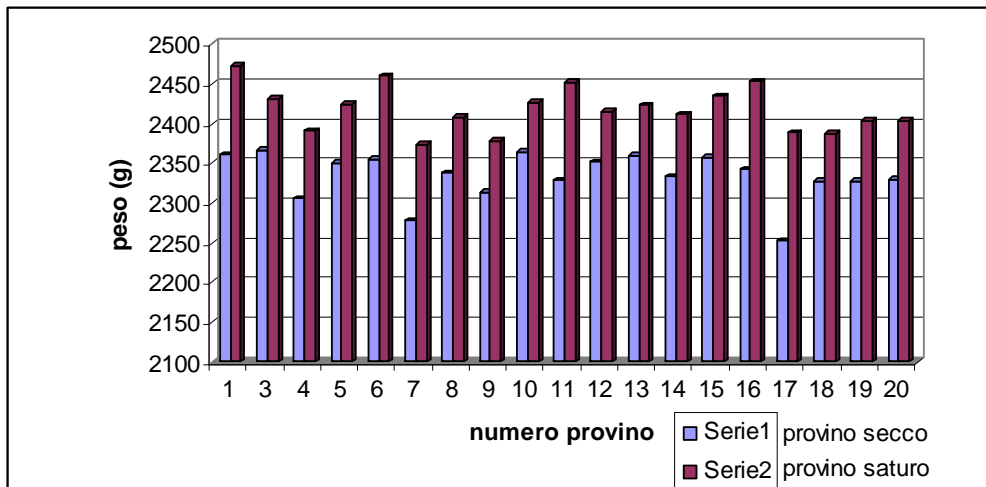


Fig. 5.71 - Pesi iniziali (secco) e durante la prova gelo-disgelo (saturo a superficie asciutta) dei provini di cls.

Alla fine dei cicli di gelo-disgelo è stata determinata la resistenza meccanica di tutti i provini. Quelli che hanno subito maggiori incrementi di peso cioè quelli che si sono dimostrati più porosi adsorbendo un quantitativo maggiore di acqua hanno dimostrato una maggiore variazione di resistenza meccanica (tab. 5.24, fig. 5.73 e fig. 5.74).

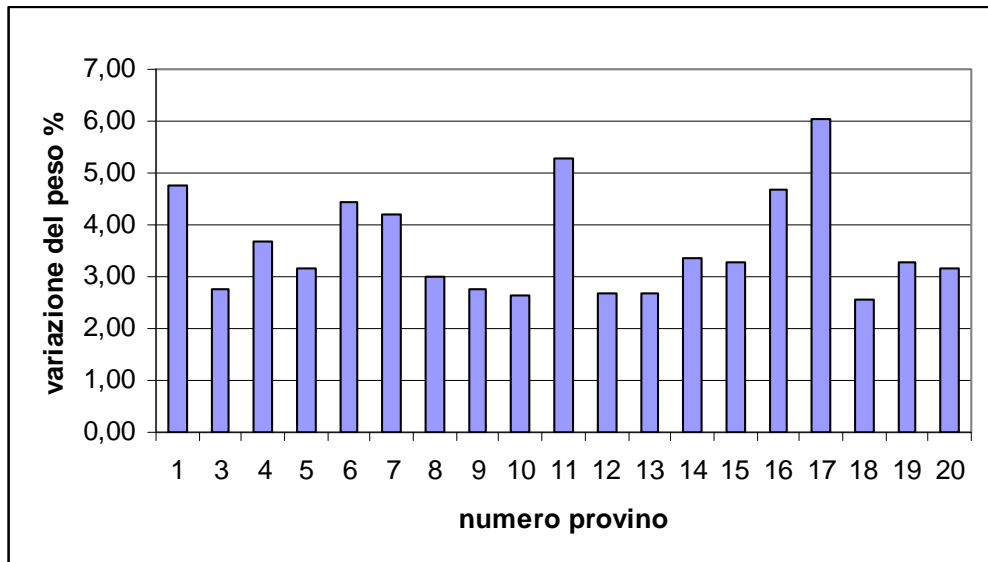


Fig. 5.72 - Variazione percentuale fra il peso iniziale (secco) e il peso finale (saturo a superficie asciutta) dei provini di cls dopo i cicli di gelo- disgelo

Il provino N°17 che ha avuto una variazione di peso maggiore del 6%, ha dato una variazione di resistenza alta rispetto alle altre miscele.

| N PROVINO | Resistenza (Mpa) | | Variazione Resistenza (%) |
|-----------|------------------|------------|---------------------------|
| | 180 Giorni | Dopo ciclo | |
| 1 | 72,6 | 61,55 | -15,22 |
| 3 | 71,73 | 71,21 | -0,72 |
| 4 | 67,27 | 60,55 | -9,99 |
| 5 | 79,44 | 79,3 | -0,18 |
| 6 | 69,87 | 58,76 | -15,90 |
| 7 | 55,15 | 51,81 | -6,06 |
| 8 | 68,12 | 67,71 | -0,60 |
| 9 | 61,23 | 58,28 | -4,82 |
| 10 | 68,87 | 68,1 | -1,12 |
| 11 | 68,77 | 45,36 | -34,04 |
| 12 | 60,42 | 56,21 | -6,97 |
| 13 | 72,92 | 68,51 | -6,05 |
| 14 | 62,20 | 53,8 | -13,50 |
| 15 | 71,43 | 70,91 | -0,73 |
| 16 | 65,46 | 54,55 | -16,67 |
| 17 | 59,74 | 51,78 | -13,32 |
| 18 | 69,81 | 63,63 | -8,85 |
| 19 | 62,36 | 53,70 | -13,89 |
| 20 | 68,50 | 63,15 | -7,81 |

Tab. 5.24 - variazioni % delle resistenze meccaniche dopo i cicli gelo-disgelo

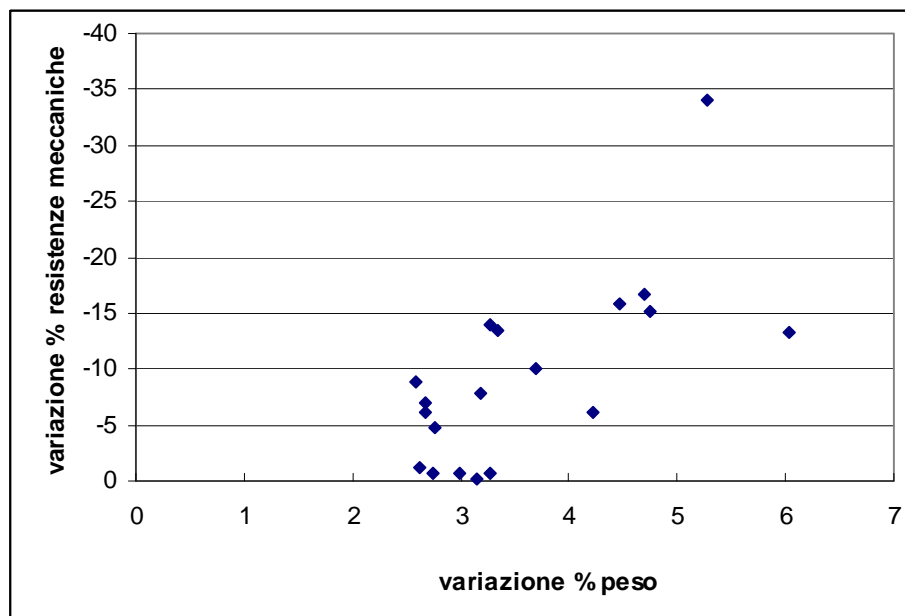


Fig. 5.73 - Variazione % delle resistenze meccaniche in funzione delle variazioni % in peso dei provini sottoposti ai cicli gelo-disgelo;

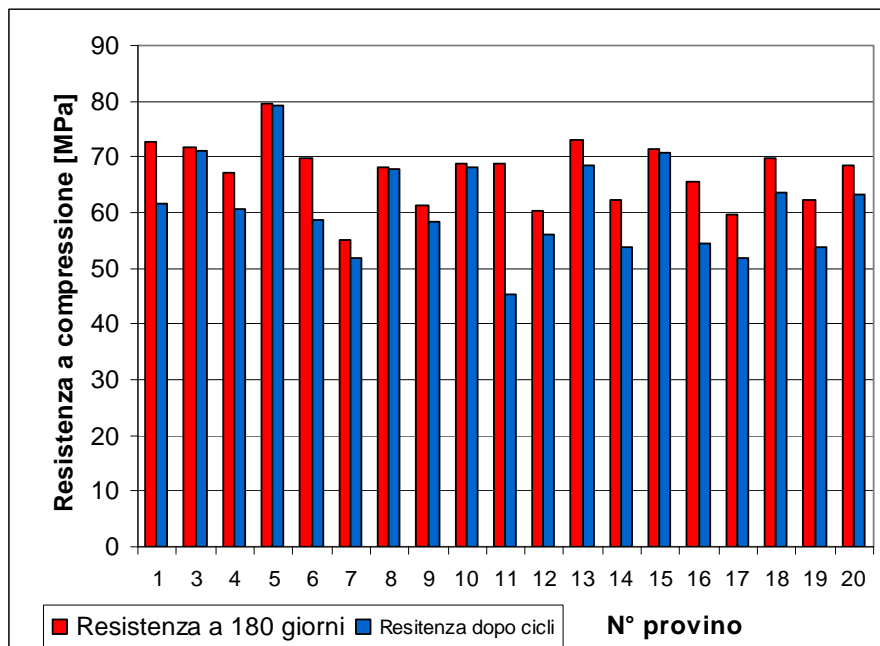


Fig. 5.74 - Resistenza meccanica dei provini di cls stagionati a 180 giorni e dei provini sottoposti ai cicli gelo-disgelo

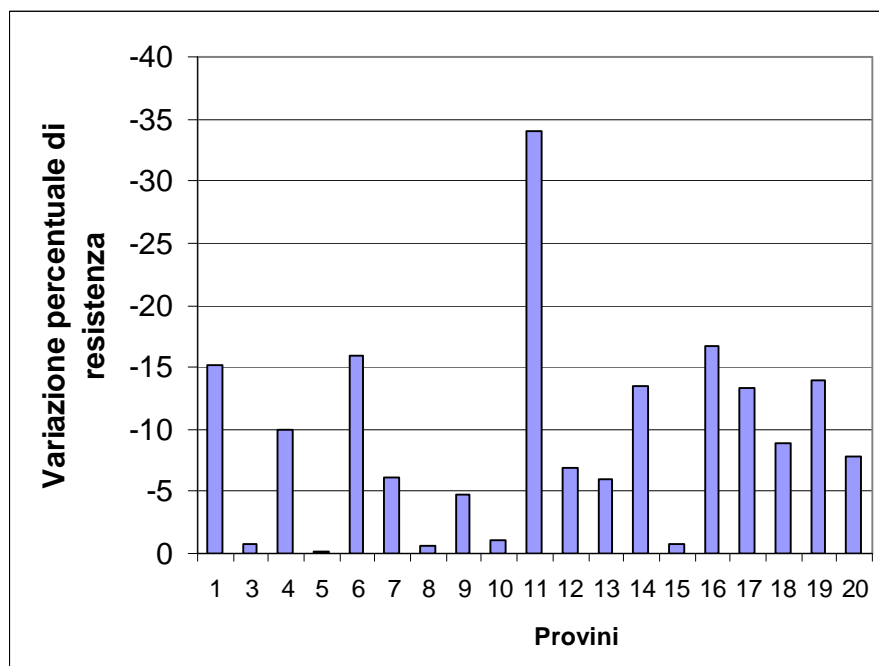


Fig. 5.75 - Variazione % di Resistenza dopo i cicli gelo-disgelo

Nei provini di calcestruzzo realizzati, con i vari tipi di cemento a disposizione, si nota come la variazione della percentuale di resistenza dopo i cicli di gelo e disgelo abbia

valori più bassi dove sono stati utilizzati il fumo di silice e la zeolite rispetto ai provini realizzati senza alcuna aggiunta.

Per cui sia l'aggiunta della zeolite 5A che quella della silice fume nelle miscele comporta l'ottenimento di calcestruzzi con resistenza ai cicli di gelo e disgelo maggiore di quelli confezionati senza aggiunte minerali.

5.6 Ritiro

Durante le varie fasi di presa e di successivo indurimento è sempre presente il ritiro per qualsiasi tipo di conglomerato. Viene evidenziato con una contrazione del volume ed una diminuzione di peso. Il fenomeno del ritiro nei conglomerati cementizi assume due aspetti distinti: la variazione dimensionale connessa con il primo periodo di idratazione del legante. Parte dell'acqua di impasto si combina con il cemento dando luogo ai fenomeni di idratazione; una frazione di acqua può evaporare ed inoltre i prodotti di idratazione hanno volume diverso da quello iniziale, costituito dall'impasto acqua+cemento. La variazione dimensionale complessiva, che risulta nella massa del conglomerato ancora allo stato plastico è chiamata ritiro; nel conglomerato indurito è presente una complessa struttura porosa; la pasta di cemento idratata è ancora capace di cedere o di assumere umidità dall'ambiente esterno con conseguenti variazioni volumetriche.

Per quanto riguarda i provini utilizzati per la valutazione del ritiro l'ambiente di stagionatura è conforme alla normativa UNI 6555-73 (fig. 5.76 b-c).



Fig. 5.76a - Provini di cls per la valutazione del ritiro

Il calcestruzzo, essendo un materiale poroso, si deforma quando varia l'umidità relativa (UR) dell'ambiente. Esso si ritira se esposto all'aria secca, e si rigonfia se sommerso sott'acqua (*swelling*); sostanzialmente solo la pasta di cemento si deforma per le variazioni idrometriche, mentre gli inerti, salvo qualche rarissima eccezione, non presentano alcuna variazione dimensionale connessa con l'umidità relativa dell'ambiente.



Fig. 5.76b - Ambiente di stagionatura dei provini di cls per la valutazione del ritiro



Fig. 5.76c - Disposizione tipica dei provini di cls all'interno della camera -armadio di stagionatura.

Nel calcestruzzo immerso in acqua, il rigonfiamento non è fenomeno particolarmente dannoso, perché la dilatazione ε_d è modesta⁴¹ e perché la tensione di compressione $\sigma_c = E * \varepsilon_d$, che si instaura in caso di vincolo alla dilatazione per la presenza dei ferri o di altri contrasti, non è in grado di superare la resistenza a compressione R_c :

⁴¹ O quasi nulla se il calcestruzzo era saturo prima dell'immersione in acqua.

$$R_c > \sigma_c = E \cdot \varepsilon_d$$

Le ragioni per le quali al ritiro si conferisce un'importanza maggiore che al rigonfiamento sono sostanzialmente due; la prima dipende dal fatto che la variazione dimensionale da ritiro è maggiore di quella provocata dal rigonfiamento; la seconda, sicuramente più importante, è connessa con il fatto che il calcestruzzo presenta una resistenza a trazione molto minore di quella a compressione.

Quindi, in una struttura vincolata, il ritiro induce uno sforzo a trazione, mentre il rigonfiamento una sollecitazione di compressione, cosicché il materiale si fessura appena lo sforzo a trazione supera la resistenza del materiale. Infatti, lo stato fessurativo del materiale è uno dei principali inconvenienti derivanti dal fenomeno del ritiro.

5.6.1 Ritiro igrometrico del calcestruzzo.

Il ritiro da essiccamento, detto anche ritiro igrometrico, del calcestruzzo indurito, dovuto al ritiro della pasta cementizia, è un fenomeno che si manifesta in tutti gli elementi costruttivi a umidità relativa minore del 95%; in pratica in tutte le strutture non immerse. Questo ritiro può essere causa del fenomeno della fessurazione.

Inoltre il ritiro igrometrico, causa perdite di precompressione ed in caso di lastre esposte ad ambienti con umidità diverse, si può anche osservare qualche fenomeno di imbarcamento.

Il ritiro igrometrico si sviluppa lentamente e per tempi molto lunghi. Esso dipende dall'umidità relativa (fig. 5.77); ad umidità relative più basse l'acqua perduta ed il ritiro sono maggiori.

L'entità del ritiro dipende dalla quantità di pasta di cemento, il fenomeno è descritto dall'equazione:

$$r_c = r_p (1-a)^n$$

dove:

r_c = ritiro del calcestruzzo

r_p = ritiro della pasta

a = frazione di volume dell'aggregato

n = coefficiente variabile tra 1,2 e 1,7

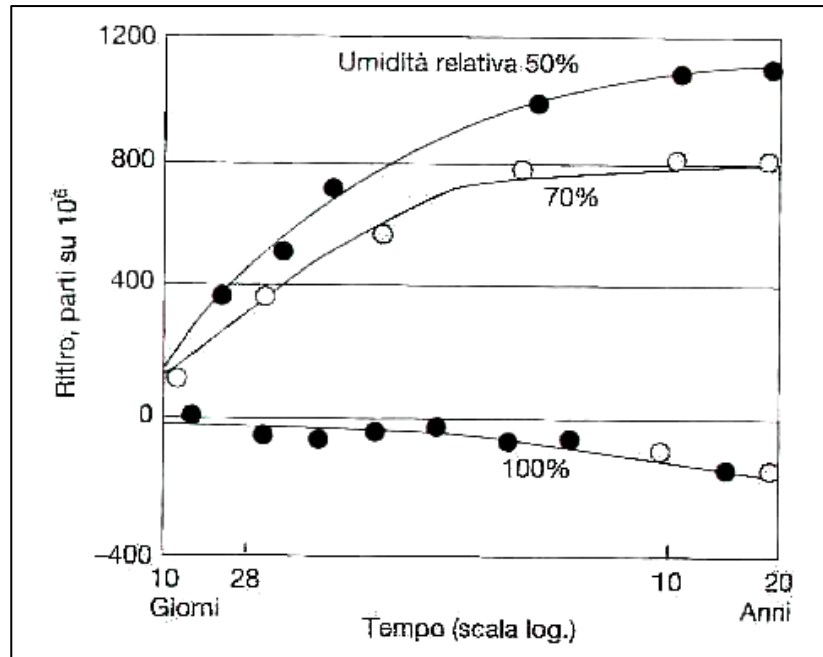


Fig. 5.77 - Sviluppo del ritiro nel tempo a diverse umidità.

Il fattore discriminante sul ritiro è rappresentato dal contenuto dell'acqua. Infatti, l'espressione mostra come impasti aventi pari contenuti d'acqua presentano un ritiro praticamente indipendente dal dosaggio del cemento, per dosaggi inferiori a quelli dell'acqua; mentre a parità di cemento, il ritiro aumenta fortemente al crescere dell'acqua, o comunque del rapporto a/c .

Anche la qualità degli ingredienti, oltre che alla quantità, ha una notevole influenza; infatti, si è osservato come il ritiro risulti essere maggiore per i cementi a più rapido indurimento e con un elevato contenuto di C_3A , anche se questo risulta essere un fattore secondario rispetto sempre alla presenza di acqua.

L'aggregato influisce in vari modi sul ritiro, principalmente con la sua richiesta d'acqua d'impasto, che, in generale varia con il diametro massimo e la distribuzione granulometrica.

Altro aspetto non trascurabile è rappresentato dalla possibilità di deformazione dell'aggregato. Infatti, un aggregato leggero, avendo basso modulo elastico, produce ritiri più elevati dell'aggregato normale. Inoltre, la presenza di materiale argilloso nell'aggregato accresce il ritiro.

Generalmente nell'affrontare un problema così complesso, la valutazione del ritiro igrometrico consta in un calcolo del "ritiro standard", cioè in ambiente e condizioni

standard di laboratorio, ed in una correzione del ritiro standard, mediante l'impiego di opportuni coefficienti per calcolare così il ritiro in condizioni reali .

5.6.2 Ritiro autogeno

Il termine ritiro autogeno fu coniato da C.G. Lyman più di 60 anni fa per indicare il fenomeno di contrazione del calcestruzzo in assenza di variazioni igrometriche e termiche. In altre parole, a differenza del ritiro igrometrico che si manifesta per evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente insaturo di vapore, il ritiro autogeno avviene di per sé, cioè senza che ci sia alcuna perdita di acqua per essiccamento all'aria.

Dalla scoperta di Lyman trascorsero alcuni decenni senza alcuna significativa ricerca sull'argomento. Solo all'inizio degli anni '90 si è riscoperta l'importanza del ritiro autogeno.

Perché in questo stesso periodo acquistarono crescente importanza i calcestruzzi ad alta resistenza (*HSC - High-Strength Concrete*) e cominciano a diffondersi su vasta scala le strutture in *HSC*. Nel corso delle ricerche su queste strutture si è registrato talvolta uno strano fenomeno: il calcestruzzo si fessura ancorché sia conservato sotto acqua ed a temperatura costante. Inoltre, in Giappone emersero altri fatti tutti correlati, in qualche modo, con il ritiro autogeno.

Il primo riguarda i calcestruzzi massivi la cui fessurazione non può essere spiegata completamente solo in base ai gradienti termici generati dal calore di idratazione. Il secondo fatto concerne i calcestruzzi auto-compattanti (*SCC, Self-Compacting Concrete*) il cui comportamento fessurativo non può essere spiegato solo con il ritiro da essiccamento. Infine, si può verificare che in provini di *HSC* sigillati, e quindi incapaci di perdere umidità, la resistenza meccanica a flessione diminuisca nel tempo. E' stato solo nel 1990, dopo sei anni di ricerche, che ci si rese conto che questi strani fenomeni potevano essere spiegati solo attraverso il ritiro autogeno.

Iniziarono, allora, ricerche importanti presso vari organismi e nel 1994 fu anche creato un comitato tecnico dal *Japan Concrete Institute (JCI)* per studiare il ritiro autogeno. Nel giro di tre anni la collaborazione portò alla definizione dei termini tecnici, alla messa a punto dei metodi di misura del ritiro autogeno e della sollecitazione indotta, alla previsione di questo ritiro e della corrispondente sollecitazione sulla base di un modello,

alla elaborazione di un meccanismo di ritiro. Durante queste attività, furono riviste ed aggiornate le Specifiche Tecniche del Calcestruzzo da un comitato della *Japan Society of Civil Engineers (JPCE)*: per la prima volta furono introdotte le prescrizioni per il ritiro autogeno accanto a quelle per il ritiro igrometrico, e fu ufficialmente riconosciuta dalla *JPCE* l'importanza del ritiro autogeno.

Parallelamente, sia in Europa che in Nord America il calcestruzzo ad alta resistenza veniva ampiamente investigato e sono cominciati ad apparire numerosi lavori sul ritiro autogeno del calcestruzzo.

Per favorire lo scambio di informazione sul ritiro autogeno il *JPC* ha organizzato in Giappone un Workshop internazionale ad Hiroshima invitando un centinaio di specialisti di tutto il mondo.

L'obiettivo del Workshop, che era quello di mettere a confronto l'esperienza giapponese con quella europea e nord-americana, è stato pienamente raggiunto e si sono così potuti definire gli argomenti su cui concordare unanimemente e gli aspetti della ricerca ancora da definire. Il ritiro autogeno è la contrazione di volume apparente dovuta alla reazione di idratazione del cemento a partire dal tempo iniziale di presa. Esso non include il ritiro igrometrico dovuto all'evaporazione di acqua, né la contrazione termica da raffreddamento. Il ritiro autogeno è una parte minore del cosiddetto ritiro chimico, cioè quello che accompagna la reazione tra acqua (a) e cemento (c) con formazione di prodotti idratati (h) che occupano un volume minore dei reagenti ($a+c$). Il ritiro autogeno si manifesta per lo più nel periodo tra inizio e fine presa (Fig. 1) mentre è trascurabile durante l'indurimento quando il ritiro chimico si manifesta quasi esclusivamente in forma di porosità capillare.

In sostanza, finché il sistema è plastico-deformabile il ritiro chimico si manifesta attraverso una vera e propria contrazione del volume apparente (ritiro autogeno); quando, invece, si è formato uno scheletro rigido (indurimento) il ritiro chimico si tramuta nella formazione di vuoti interni (pori capillari).

E' noto che nel caso del ritiro igrometrico il fenomeno è dovuto all' evaporazione dell'acqua verso l'ambiente insaturo: nei pori capillari inizialmente saturi di acqua si creano dei menischi che provocano la contrazione della matrice cementizia a causa della tensione capillare.

L'autoessiccazione (*self-desiccation*), che è la causa del ritiro autogeno, è dovuta, invece, alla mancanza di acqua nei micropori della matrice cementizia per la reazione del cemento con una quantità relativamente bassa di acqua (a/c 0,40).

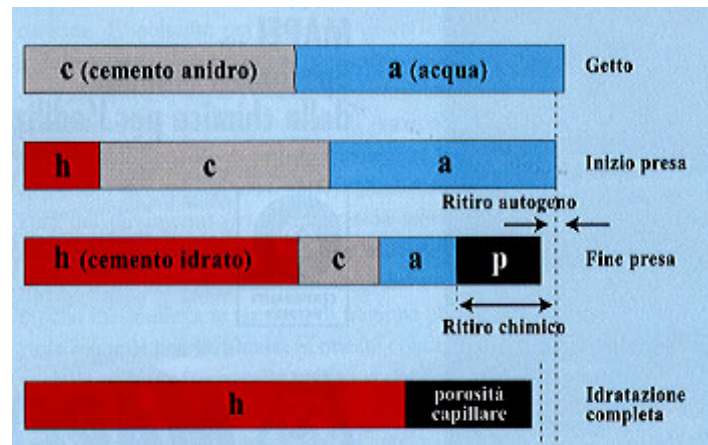


Fig. 5.78 - Ritiro chimico: ritiro autogeno + porosità capillare.

È opinione comune che per i calcestruzzi con resistenza a compressione fino a 80-85 N/mm², la velocità iniziale di ritiro sia maggiore, mentre, dopo i primi tre mesi, il ritiro per i calcestruzzi a bassa ed alta resistenza è all'incirca lo stesso.

Infatti, a causa del relativamente elevato contenuto di cemento e della relativamente bassa quantità di acqua, nei calcestruzzi ad alta resistenza tende a prevalere il ritiro «endogeno» (auto-essiccazione dovuta alla combinazione dell'acqua negli idrati) rispetto al ritiro da «essiccazione» (scambio di acqua con l'ambiente di esposizione), ed il primo fenomeno è più veloce del secondo,

che essendo di natura diffusiva è più lento. Tuttavia la presenza del fumo di silice tende ad accelerare anche il ritiro da essiccazione.

Il prevalere dell'autoessiccazione spiega anche perché il ritiro tenda ad essere approssimativamente proporzionale al volume percentuale d'acqua, piuttosto che al rapporto a/c e perché sia più conveniente ridurre il rapporto a/c grazie all'impiego di superfluidificanti, piuttosto che aumentando il contenuto di cemento.

5.6.3 Influenza dell'additivo sul ritiro.

In generale si può affermare che gli additivi possono influenzare questo fenomeno:

- additivi acceleranti: causano un aumento del ritiro, fino al 50%

- additivi fluidificanti : minore ritiro;
- additivi espansivi: il ritiro può essere ridotto o anche annullato a patto di dosare opportunamente il dosaggio di additivo per fare in modo che l'espansione abbia un valore prossimo al ritiro.

Nel presente lavoro si è utilizzato l'additivo superfluidificante di tipo naftalenico, a base acrilica modificata e policarbossilico. Quindi, per tutti i provini di cls, sono state confezionati rispettando la norma UNI 6555-7 che stabilisce le modalità per la determinazione del ritiro assiale di provini di dimensioni di 10x10x50 cm confezionati in calcestruzzo con inerti della dimensione massima fino a 30 mm.

La preparazione dei provini ha consistito nell'assestare il calcestruzzo, secondo la norma UNI 6129-73 nel caso di calcestruzzo confezionato in laboratorio

5.6.4 Ritiro dei provini

Il Dynamon SP1 è un additivo a base acrilica modificata con il quale si sono ottenuti eccellenti lavorabilità anche a bassi dosaggi. Con l'SP1 sono stati prodotti impasti, rispettivamente con dosaggi 0,5 ed 1%.

Con il dosaggio 0,5% si sono registrati ritiri dell'ordine dei 450 μm , mentre con il dosaggio 1% si assiste dapprima ad un normale ritiro, seguito poi da un rigonfiamento (fig. 5.78).

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ritiro (μm) 0,5% | 120 | 140 | 190 | 250 | 250 | 285 | 330 | 450 | 450 |
| Ritiro (μm) 1% | 550 | 650 | 650 | 700 | 700 | 700 | 570 | 570 | 570 |

Tab. 5.25 - Valori di ritiro dei provini di cls realizzati con l'additivo SP1.

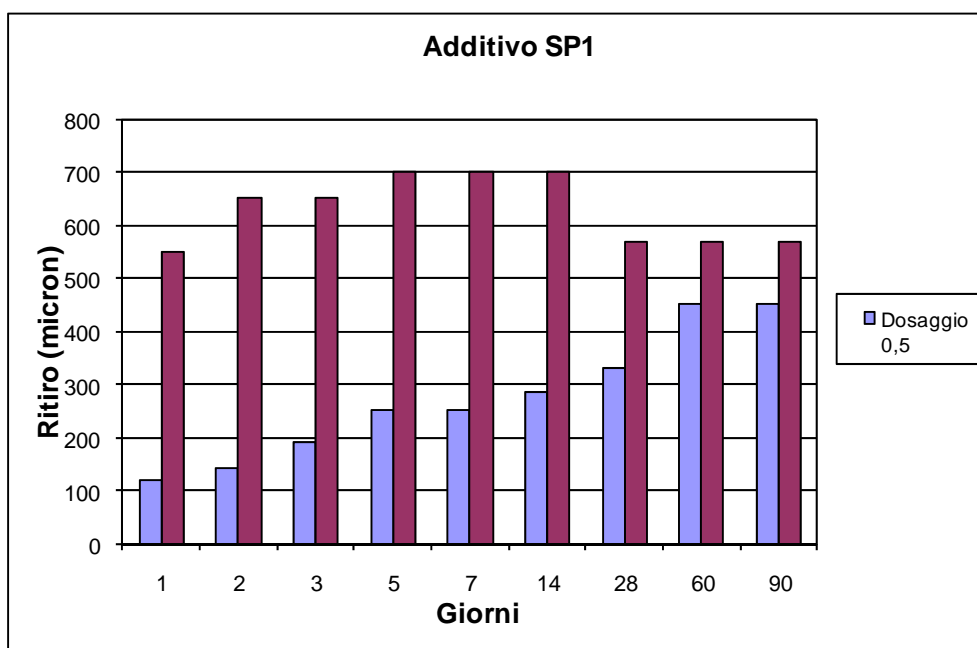


Fig. 5.79 - Andamento del ritiro per i provini di cls realizzati con l'additivo SP1.

5.6.4.1 Ritiro del provino di calcestruzzo privo di additivo.

Si è realizzato inoltre un impasto senza additivo e con un rapporto $a/c=0,50$, registrando un ritiro non trascurabile rispetto alle miscele additivate (fig. 5.80).

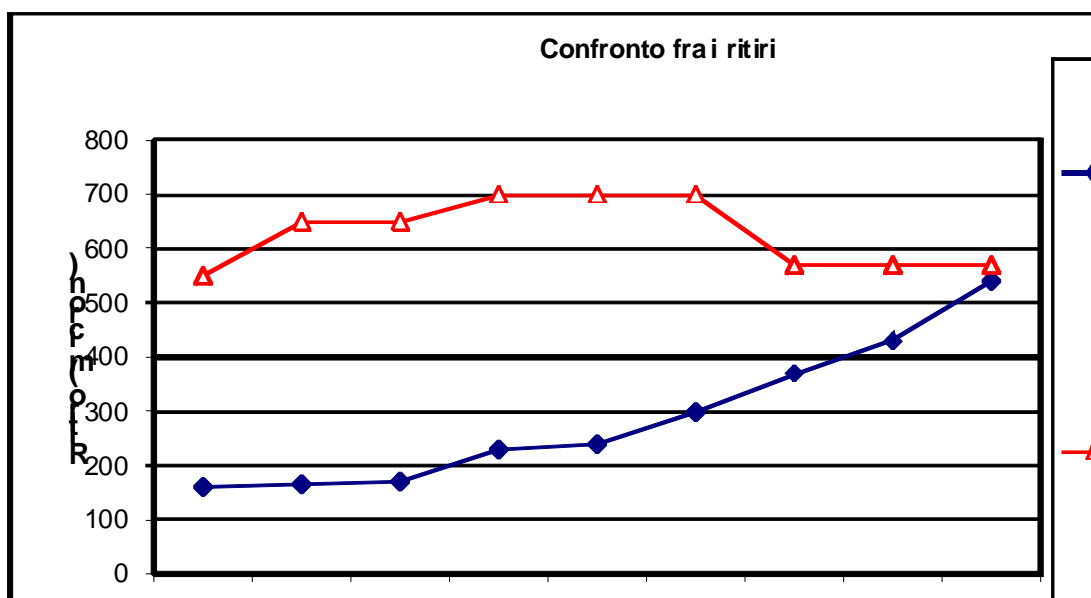


Fig. 5.80 - Andamento del ritiro in funzione del tempo e del tipo di additivo.

Si può concludere che dallo studio effettuato la miscela realizzata con l'additivo SP1 1% è risultata quella migliore, avendo fornito il valore più alto di R_{ck} sia a 28 che a 90 giorni, una migliore lavorabilità, il migliore valore di modulo elastico pari a 4215 KN/cm² ma anche un maggior ritiro, con valori elevati già alle brevi stagionature. Questo fenomeno può essere giustificato da un ritiro di tipo chimico che ha portato il provino cls ad un ritiro maggiore, pari a 700 μm già a 7 giorni per poi rigonfiare sino a 570 μm nel periodo successivo.

CAPITOLO 6

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI

6.1 Premessa

Dopo aver analizzato i calcestruzzi ad alte prestazioni, si è proceduto alla progettazione e realizzazione di miscele di calcestruzzi autocompattanti confezionati con cemento bianco e zeolite 5A. Come confronto sono stati utilizzati fini convenzionali normalmente utilizzati per la realizzazione di SCC grigi. I fini utilizzati sono stati:

- zeolite 5A;
- zeolite 5A e filler calcareo;
- filler calcareo;
- silica fume.

Le materie prime utilizzate sono state reperite nel comprensorio locale senza grandi difficoltà di reperibilità, a dimostrazione che l'SCC è un calcestruzzo “speciale” ma nel contempo realizzabile; scelti i materiali da utilizzare si è proceduto alla progettazione delle miscele nel rispetto della normativa italiana (Norma UNI 11040) e delle “*linee guida per la produzione del calcestruzzo autocompattante SCC*” dell'ATECAP.

Gli impasti sono stati confezionati in fasi successive:

- La prima fase ha riguardato la produzione di impasti di prova per la valutazione qualitativa della compatibilità tra i materiali finissimi utilizzati ed i costituenti ordinari (cemento, aggregato) nella realizzazione degli SCC e per avere indicazione sulle quantità di additivo superfluidificante da impiegare;
- Nella seconda fase sono state valutate le caratteristiche fisico-reologiche del calcestruzzo fresco tramite l'esecuzione di prove quali lo Slump-Flow, il V-Funnel ed il J-Ring;
- La terza e ultima fase ha riguardato la valutazione delle prestazioni meccaniche nel tempo (2 - 7 - 28 giorni).

6.2 Progettazione delle miscele

6.2.1 Materiali

Per la progettazione delle miscele si sono utilizzati materiali ordinari e facilmente reperibili nel comprensorio locale (la stessa zeolite usata è prodotta negli stabilimenti della Sasol Italy S.P.A. di Crotone e della UOP M.S., S.R.L. di Reggio Calabria):

1. *aggregati alluvionali*, aventi dimensione massima di 16 mm.
L'aggregato alluvionale, per le sue peculiari proprietà geometriche, favorisce la fluidità e la scorrevolezza del calcestruzzo autocompattante fresco. Gli aggregati sono stati sottoposti ad accurato lavaggio per eliminare le particelle limo-argillose presenti. La pulizia con acqua corrente evita gli effetti negativi che si potrebbero avere nel calcestruzzo (allo stato plastico e/o indurito) per effetto della presenza di sostanze nocive (cloruri, solfati).
2. *cementi*:
 - CEM II/B-LL 32,5 R, cemento bianco Portland al calcare: è un cemento di miscela come indicato dal numero II, in cui il clinker, che rappresenta il costituente principale del cemento, è presente per valori compresi tra il 65 - 79 %. La lettera LL indica che il tenore di carbonio organico totale (TOC) non deve essere maggiore dello 0,20% in massa, mentre la lettera B indica che la parte minerale può variare tra il 21 - 35 %. Il valore 32,5 indica la classe di resistenza, mentre la lettera R sta ad indicare l'elevata resistenza iniziale.
 - CEM I 52,5 R; è un cemento bianco Portland, come indicato dal numero I, in cui il clinker, che rappresenta il costituente principale, è presente per valori compresi tra il 95 - 100 % (tabella 4.1). Il valore 52,5 indica la classe di resistenza, mentre la lettera R sta ad indicare l'elevata resistenza iniziale.
3. *materiali finissimi*:
 - filler calcareo;
 - zeolite 5A;
 - silica fume Mapeplast SF.

4. *additivo superfluidificante* “Fluid Premia 150” prodotto dalla Chryso con un dosaggio in peso, rispetto al cemento, variabile tra lo 0,8 ÷ 1,8 %;
3. *additivo viscosizzante (Viscofluid SCC/10)* prodotto dalla Mapei, utilizzato in quantità variabile a seconda del finissimo utilizzato, tra 0,0 - 1,0 litri per m³ di impasto.

6.2.2 Proporzionamento e mix-design

Nel rispetto della norma italiana UNI 11040 (*Calcestruzzo autocompattante – specifiche, caratteristiche e controlli*) sono state proporzionate diverse miscele mantenendo costanti le quantità di cemento, di acqua (e quindi mantenendo costante il rapporto a/c), di finissimi e di aggregati. Gli elementi variabili sono stati, di volta in volta, il tipo di cemento utilizzato (due tipi), e la natura del finissimo (zeolite, calcare, miscela di zeolite e calcare con il 50% e 50% rispettivamente e silica fume).

Le prescrizioni fondamentali della norma UNI 11040 e le linee guida dell'ATECAP indicano che:

- il contenuto di finissimi sia compreso tra 500 - 600 Kg/m³;
- il rapporto acqua/finissimi sia compreso tra 0,31 - 0,36;
- il volume di pasta (cemento, aggiunte e finissimi da aggregati) sia almeno di 400 litri/m³.

In base a queste indicazioni sono state utilizzate le seguenti quantità:

- 430 Kg/m³ di cemento;
- 150 Kg/m³ di finissimi;
- 215 Kg/m³ di acqua.

Ottenendo, quindi 580 Kg/m³ di finissimi ed un rapporto acqua/finissimi pari a 0,36, mentre il rapporto a/c è rimasto costante per tutti gli impasti con un valore di 0,50.

6.2.3 Miscele ottimali

Gli impasti ottimali sono stati realizzati riproducendo le miscele ottimizzate degli impasti di prova, aumentando il volume di calcestruzzo confezionato, per poter consentire sia la valutazione delle prove reologiche allo stato fresco atte a definire il calcestruzzo “*autocompattante*”, sia la valutazione delle resistenze meccaniche allo stato indurito.

I dosaggi dei costituenti delle miscele adottate per il confezionamento degli SCC sono riportati nelle tabelle 6.1 - 6.8.

| MISCELA N° 1 | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM II/B-LL 32,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Filler Calcareo | 2,70 | 150 | 55,60 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 4,64 | 4,46 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 415,30 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 194,30 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.1 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 1.

| MISCELA N° 2 | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM II/B-LL 32,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Zeolite 5A | 2,10 | 150 | 71,43 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 6,96 | 6,69 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | / | / |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 431,13 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 210,13 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.2 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 2.

| MISCELA N° 3 | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM II/B-LL 32,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Filler Calcareo | 2,70 | 75 | 27,78 |
| Zeolite 5A | 2,10 | 75 | 35,71 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 4,64 | 4,46 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | 0,5 | 0,5 |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 423,19 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 202,19 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.3 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 3.

| MISCELA N° 4 | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM II/B-LL 32,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Silica fume | 0,60 | 150 | 250 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 8,12 | 7,80 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | / | / |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 609,70 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 388,70 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.4 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 4.

| MISCELA N° 5 | | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM I 52,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Silica fume | 0,60 | 150 | 250 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 9,86 | 9,48 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | / | / |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 609,70 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 388,70 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.5 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 5.

| MISCELA N° 6 | | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM I 52,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Filler Calcareo | 2,70 | 150 | 55,60 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 6,96 | 6,69 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | / | / |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 415,30 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 194,30 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.6 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 6.

L'impasto n.7 di questo tipo di miscela è stato confezionato a umido, introducendo i vari componenti nel seguente ordine:

1. acqua + additivo superfluidificante;
2. aggregati grossi;
3. cemento + filler;
4. sabbia.

Per la seguente miscela è stato ottimizzato anche il tempo di lavorazione dell'impasto che è risultato essere pari a 15 minuti. La miscela ottimizzata è quella riportata nella tabella 6.7 seguente.

| <i>MISCELA N° 7</i> | | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM I 52,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Zeolite 5A | 2,10 | 150 | 71,43 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 6,96 | 6,69 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | / | / |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 431,13 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 210,13 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.7 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 7.

L'impasto n.8 di questo tipo di miscela è stato confezionato, come la miscela 7, a umido, introducendo i vari componenti nel seguente ordine:

1. acqua + additivo superfluidificante;
2. aggregati grossi;
3. cemento + filler;
4. sabbia.

La miscela ottimizzata è quella riportata nella tabella 6.8 seguente.

| <i>MISCELA N° 8</i> | | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| MATERIALE | PESO SPECIFICO (kg/l) | PESO (kg/m³) | VOLUME (l/m³) |
| Cemento CEM I 52,5 R bianco | 3,10 | 430 | 138,70 |
| Acqua | 1,00 | 215 | 215 |
| Filler Calcareo | 2,70 | 75 | 27,78 |
| Zeolite 5A | 2,10 | 75 | 35,71 |
| Additivo Superfluidificante | 1,04 | 5,22 | 5,02 |
| Additivo Viscosizzante | 1,00 | / | / |
| Aria | | | 6,00 |
| φ10 | 2,70 | 270 | 100 |
| φ7,1 | | 225 | 83,33 |
| φ4 | | 284,17 | 105,25 |
| Sabbia | | 781 | 289,26 |
| Aggregati Totali | | 1560,17 | 577,84 |
| Volume Pasta | | | 423,19 |
| a/c | | 0,50 | |
| acqua/finissimi (peso) | | 0,37 | |
| Totale Finissimi | | 580 | 202,19 |
| Volume Totale Miscela | | | ~1000 |

Tab. 6.8 - Costituenti e quantità relativi alla miscela 8.

6.3 Prove sul calcestruzzo autocompattante allo stato fresco

6.3.1 Slump - Flow

La fluidità è indicata in termini di spandimento mediante la prova UNI 11041.

La prova (slump flow test) stabilisce un metodo per la determinazione della consistenza (fluidità) dell'SCC fresco mediante la misura dello spandimento e del tempo necessario a raggiungere il diametro di 500 mm. Viene valutata la distribuzione degli aggregati grossi al fine di recepirne l'omogeneità tra la periferia e la parte centrale dello spandimento raggiunto e l'eventuale presenza di acqua di bleeding. Si misura anche lo spandimento massimo, valutato come media rispetto ad almeno due direzioni ortogonali.



Fig. 6.1 - Prova di spandimento per il calcestruzzo confezionato con cemento bianco CEM I 52,5 R, filler calcareo e zeolite (miscela 8).

Nella tabella 6.9 sono riportati i risultati delle prove di slump flow eseguite sulle varie miscele.

| Miscele | Cemento Bianco | Calcare (%) | Zeolite 5A (%) | Silica fume (%) | Slump Flow | |
|---------|-----------------------|-------------|----------------|-----------------|------------------|--|
| | | | | | Spandimento (mm) | Tempo di spandimento (sec) per raggiungere il diametro di 500 mm |
| 1 | CEM II/B-LL 32,5 R | 100 | 0 | 0 | 740 | 1,82 |
| 2 | CEM II/B-LL 32,5 R | 0 | 100 | 0 | 760 | 6,84 |
| 3 | CEM II/B-LL 32,5 R | 50 | 50 | 0 | 625 | 4 |
| 4 | CEM II/B-LL 32,5 R | 0 | 0 | 100 | 600 | 4,27 |
| 5 | CEM I 52,5 R | 0 | 0 | 100 | 835 | 1,35 |
| 6 | CEM I 52,5 R | 100 | 0 | 0 | 635 | 2,24 |
| 7 | CEM I 52,5 R | 0 | 100 | 0 | 800 | 3,37 |
| 8 | CEM I 52,5 R | 50 | 50 | 0 | 665 | 1,27 |

Tab. 6.9 - Risultati delle prove di Slump Flow eseguite sulle varie miscele.

Nel seguente grafico (fig. 6.2) vengono riportati i raffronti del tempo di spandimento delle varie miscele necessario per il raggiungimento del diametro di 500 mm.

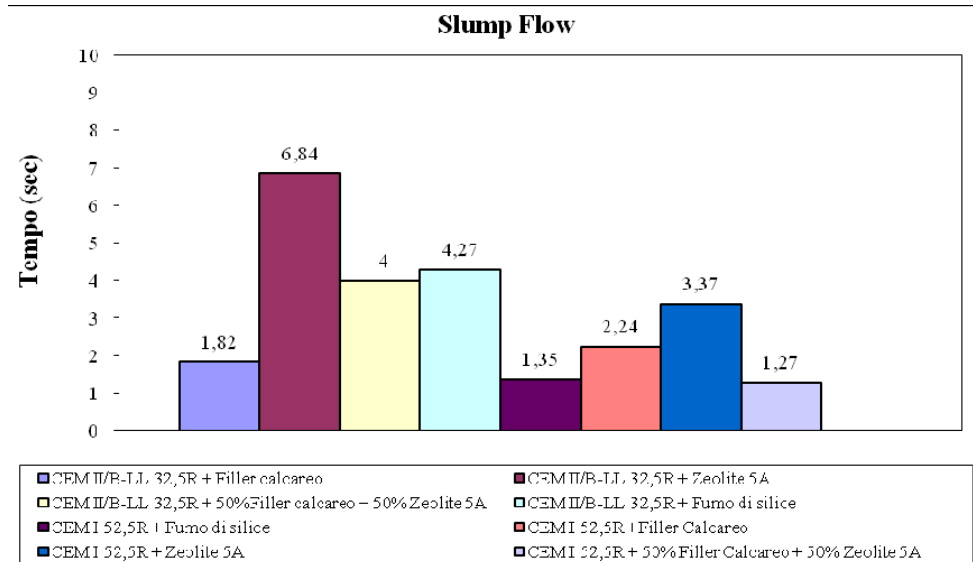


Fig. 6.2 - Tempo di spandimento delle varie miscele per raggiungere il diametro di 500 mm.

Vengono riportati di seguito (fig. 6.3) il diametro di spandimento massimo raggiunto dalle varie miscele.

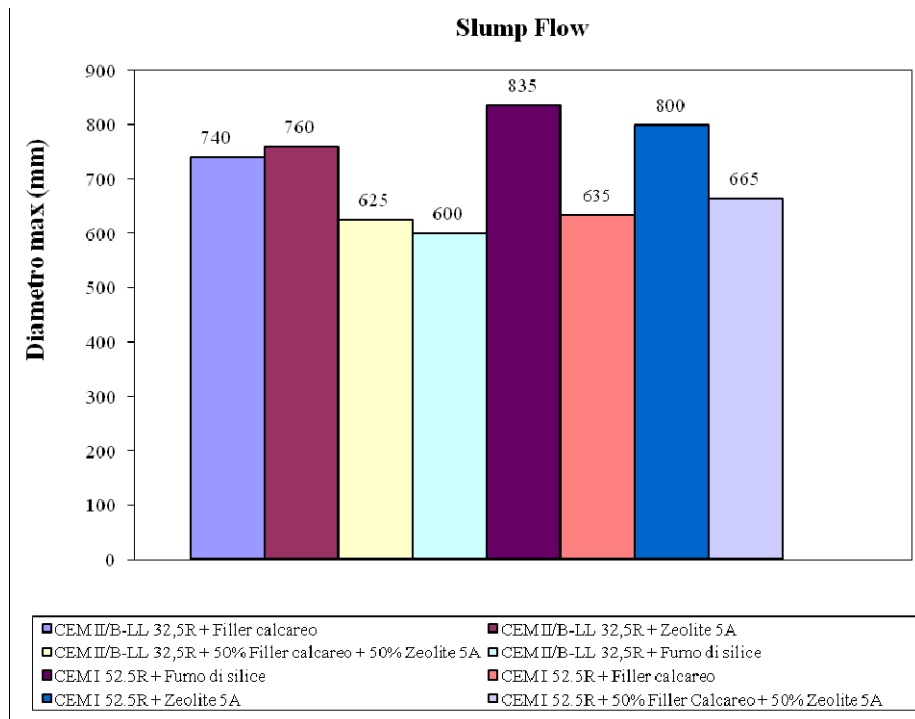


Fig. 6.3 - Diametro di spandimento delle varie miscele.

Per ogni impasto realizzato si ottengono i valori del tempo di spandimento per raggiungere il diametro di 500 mm e del diametro di spandimento massimo raggiunto; questi valori rientrano nei criteri di accettazione per i calcestruzzi autocompattanti.

Dai risultati ottenuti nella prova dello slump flow si evince come gli impasti realizzati con la zeolite siano quelli che presentano tempi di spandimento maggiori (fig. 6.2), mentre il massimo diametro di spandimento viene raggiunto dall'impasto realizzato con il CEM I 52,5 R bianco ed il fumo di silice (miscela 5), anche se il massimo diametro di spandimento raggiunto dall'impasto realizzato con il CEM I 52,5 R bianco e la zeolite 5A (miscela 7) è di poco inferiore (fig. 6.3).

6.3.2 J-Ring

La presente prova stabilisce un metodo per determinare la capacità del calcestruzzo autocompattante di attraversare gli ostacoli. Nella tabella 6.10 sono riportati i risultati ottenuti per le varie miscele.

| Miscela | Cemento Bianco | Calcare (%) | Zeolite 5A (%) | Silica Fume (%) | J-Ring | | | |
|---------|-----------------------|-------------|----------------|-----------------|------------------|--|-------------------|-----------------|
| | | | | | Spandimento (mm) | Tempo di spandimento (sec) per raggiungere il diametro di 500 mm | $\Delta\Phi$ (mm) | Δh (mm) |
| 1 | CEM II/B-LL 32,5 R | 100 | 0 | 0 | 700 | 1,3 | 40 | 10 |
| 2 | CEM II/B-LL 32,5 R | 0 | 100 | 0 | 760 | 6,42 | 0 | 10 |
| 3 | CEM II/B-LL 32,5 R | 50 | 50 | 0 | 500 | 8,97 | 125 | 12 |
| 4 | CEM II/B-LL 32,5 R | 0 | 0 | 100 | 550 | 14,30 | 50 | 8 |
| 5 | CEM I 52,5 R | 0 | 0 | 100 | 790 | 1,93 | 45 | 10 |
| 6 | CEM I 52,5 R | 100 | 0 | 0 | 545 | 4,74 | 90 | 8 |
| 7 | CEM I 52,5 R | 0 | 100 | 0 | 770 | 6,06 | 30 | 12 |
| 8 | CEM I 52,5 R | 50 | 50 | 0 | 550 | 4,97 | 115 | 10 |

Tab. 6.10 - Risultati delle prove di J-Ring eseguite sulle varie miscele.

Con Δh viene indicata la differenza di altezza tra il calcestruzzo all'interno dell'anello a J e i bordi dello steso alla fine dello spandimento.

Non per tutte le miscele si registrano dei valori di fluidità che ricadono nei criteri di accettazione per un SCC, infatti la differenza $\Delta\Phi$ tra lo spandimento ottenuto con la

prova di J-Ring e quello dello Slump Flow non è minore o uguale di 50 mm (come indica la norma UNI 11045). L'impasto realizzato con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco il 50% di filler calcareo e il 50% di zeolite 5A (miscela 3) risulta molto viscoso per la presenza della zeolite e del viscosizzante. Gli impasti confezionati con il CEM I 52,5 R e il 100% di filler calcareo (miscela 6), e quelli con il CEM I 52,5 R bianco e l'aggiunta del 50% di filler calcareo e del 50% di zeolite 5A (miscela 8), risultano più viscosi per effetto della maggiore finezza del cemento e della proprietà viscosizzante della zeolite 5A. Variando i tempi di miscelazione, la quantità degli additivi ed i volumi degli impasti, si possono facilmente ottenere i valori di $\Delta\Phi$ di norma.

A parte gli impasti confezionati con la silica fume, quelli realizzati con la zeolite sono quelli che presentano tempi di spandimento maggiori (fig. 6.4), con conseguente raggiungimento di diametri di spandimento massimi superiori rispetto agli altri impasti (fig. 6.5).

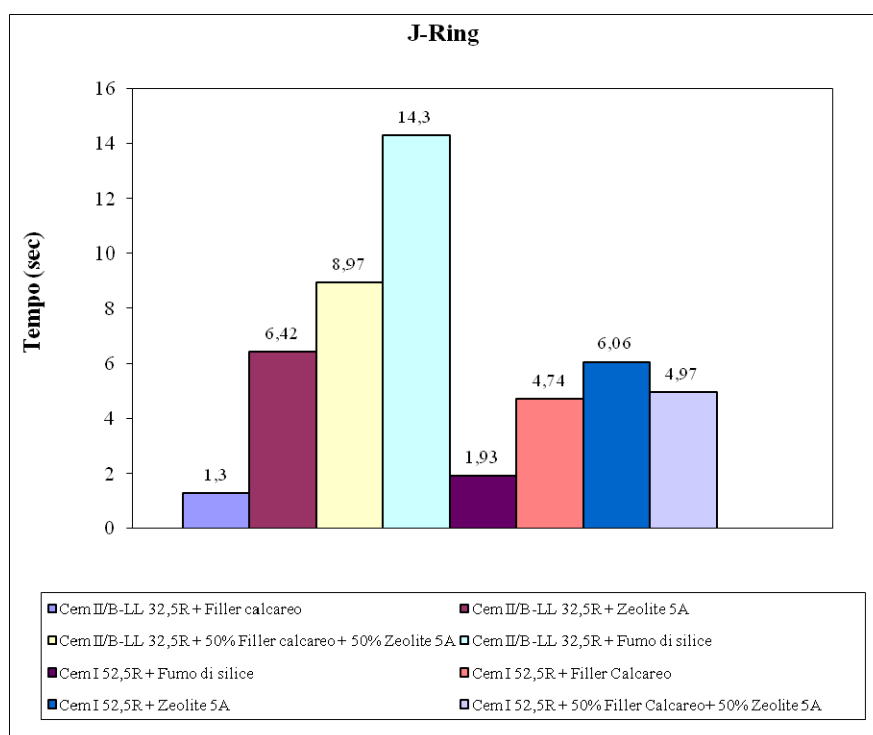


Fig. 6.4 - Tempo di spandimento delle varie miscele.

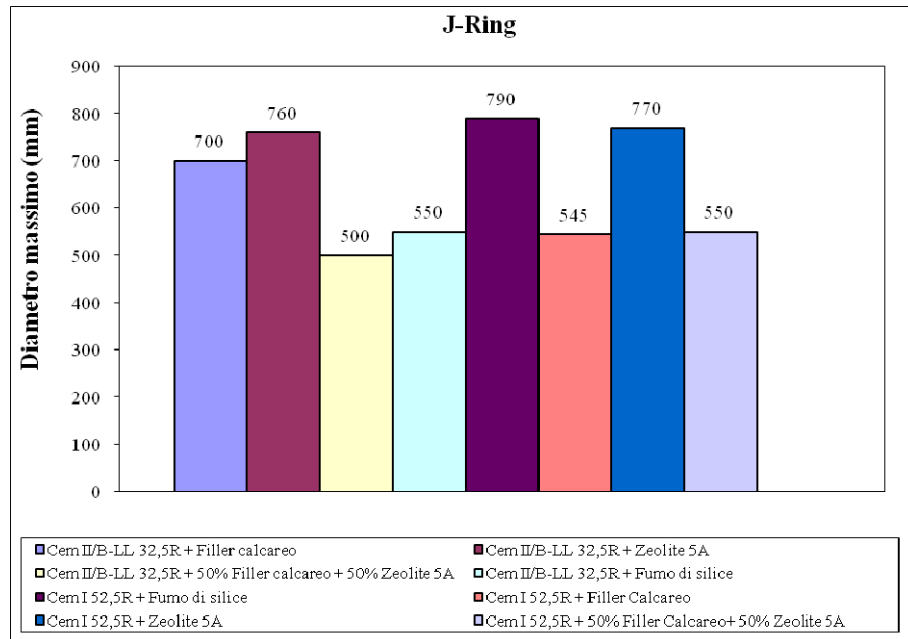


Fig. 6.5 - Diametro di spandimento massimo delle varie miscele.

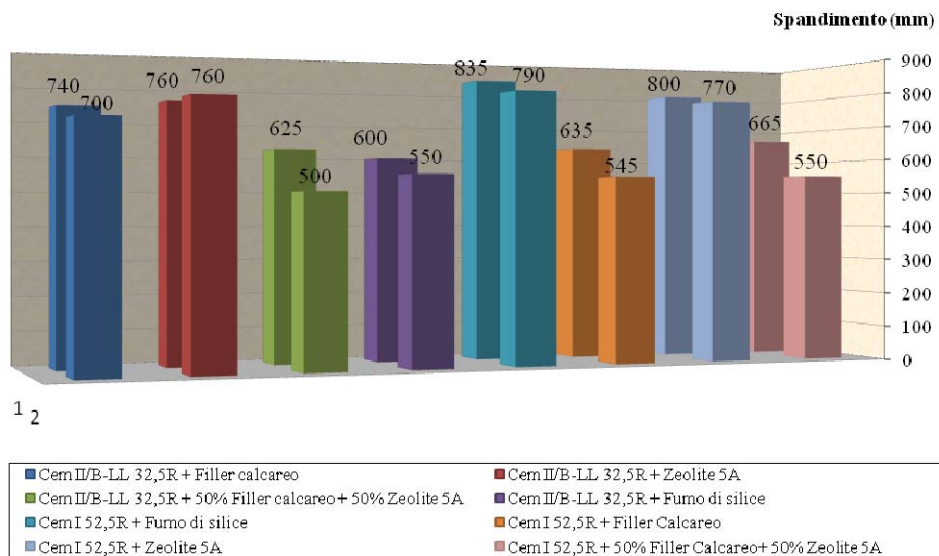


Fig. 6.6 - Confronto tra i diametri di spandimento ottenuti con le prove dello Slump Flow (serie 1) e dello J-Ring (serie 2).

6.3.3 V-Funnel Test

Questa prova misura la lavorabilità in termini di velocità e scorrimento e l'attitudine alla sedimentazione dell'SCC attraverso la determinazione del tempo di efflusso, immediato e dopo 5 minuti di riposo della miscela, da un dispositivo a forma di imbuto. Nella tabella 6.11 sono riportati i risultati ottenuti sulle varie miscele.

| Miscele | Cemento Bianco | Calcare (%) | Zeolite 5A (%) | Silica fume (%) | V-Funnel | |
|---------|--------------------|-------------|----------------|-----------------|-------------------------|---|
| | | | | | Tempo di efflusso (sec) | Tempo di efflusso (sec) dopo 5 minuti di riposo |
| 1 | CEM II/B-LL 32,5 R | 100 | 0 | 0 | 4,66 | 4,60 |
| 2 | CEM II/B-LL 32,5 R | 0 | 100 | 0 | 12 | 21 |
| 3 | CEM II/B-LL 32,5 R | 50 | 50 | 0 | 14 | 19 |
| 4 | CEM II/B-LL 32,5 R | 0 | 0 | 100 | 7 | 7 |
| 5 | CEM I 52,5 R | 0 | 0 | 100 | 4,81 | 5 |
| 6 | CEM I 52,5 R | 100 | 0 | 0 | 6,77 | 8,57 |
| 7 | CEM I 52,5 R | 0 | 100 | 0 | 22,43 | 31,10 |
| 8 | CEM I 52,5 R | 50 | 50 | 0 | 11,70 | 14,55 |

Tab. 6.11 - Risultati delle prove del V-Funnel eseguite sulle varie miscele.

Dai risultati possiamo notare come le miscele 2, 3 e 7 presentano una segregazione maggiore dovuta al fatto che la differenza dei tempi di efflusso è superiore a quella riportata dalla normativa. Anche per queste miscele si possono ottenere dei risultati migliori ottimizzando i tempi d'impasto ed utilizzando volumi superiori a quelli usati per confezionare le miscele.

Vengono riportati di seguito il grafico del V-Funnel Test per un tempo $t = 0$ (tempo iniziale) e quello per un tempo $t = 5$ minuti dall'inizio della prova (figg. 6.7 - 6.8).

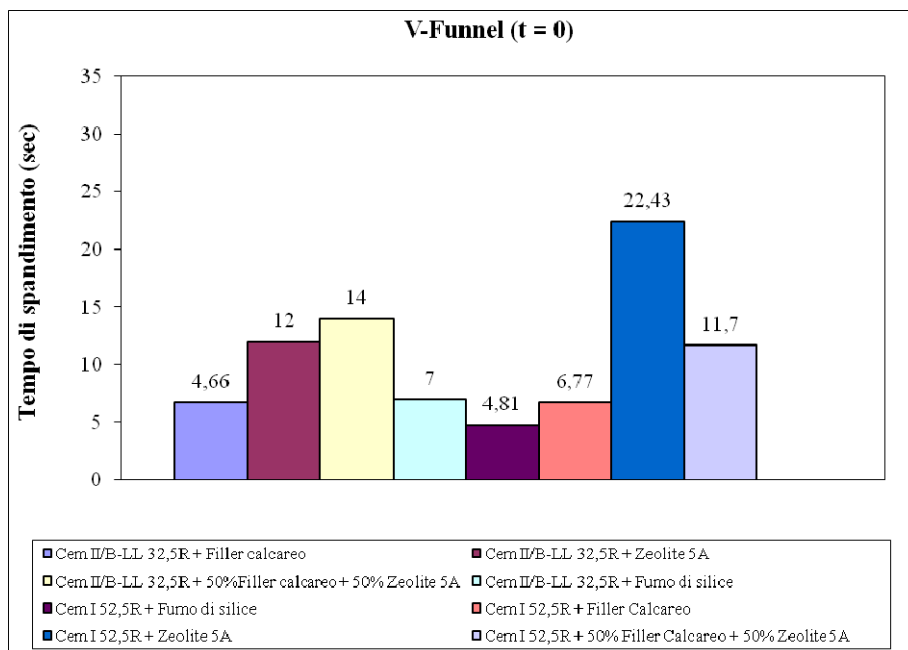


Fig. 6.7 - Tempo di efflusso iniziale per l'esecuzione del V - Funnel Test ad un generico istante $t = 0$.

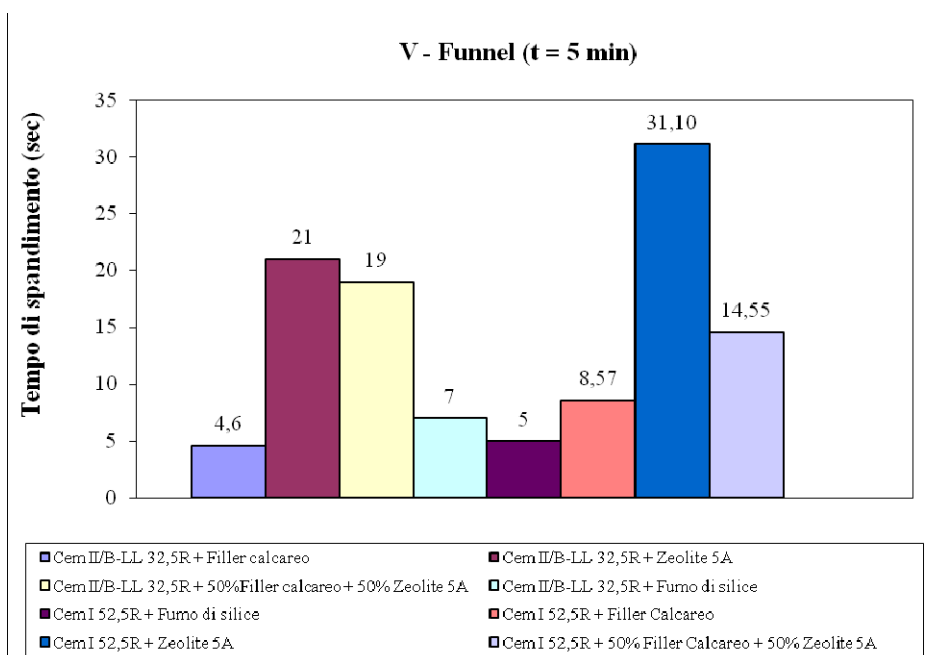


Fig. 6.8 - Tempo di efflusso per l'esecuzione del V - Funnel Test dopo $t = 5$ min.

6.4 Resistenza meccanica

Sono stati realizzati per ogni impasto, dei provini cubici di dimensioni 100mm x 100mm x 100 mm, e stagionati a 20 °C ed umidità relativa maggiore del 95%. Sono state effettuate prove di compressione a 2, 7 e 28 giorni in accordo alla UNI EN 196-1.

Nella tabella 6.12 sono riportati i valori delle resistenze meccaniche a compressione esibiti dai provini realizzati dalle varie miscele ottimali confezionate con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

| Miscele Ottimali | Rc (MPa) 2gg | Rc (Mpa) 7gg | Rc (MPa) 28gg |
|--|-----------------|-----------------|------------------|
| CEM II/B-LL 32,5 R bianco + Filler calcareo (Miscela 1) | 21,55 | 29,96 | 37,725 |
| CEM II/B-LL 32,5 R bianco + Zeolite 5A (Miscela 2) | 32,86 | 45,67 | 52,15 |
| CEM II/B-LL 32,5 R bianco + 50% Filler calcareo + 50% Zeolite 5A (Miscela 3) | 33,36 | 35,82 | 41,495 |
| CEM II/B-LL 32,5 R bianco + Fumo di silice (Miscela 4) | 20,18 | 38,55 | 57,42 |

Tab. 6.12 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati dalle varie miscele definitive confezionate con CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

Nella figura 6.9 viene riportato il grafico delle resistenze meccaniche a compressione dei provini delle varie miscele ottimali confezionate con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

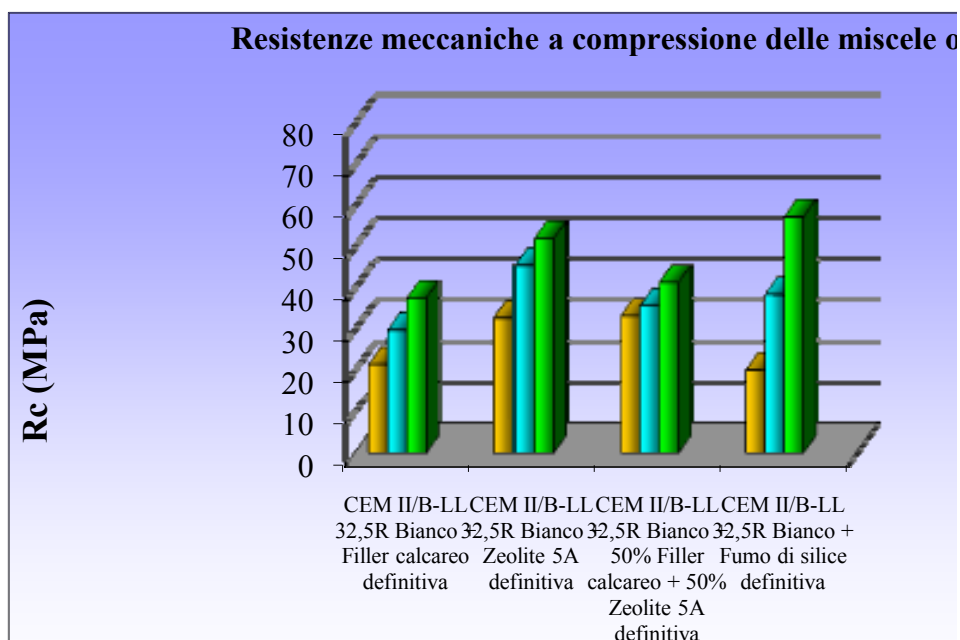


Fig. 6.9 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini delle varie miscele confezionate con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e stagionati a 2, 7 e 28 giorni.

La valutazione dei valori delle resistenze meccaniche a compressione delle miscele fa emergere le seguenti considerazioni:

- per brevi tempi di stagionatura le resistenze meccaniche a compressione più elevate sono esibite dagli impasti di calcestruzzo che prevedono l'uso della zeolite 5A; infatti, sia nel suo singolo impiego che in combinazione con il calcare, la zeolite 5A ha un effetto accelerante sull'indurimento del calcestruzzo;
- alle medie stagionature è confermato l'effetto positivo sullo sviluppo della resistenza meccanica della zeolite 5A. In particolare, l'aggiunta della zeolite 5A migliora sensibilmente le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

I valori di resistenza più elevati a 28 sono esibiti dagli impasti realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e il fumo di silice.

| Miscele Definitive | Rc (MPa) 2gg | Rc (Mpa) 7gg | Rc (MPa) 28gg |
|--|-----------------|-----------------|------------------|
| CEM I 52,5 R bianco+ Fumo di silice (Miscela 5) | 25,68 | 45,62 | 75,26 |
| CEM I 52,5 R bianco+ Filler calcareo (Miscela 6) | 27,02 | 30,54 | 39,25 |
| CEM I 52,5 R bianco+ Zeolite 5A (Miscela 7) | 46,525 | 57,595 | 61,455 |
| CEM I 52,5 R bianco+ 50% Filler calcareo + 50% Zeolite 5A (Miscela 8) | 45,86 | 52,37 | 50,195 |

Tab. 6.13 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzate dalle varie miscele confezionate con CEM I 52,5 R bianco.

Nel seguente grafico vengono riportate le resistenze meccaniche a compressione dei provini delle varie miscele definitive confezionate con il CEM I 52,5 R bianco (fig. 6.10).

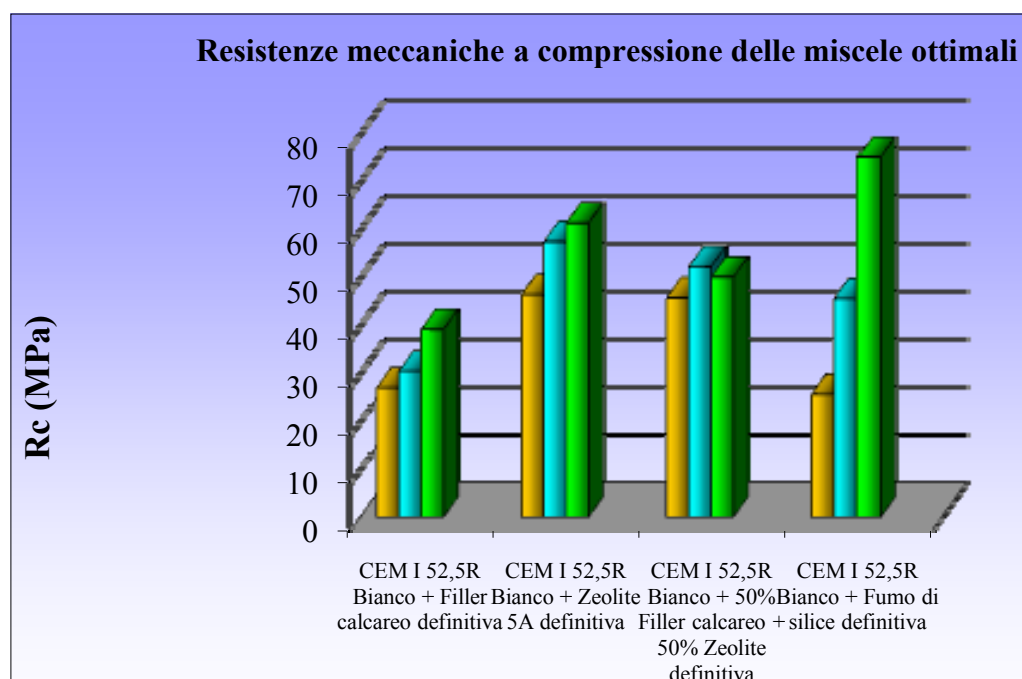


Fig. 6.10 - Resistenze meccaniche a compressione dei provini delle varie miscele confezionate con il CEM I 52,5 R bianco e stagionati a 2, 7 e 28 giorni.

Dalla valutazione dei valori delle resistenze meccaniche a compressione emergono le seguenti considerazioni:

- per brevi tempi di stagionatura le resistenze meccaniche a compressione più elevate sono esibite dagli impasti di calcestruzzo che prevedono l'uso della sola zeolite 5A; sia nel suo singolo impiego che in combinazione con il calcare. La zeolite 5A conferma il suo effetto accelerante sull'indurimento del calcestruzzo;
- alle medie stagionature è confermato l'effetto positivo sullo sviluppo della resistenza meccanica della zeolite 5A. In particolare, l'aggiunta della zeolite 5A migliora sensibilmente le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi realizzati con il CEM I 52,5 R bianco.

I valori di resistenza maggiori a 28 sono esibiti dagli impasti realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e l'aggiunta del fumo di silice.

6.4.1 Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo ai diversi tempi di stagionatura

Nelle figure successive vengono messi in evidenza i confronti tra le resistenze a compressione dei provini di calcestruzzo delle varie miscele confezionate con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco ai diversi tempi di stagionatura (2, 7 e 28 giorni) (figg. 6.11, 6.12 e 6.13).

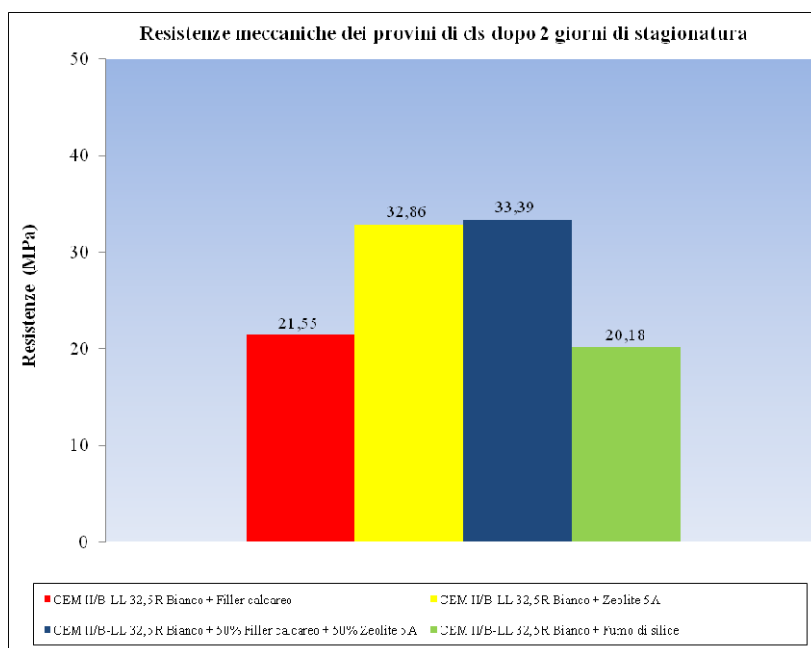


Fig. 6.11 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e i vari fini dopo 2 giorni di stagionatura.

La figura 6.11 evidenzia una resistenza meccanica a 2 giorni dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco ed aggiunta del 50% di filler calcareo e del 50% di zeolite 5A (miscela 3) di poco superiore a quella ottenuta dai provini realizzata con lo stesso cemento e zeolite 5A (miscela 2), così come la resistenza meccanica a compressione dei provini ottenuti con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco (miscela 1) e il Filler calcareo risulta di poco superiore a quella fatta registrare dai provini di cls confezionati con lo stesso tipo di cemento e il fumo di silice (miscela 4). Si può notare che i valori di resistenza più elevati sono stati esibiti dalle miscele contenenti la zeolite 5A, proprio per l'effetto accelerante che essa ha sull'indurimento del calcestruzzo.

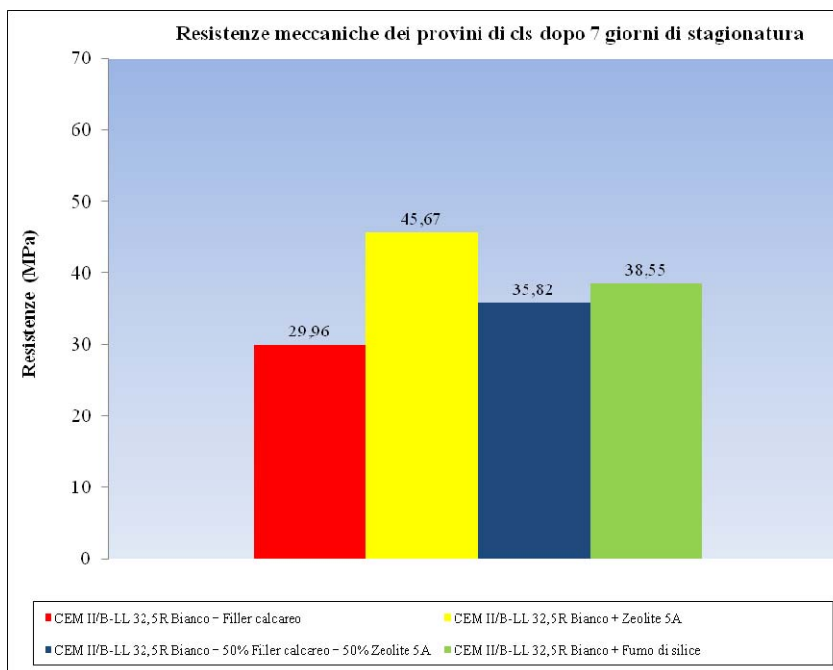


Fig. 6.12 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e i vari fini dopo 7 giorni di stagionatura.

Dal confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo ottenuti dalle miscele definitive confezionate con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco ed i vari fini a 7 giorni di stagionatura viene confermato l'effetto accelerante della zeolite 5A sull'indurimento del calcestruzzo, infatti la resistenza maggiore è stata ottenuta proprio dai provini di cls realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e l'aggiunta della zeolite 5A (miscela 2) (fig. 6.12).

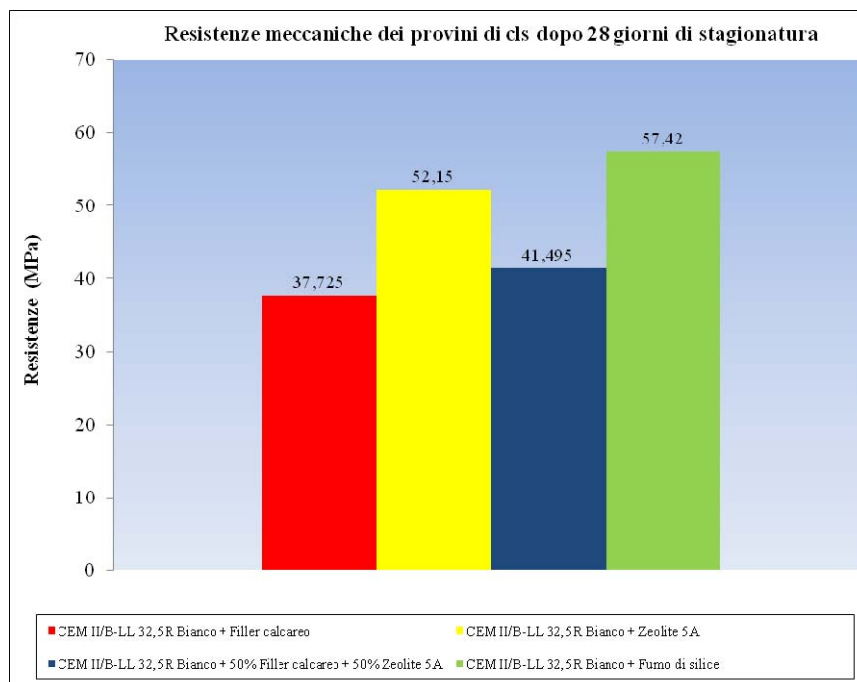


Fig. 6.13 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e i vari fini dopo 28 giorni di stagionatura.

A 28 giorni di stagionatura la resistenza meccanica a compressione più elevata è stata esibita dai provini della miscela confezionati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e l'aggiunta del fumo di silice (miscela 4), anche se di poco superiore a quella fatta registrare dai provini della miscela confezionata con lo stesso tipo di cemento e l'aggiunta della zeolite 5A (miscela 2) (fig. 6.13).

Nelle figure successive vengono confrontate le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco ed i vari fini dopo 2, 7 e 28 giorni di stagionatura (figg. 6.14, 6.15 e 6.16).

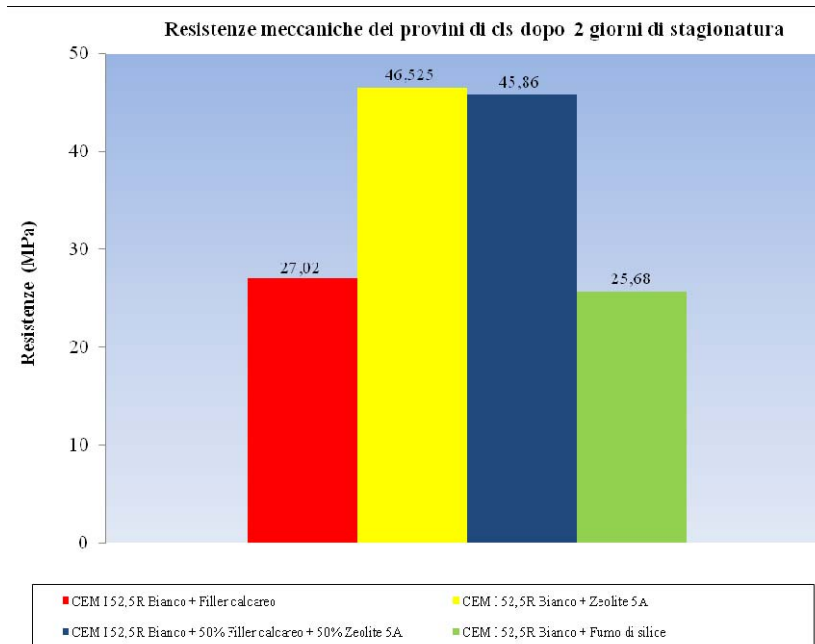


Fig. 6.14 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e i vari fini dopo 2 giorni di stagionatura.

Nelle miscele confezionate con il CEM I 52,5 R bianco l'effetto accelerante della zeolite 5A sull'indurimento del calcestruzzo risulta particolarmente accentuato, per la maggiore finezza del cemento. Tale effetto si traduce in una notevole resistenza meccanica a compressione dei provini dopo 2 giorni di stagionatura. Queste resistenze superano di gran lunga quelle fatte registrare dalle miscele confezionate con lo stesso tipo di cemento e l'aggiunta del solo filler calcareo (miscela 6) e del fumo di silice (miscela 5) (fig. 6.14).

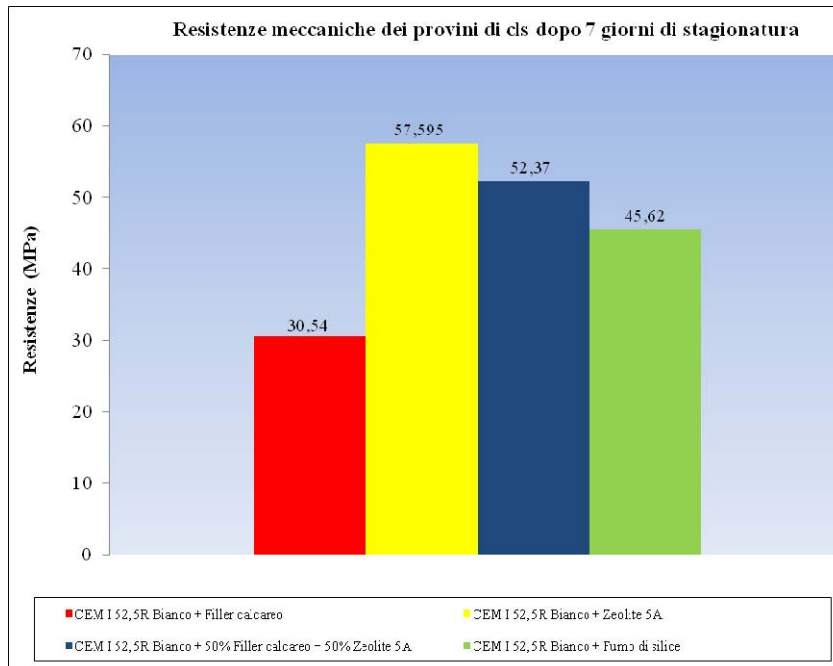


Fig. 6.15 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e i vari fini dopo 7 giorni di stagionatura.

Dalla figura 6.15 si evince una maggiore resistenza meccanica a compressione della miscela confezionata con il CEM I 52,5 R bianco e l'aggiunta della zeolite 5A (miscela 7) rispetto a quelle fatte registrare dalle altre miscele confezionate con lo stesso tipo di cemento. I valori delle resistenze dei provini di calcestruzzo ottenuti dalle miscele contenenti la zeolite sono comunque confrontabili tra di loro. In questo confronto viene messo in evidenza l'effetto accelerante della zeolite sull'indurimento del calcestruzzo confezionato con il CEM I 52,5 R bianco così come avviene per i calcestruzzi confezionati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco.

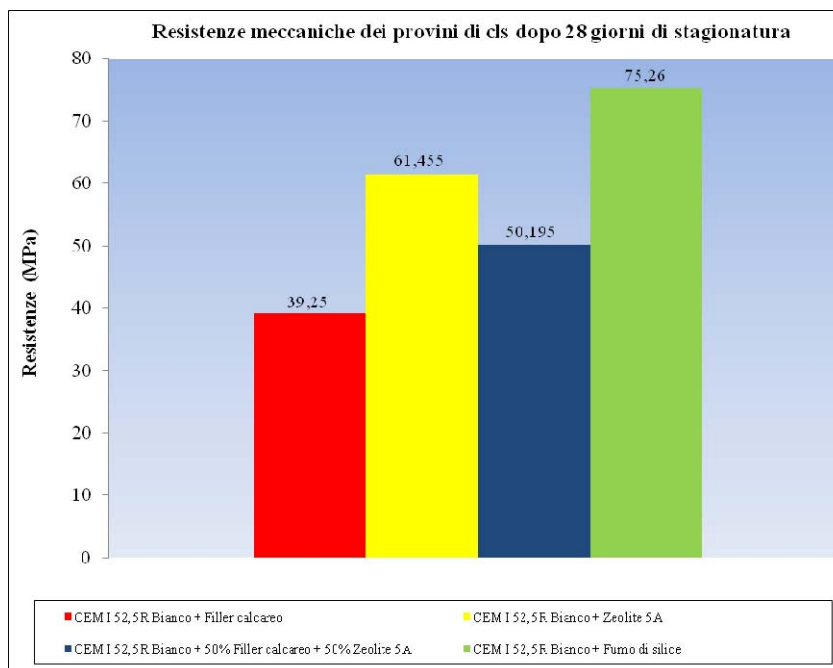


Fig. 6.16 - Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con il CEM I 52,5 R bianco e i vari fini dopo 28 giorni di stagionatura.

Infine, dall'ultimo confronto si registra una maggiore resistenza meccanica a compressione della miscela confezionata con il CEM I 52,5 R Bianco e l'aggiunta del fumo di silice (miscela 5) a 28 giorni di stagionatura, rispetto alle altre miscele confezionate con lo stesso tipo di cemento. Anche in questo caso si può evidenziare l'influenza della zeolite sullo sviluppo delle proprietà meccaniche, in quanto la miscela confezionata con il CEM I 52,5 R Bianco e l'aggiunta della zeolite 5A (miscela 7) ha esibito una resistenza a compressione confrontabile con quella fatta registrare dalla miscela confezionata con l'aggiunta del fumo di silice (fig. 6.16).

6.5 Prove di durabilità: resistenza alla degradazione per i cicli di gelo e disgelo

L'azione del gelo è deleteria per il calcestruzzo poiché trasforma l'acqua contenuta nei pori della matrice cementizia in ghiaccio, provocando un aumento di volume pari a circa il 9 %. Tale aumento di volume, che si verifica con la solidificazione dell'acqua, provoca un innalzamento della pressione nell'acqua non congelata e conseguentemente l'insorgere di stati di coazione all'interno della matrice cementizia e, quindi, rotture nel conglomerato.

L'alternarsi dei cicli di gelo e disgelo provoca quindi l'insorgere di alcune tensioni che generano fessurazioni e sfaldamenti superficiali delle strutture.

Il ghiaccio che si forma all'interno della matrice cementizia esercita una pressione (idraulica e osmotica) che, se supera localmente il valore della resistenza a trazione del materiale, provoca inevitabilmente la rottura del materiale stesso.

6.5.1 Procedimento della prova e risultati.

Sono stati eseguiti 220 cicli di gelo e disgelo sui provini riportati nella tabella 5.8.

| Provino | Cemento | Additivo (%) | Viscosizzante (Kg/m ³) | Calcare (%) | Zeolite (%) | Fumo di silice(%) |
|---------|--------------------|--------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------------|
| A | CEM II/B-LL 32,5 R | 0,80 | 1 | 100 | 0 | 0 |
| B | CEM II/B-LL 32,5 R | 0,80 | 1 | 50 | 50 | 0 |
| C | CEM II/B-LL 32,5 R | 1,20 | | 0 | 100 | 0 |
| D | CEM I 52,5 R | 0,60 | | 100 | 0 | 0 |
| E | CEM I 52,5 R | 0,90 | | 50 | 50 | 0 |
| I | CEM I 52,5 R | 1,30 | | 0 | 100 | 0 |
| Q | CEM I 52,5 R | 1 | | 0 | 100 | 0 |

Tab. 6.14 - Provini di calcestruzzo confezionati.

Per il provino Q sono state ridotte le quantità di aggregato grosso, sabbia e finissimo (zeolite) al fine di ottenere un impasto più lavorabile

I provini hanno subito delle escursioni termiche secondo un ciclo costituito da due fasi, gelo e disgelo, ognuna della durata di 12 ore:

1. i provini sono stati introdotti nella cella frigorifera alla temperatura di -25 °C per 12 ore;
2. i provini sono stati introdotti in acqua termostata alla temperatura di 5 °C, per 12 ore.

I provini di calcestruzzo sono stati pesati prima di essere sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, una prima pesata è stata effettuata allo scadere dei primi 5 cicli, come da normativa, e le successive pesate (pesi saturi) sono state effettuate con regolarità sempre secondo normativa.

Nella tabella 6.15 si riportano i pesi dei provini prima dell'inizio dei cicli di gelo e disgelo e nella tabella 6.16 i pesi saturi dei provini rilevati ad ogni misurazione eseguita durante i cicli (è stata fatta la media dei pesi relativi ai due provini a disposizione per ogni impasto).

| Provino | Peso iniziale (gr) |
|---------|--------------------|
| A | 2.354 |
| B | 2.358 |
| C | 2.342 |
| D | 2.348 |
| E | 2.358 |
| I | 2.426 |
| Q | 2.392 |

Tab. 6.15 - Peso iniziale dei provini sottoposti ai cicli di gelo e disgelo

| Provino | PESATE (gr) | | | | | | | | | |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | 6 ^a | 7 ^a | 8 ^a | 9 ^a | 10 ^a |
| A | 2.366 | 2.369 | 2.372 | 2.376 | 2.374 | 2.366 | 2.360 | 2.310 | 2.253 | 2.170 |
| B | 2.362 | 2.361 | 2.363 | 2.365 | 2.363 | 2.362 | 2.364 | 2.361 | 2.363 | 2.363 |
| C | 2.344 | 2.348 | 2.347 | 2.345 | 2.345 | 2.342 | 2.346 | 2.343 | 2.355 | 2.350 |
| D | 2.354 | 2.358 | 2.356 | 2.356 | 2.356 | 2.358 | 2.359 | 2.353 | 2.357 | 2.354 |
| E | 2.364 | 2.368 | 2.366 | 2.367 | 2.366 | 2.366 | 2.371 | 2.363 | 2.370 | 2.366 |
| I | 2.427 | 2.429 | 2.428 | 2.428 | 2.427 | 2.426 | 2.429 | 2.421 | 2.430 | 2.426 |
| Q | 2.395 | 2.398 | 2.397 | 2.397 | 2.395 | 2.397 | 2.397 | 2.391 | 2.395 | 2.393 |

Tab. 6.16 - Pesi dei provini saturi a superficie asciutta, rilevati durante i cicli di gelo e disgelo.

Nelle figure 6.17 e 6.18 vengono riportati gli andamenti delle variazioni dei pesi dei provini realizzati rispettivamente con il CEM II/B-LL 32,5 R e con il CEM I 52,5 R.

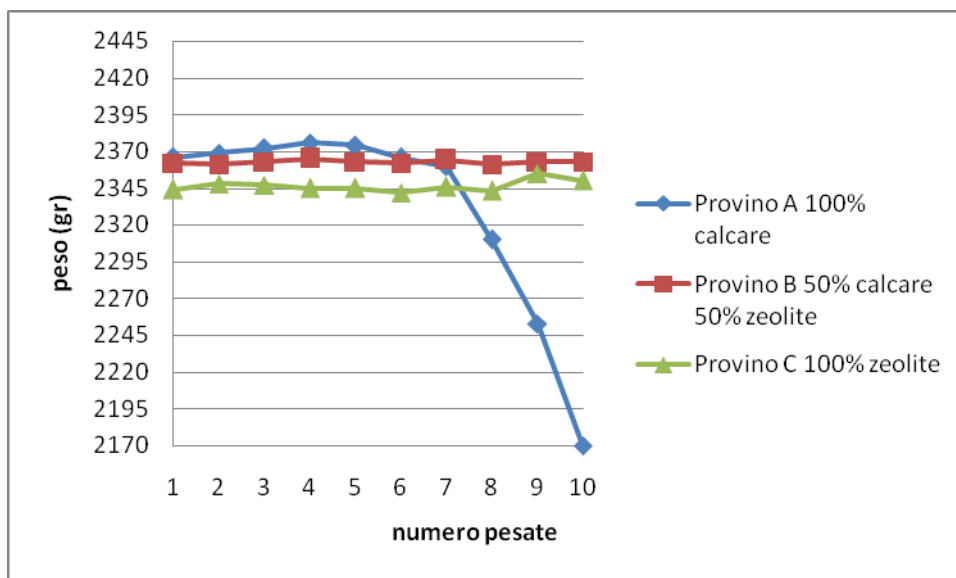


Fig. 6.17-Pesi dei provini di calcestruzzo saturi a superficie asciutta confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R.

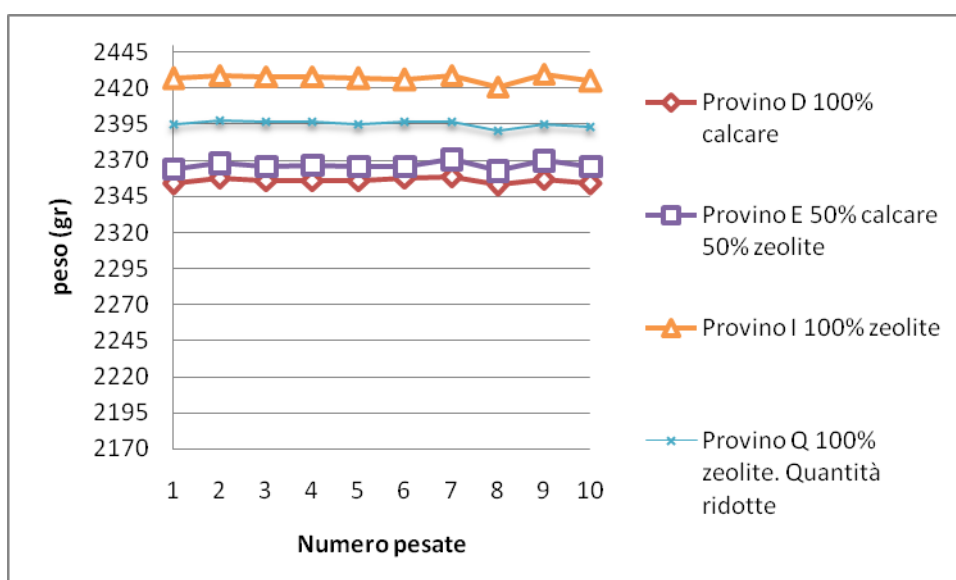


Fig. 6.18 - Pesi dei provini di calcestruzzo saturi a superficie asciutta confezionati con CEM I 52,2 R.

Dalle due precedenti figure si nota che i pesi dei provini sottoposti ai cicli di gelo e disgelo non hanno subito sostanziali variazioni, indipendentemente dal tipo di aggiunta utilizzata per il loro confezionamento.

Uno dei due provini A, confezionati con CEM II/B-LL 32,5 e aggiunta di filler calcareo, ha mostrato un comportamento diverso rispetto agli altri provini, registrando una perdita di peso iniziale pari a circa l'8%, dovuta probabilmente ad una cattiva autocostipazione (fig.6.19).

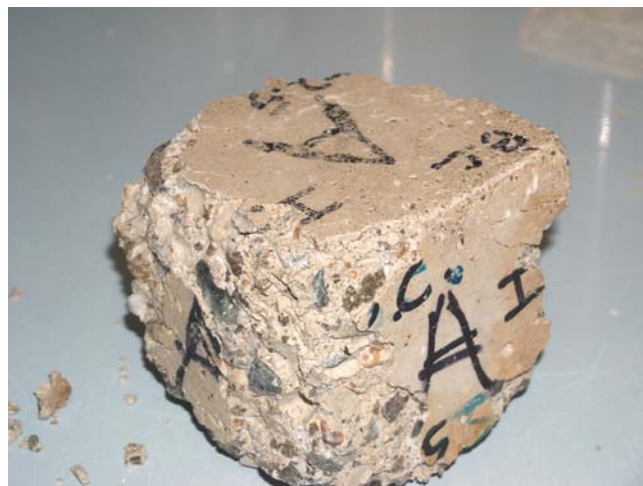


Fig. 6.19 - Provino A attaccato dal gelo.

Per valutare meglio i dati sperimentali ottenuti è riportato nella tabella 6.17 l'aumento in peso dei provini dopo i 220 cicli. Fatta eccezione per il provino A (che ha subito una sostanziale perdita di peso e di volume), la percentuale dell'aumento in peso di tutti i provini confezionati è inferiore all'1%, indice di una scarsa porosità del materiale.

| Provino | Aumento peso (%) |
|---------|-------------------------------|
| A | Diminuzione ($\approx 8\%$) |
| B | 0,21 |
| C | 0,34 |
| D | 0,25 |
| E | 0,34 |
| I | 0 |
| Q | 0,04 |

Tab. 6.17 - Aumento percentuale dei pesi dopo 220 cicli

Nelle figure 6.20, 6.21 e 6.22 sono riportati rispettivamente i pesi iniziali ed i pesi finali (dopo 220 cicli) dei provini confezionati con aggiunta di zeolite e con i due tipi di cementi utilizzati, CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R, (provini C, I, Q), dei provini confezionati con filler calcareo e con i due tipi di cementi (provini A e D) e dei provini confezionati con filler calcareo - zeolite e con i due tipi di cementi (provini B ed E).

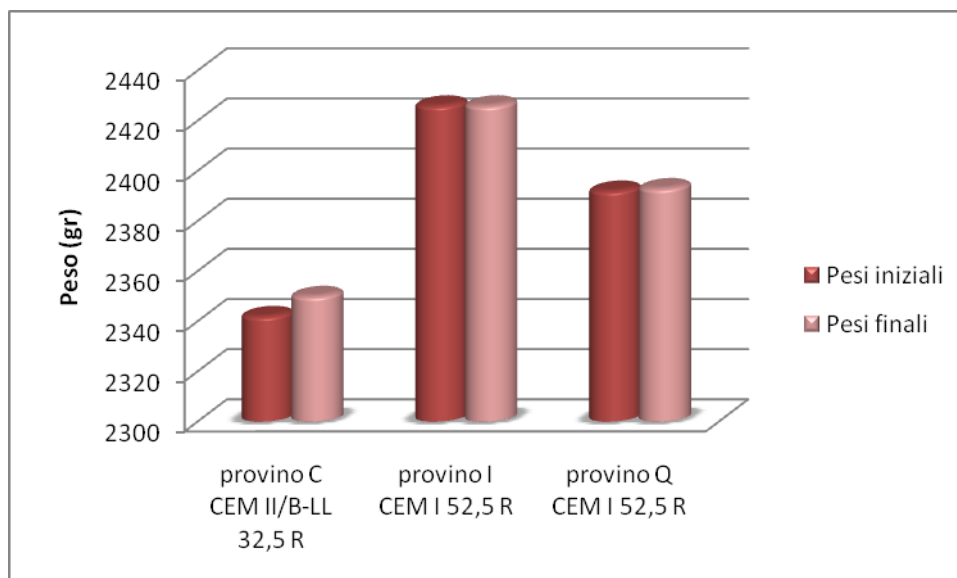


Fig. 6.20 - Peso iniziale e peso finale (dopo 220 cicli) dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di zeolite, il provino Q presenta quantità ridotte di tutti i suoi costituenti.

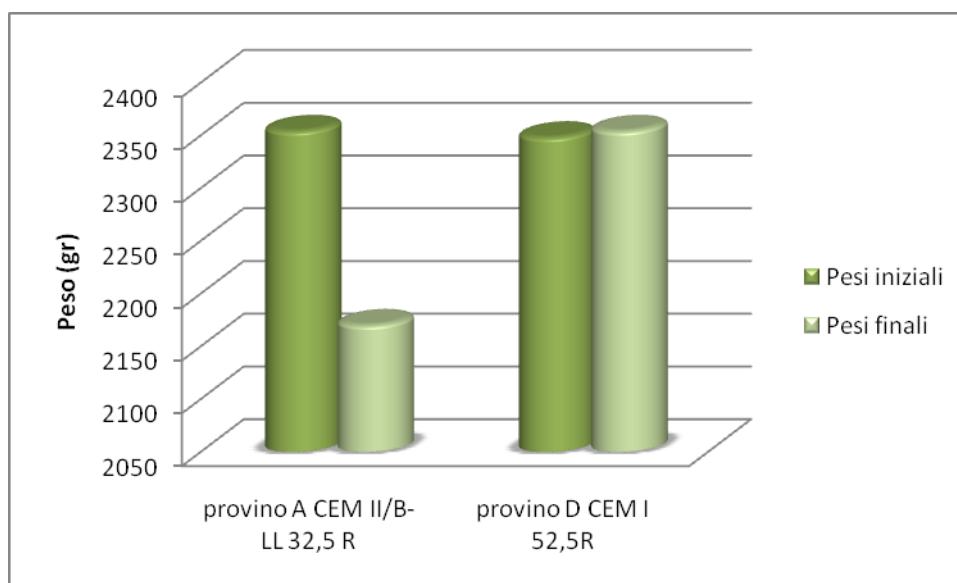


Fig. 6.21 - Peso iniziale e peso finale (dopo 220 cicli) dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo.

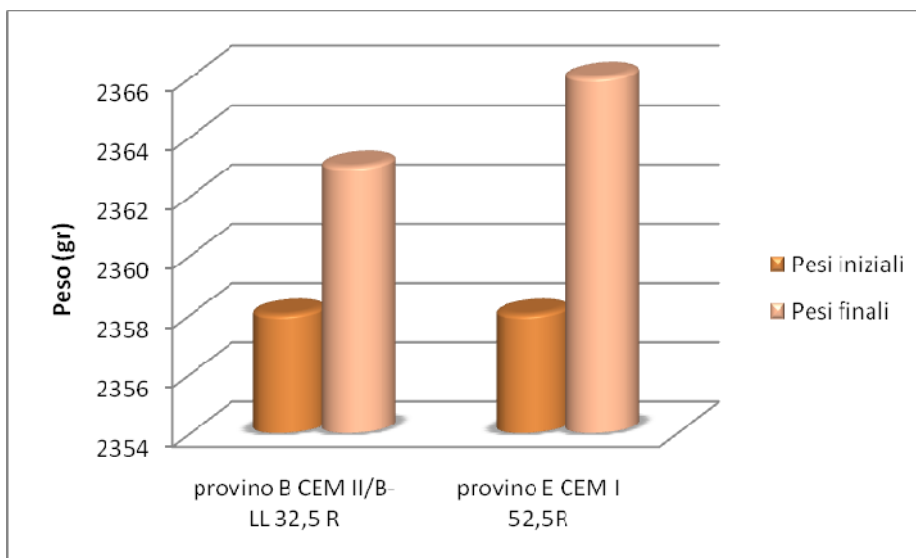


Fig. 6.22 - Peso iniziale e peso finale (dopo 220 cicli) dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo e zeolite.

I provini di calcestruzzo che presentano un più rilevante aumento di peso sono quelli confezionati con aggiunta di filler calcareo e zeolite, indipendentemente dal tipo di cemento utilizzato.

Nelle figure 6.23, 6.24 e 6.25 sono riportate le variazioni percentuali tra i pesi misurati prima dell'inizio dei cicli di gelo e disgelo ed i pesi dei provini saturi relativi all'ultima misurazione eseguita, rispettivamente per i provini confezionati con zeolite, filler calcareo e misti filler calcareo-zeoliti.

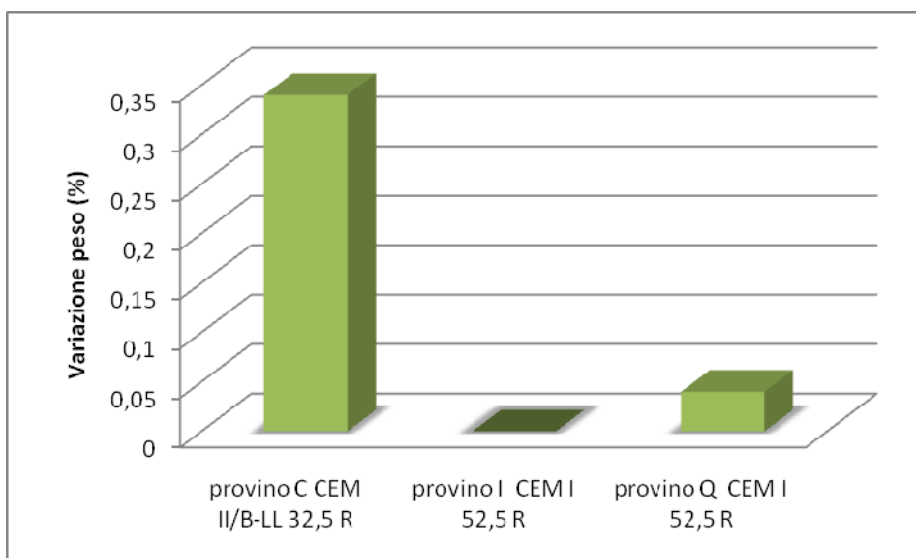


Fig. 6.23 - Variazione percentuale del peso iniziale dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di zeolite, dopo i cicli di gelo e disgelo, il provino Q presenta quantità ridotte di tutti i suoi costituenti.

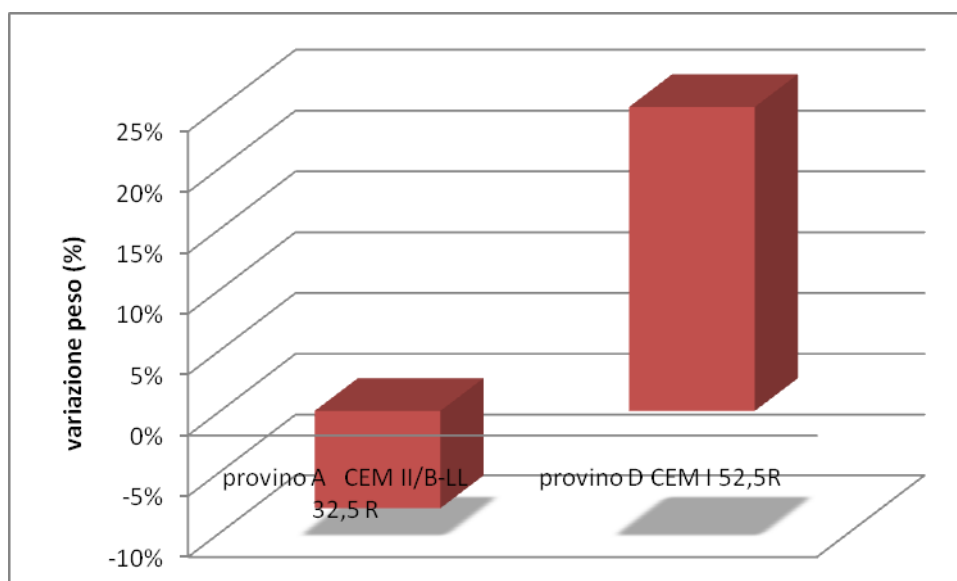


Fig. 6.24 - Variazione percentuale del peso iniziale dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo, dopo i cicli di gelo e disgelo.

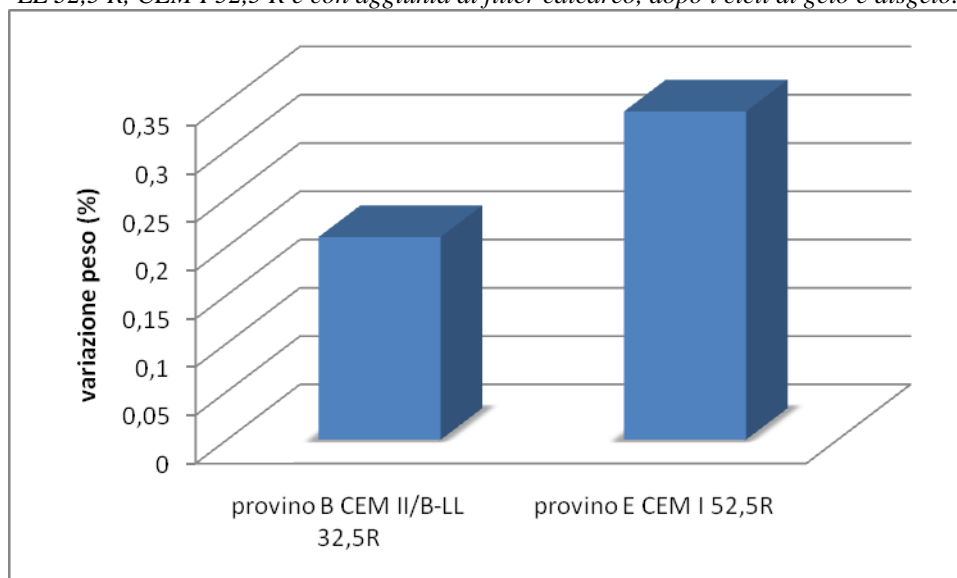


Fig. 6.25 - Variazione percentuale del peso iniziale dei provini di calcestruzzo confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R, CEM I 52,5 R e con aggiunta di filler calcareo e zeolite, dopo i cicli di gelo e disgelo.

Dopo i cicli di gelo e disgelo, i provini di calcestruzzo sono stati sottoposti alla prova di rottura a compressione. Le prove sono state eseguite secondo la norma UNI 6132-72.

I valori delle resistenze meccaniche a compressione sono riportati nella tabella 6.18.

| Provino | Resistenza meccanica a compressione (MPa) | | |
|---------|---|------------|--------------|
| | 90 giorni | 120 giorni | dopo i cicli |
| | | | |

| | | | |
|----------|-------|-------|-------|
| A | 41,50 | 41,04 | 16,30 |
| B | 45,98 | 44,91 | 31,85 |
| C | 52,3 | 52,7 | 31,56 |
| D | 49,77 | 47,09 | 38,83 |
| E | 60,06 | 61,17 | 44,70 |
| I | 69,02 | 65,41 | 49,37 |
| Q | 61,33 | 59,45 | 47,71 |

Tab. 6.18 - Valori della resistenza meccanica dei provini di calcestruzzo stagionati a 90 giorni e a 120 giorni e sottoposti ai cicli di gelo e disgelo.

Come si nota dalla tabella tutti i provini di calcestruzzo, dopo essere stati sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, hanno subito una rilevante diminuzione della resistenza meccanica a compressione.

Nella tabella 6.19 viene riportata la variazione percentuale della resistenza meccanica, ottenuta confrontando i valori della resistenza meccanica a 120 giorni e della resistenza meccanica dopo i cicli di gelo e disgelo.

| provino | Variazione di resistenza (%) |
|----------------|-------------------------------------|
| A | 60 |
| B | 29 |
| C | 40 |
| D | 17,5 |
| E | 26,9 |
| I | 24,9 |
| Q | 19,7 |

Tab. 6.19 - Variazioni percentuali della resistenza meccanica a compressione dei provini di calcestruzzo.

Le figure 6.26, 6.27, 6.28, riportano i dati relativi alle resistenze meccaniche dei provini dopo 120 giorni di stagionatura e quelli dei provini dopo i cicli di gelo e disgelo, realizzati rispettivamente con zeolite, filler calcareo e misti filler calcareo - zeoliti.

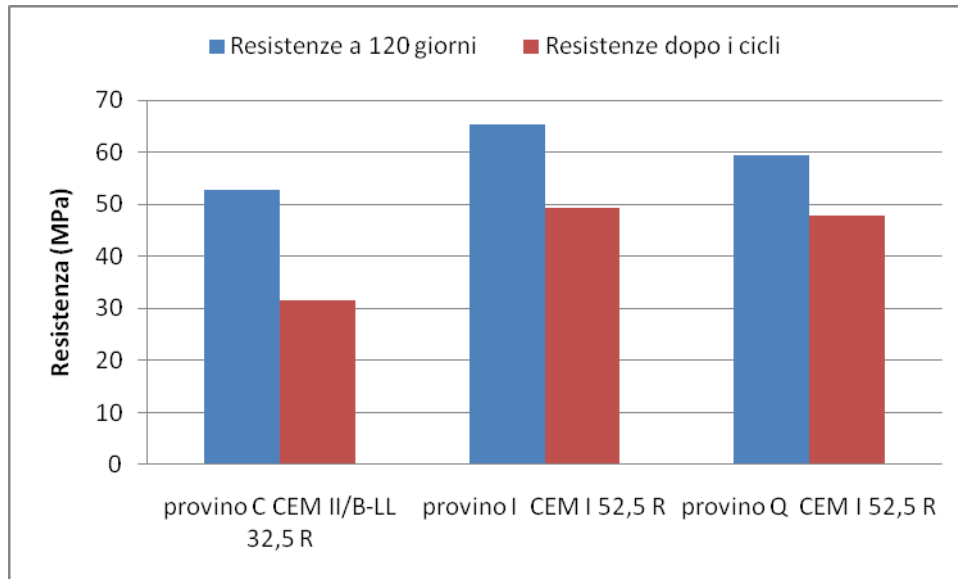


Fig. 6.26 - Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini stagionati per 120 giorni e di quelli sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, confezionati con aggiunta di zeolite, il provino Q presenta quantità ridotte di tutti i suoi costituenti.

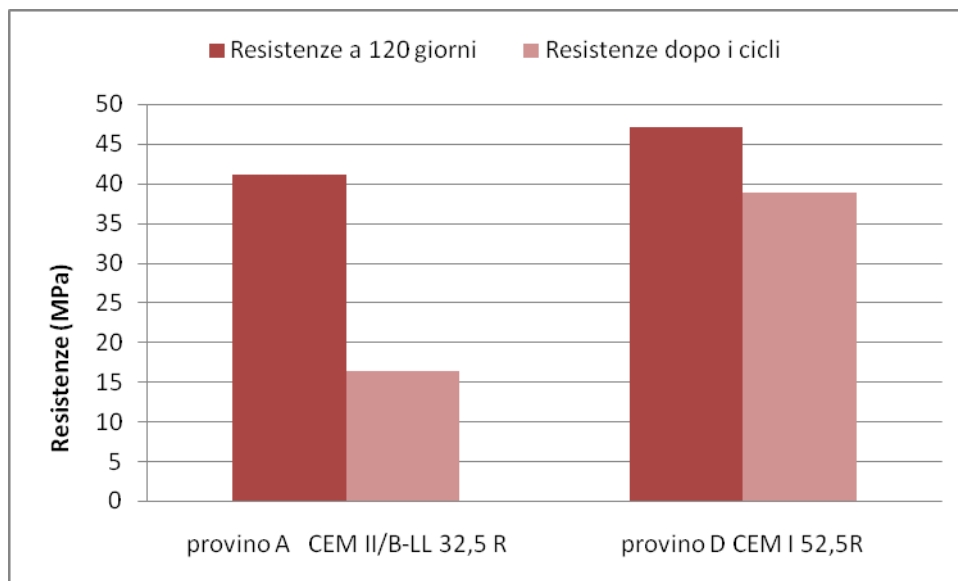


Fig. 6.27 - Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini stagionati per 120 giorni e di quelli sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, confezionati con aggiunta di filler calcareo.

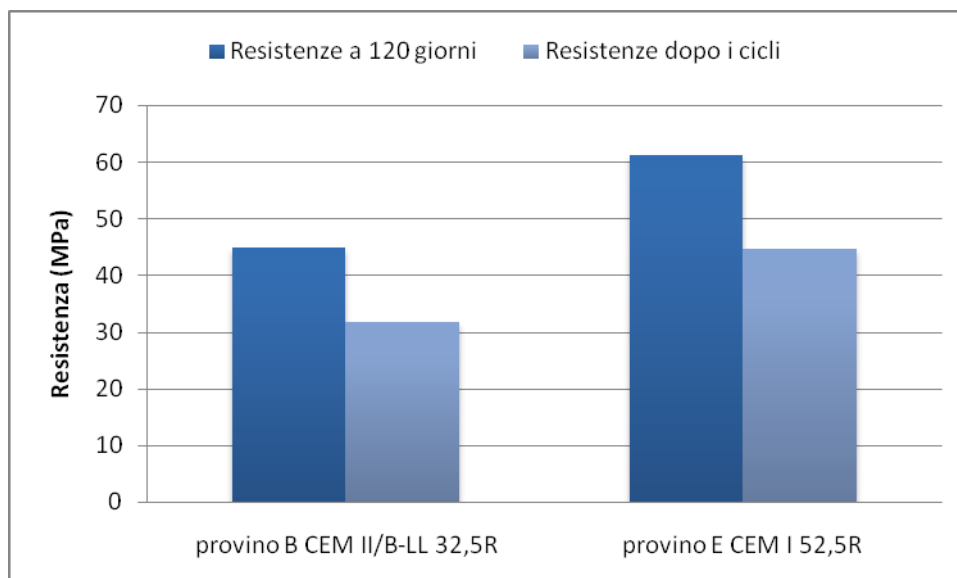


Fig. 6.28 - Confronto tra le resistenze meccaniche dei provini stagionati per 120 giorni e di quelli sottoposti ai cicli di gelo e disgelo, confezionati con aggiunta di filler calcareo e di zeolite.

6.6 Ritiro

I provini di cui si è valutato il ritiro igrometrico differiscono per tipo di aggiunta minerale (calcareo, zeolite, fumo di silice), per il tipo di cemento (CEM II/B LL 32.5 R e CEM I 52.5 R), per dosaggio e tipo di additivo (Fluid Premia 150 Viscofluid SCC/10).

Nelle tabelle e nei grafici seguenti vengono riportati i valori di ritiro misurati nel tempo per le varie miscele di SCC realizzate.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM II/B-LL 32.5R e aggiunta di filler calcareo, l'1,0% di additivo superfluidificante Fluid Premia e 1 kg/m³ di viscosizzante ViscofluidSCC.

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|---------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Ritiro (µm/m) | 80 | 220 | 460 | 580 | 700 | 810 | 965 | 1050 | 1091 |

Tab. 6.20 - Valori medi del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura.

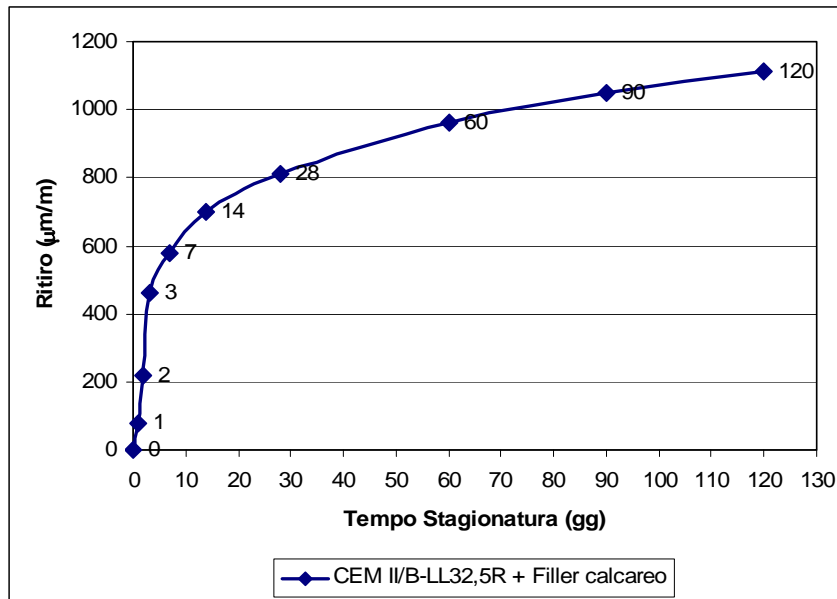


Fig. 6.29 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM II/B LL 32.5R e aggiunta di zeolite 5A, l'1,20% di additivo superfluidificante Fluid Premia

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Ritiro (µm/m) | 460 | 576 | 576 | 700 | 800 | 840 | 926 | 980 | 1040 |

Tab. 6.21 Valori medi del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

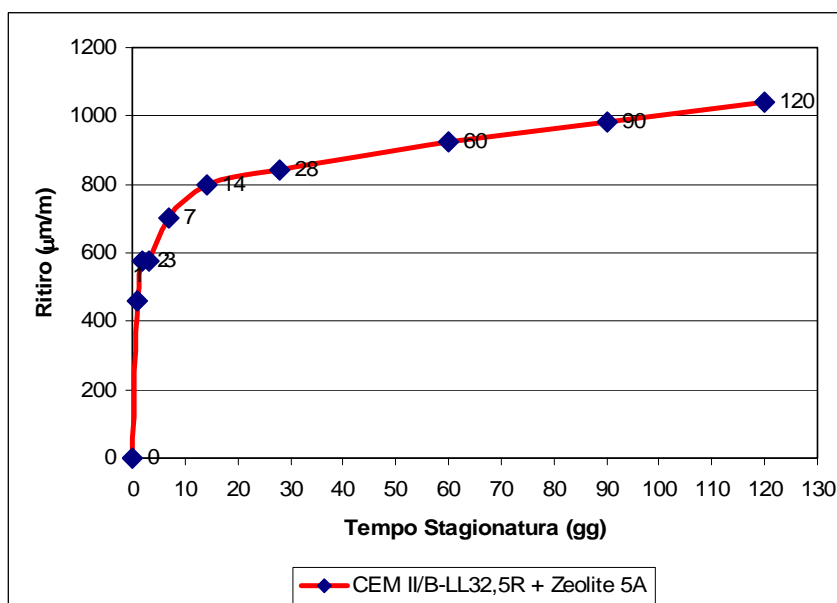


Fig. 6.30 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM II/B-LL 32.5 R e aggiunta del 50% di filler calcareo e 50% di zeolite 5A, lo 0,80% di additivo superfluidificante Fluid Premia, e 0,50 kg/m³ di viscosizzante Viscofluid SCC.

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Ritiro (µm/m) | 160 | 570 | 670 | 820 | 932 | 1060 | 1197 | 1273 | 1335 |

Tab. 6.22 - Valori di ritiro del provino realizzato con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta del 50% filler calcareo e 50% zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

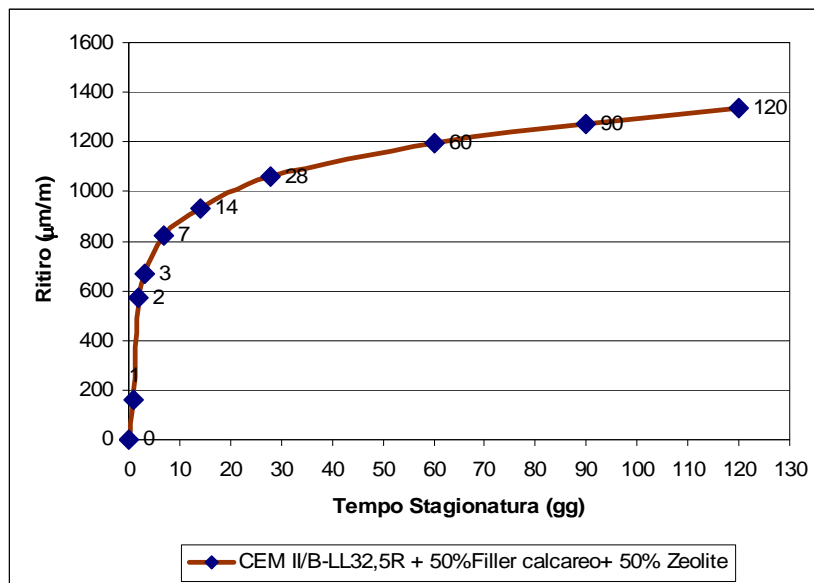


Fig. 6.31 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta del 50% filler calcareo e 50% zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM II/B LL 32.5R e aggiunta di fumo di silice, l'1,60% di additivo superfluidificante Fluid Premia.

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Ritiro (µm/m) | 300 | 406 | 430 | 592 | 680 | 755 | 867 | 950 | 1018 |

Tab. 6.23 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura.

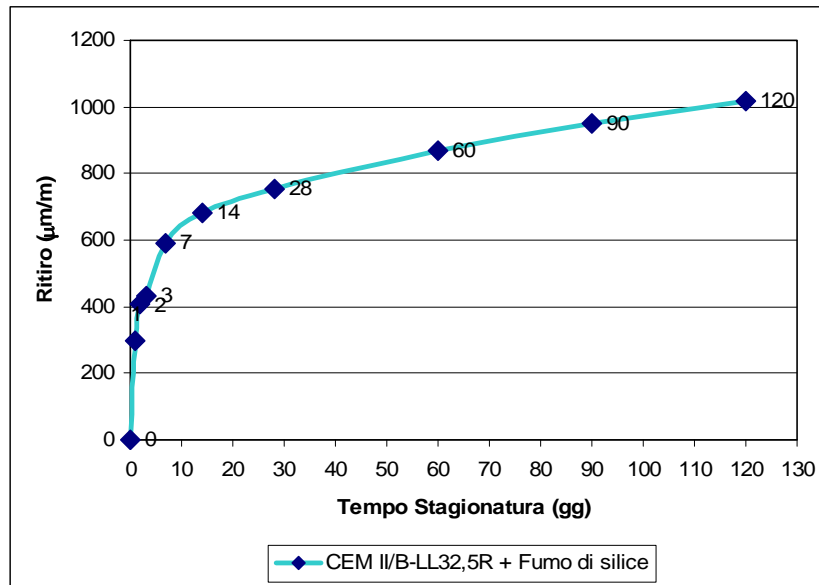


Fig. 6.32 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM II/B LL 32.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM I 52.5R e aggiunta di filler calcareo, l'1,0% di additivo superfluidificante Fluid Premia.

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Ritiro (µm/m) | 224 | 330 | 440 | 544 | 670 | 805 | 964 | 1050 | 1113 |

Tab. 6.24 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura.

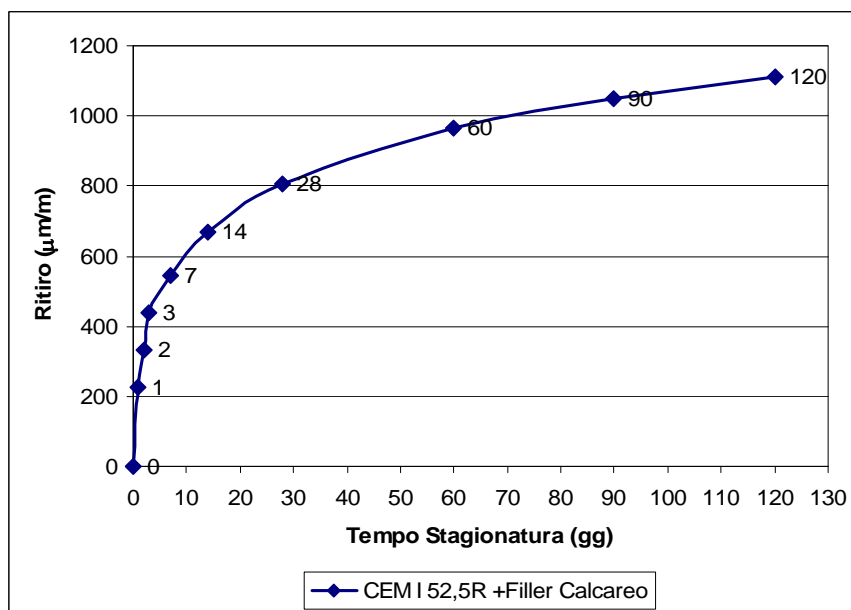


Fig. 6.33 - Andamento ritiro del provino realizzato con CEM I 52.5 R e aggiunta di filler calcareo in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM I 52.5R e aggiunta di zeolite 5A, il 2,6% di additivo superfluidificante Fluid Premia.

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ritiro ($\mu\text{m/m}$) | 400 | 570 | 600 | 620 | 650 | 670 | 740 | 806 | 860 |

Tab. 6.25 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

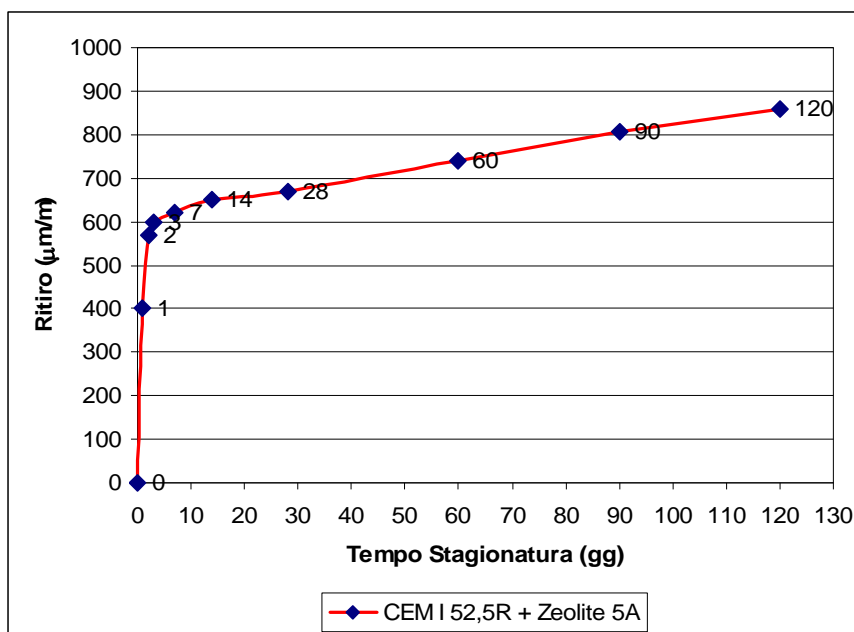


Fig. 6.34 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele realizzate con CEM I 52.5R e aggiunta del 50% di filler calcareo e 50% di zeolite 5A, l'1,5% di additivo superfluidificante Fluid Premia

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Ritiro ($\mu\text{m/m}$) | 480 | 540 | 654 | 730 | 780 | 864 | 970 | 1040 | 1116 |

Tab. 6.26 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta del 50% di filler calcareo e 50% di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

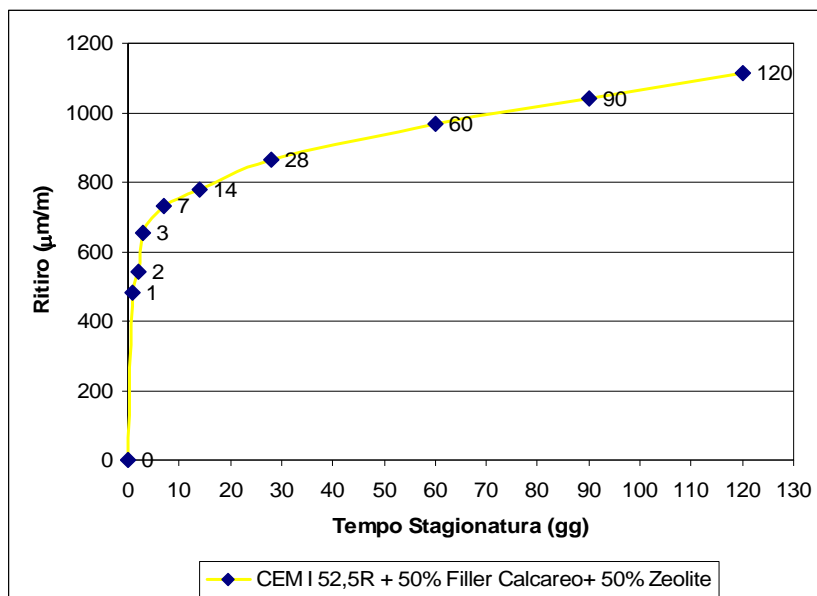


Fig. 6.35 - Andamento medio ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta del 50% filler calcareo e del 50% di zeolite 5A in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM I 52.5R e aggiunta di fumo di silice, il 2% di additivo superfluidificante Fluid Premia

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Ritiro (μm/m) | 470 | 556 | 600 | 770 | 900 | 1000 | 1109 | 1200 | 1257 |

Tab. 6.27 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura.

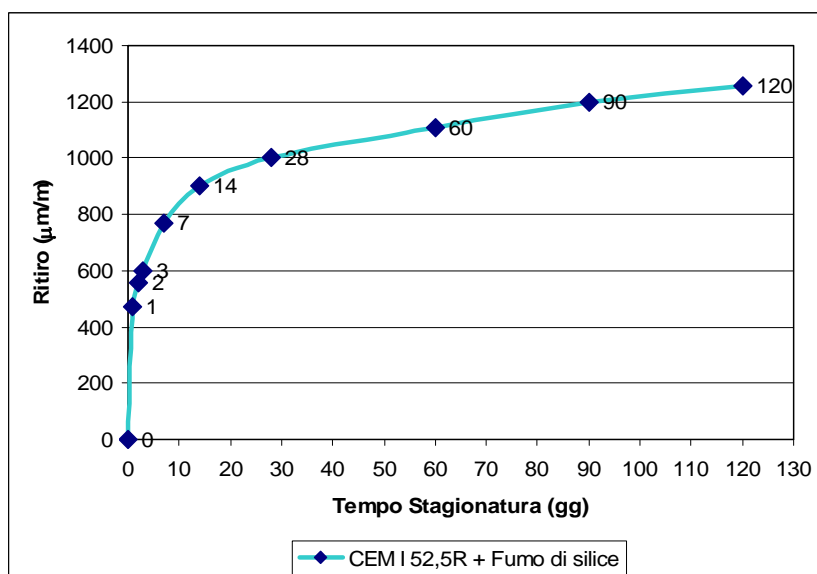


Fig. 6.36 - Andamento medio del ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di fumo di silice in funzione del tempo di stagionatura.

Valori medi di ritiro delle miscele di SCC realizzate con CEM I/B 52.5R e aggiunta di zeolite 5A in quantità ridotta (100 kg/m^3), l'1,5% di additivo superfluidificante Fluid Premia

| Giorni | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 | 120 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ritiro ($\mu\text{m/m}$) | 320 | 420 | 490 | 560 | 610 | 690 | 800 | 890 | 990 |

Tab. 6.28 - Valori medi di ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A quantità ridotta (100 kg/m^3) in funzione del tempo di stagionatura.

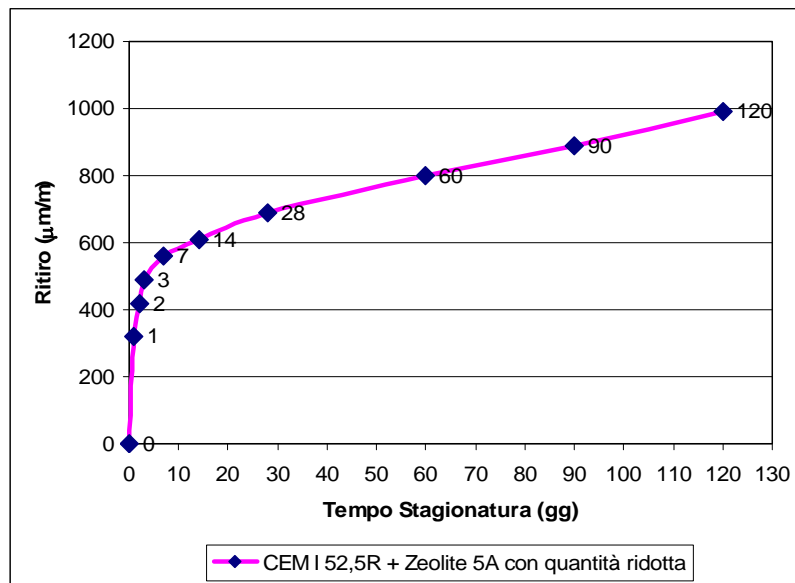


Fig. 6.37 - Andamento medi del ritiro nelle miscele realizzate con CEM I 52.5 R e aggiunta di zeolite 5A quantità ridotta (100 kg/m^3) in funzione del tempo di stagionatura.

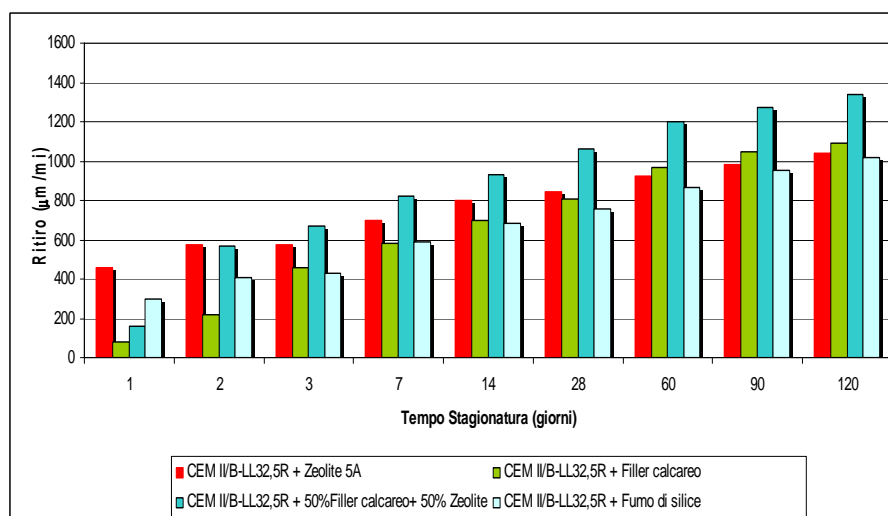


Fig. 6.38 - Ritiro ottenuto dalle miscele con CEM II/B-LL 32.5 R e le varie aggiunte (filler calcareo, zeolite, fumo di silice).

In figura 6.38 sono graficamente riportati i valori di ritiro dei provini delle varie miscele con l'utilizzo del CEM II/B-LL 32.5R. Dal grafico si evince che il ritiro maggiore si ottiene per la miscela con aggiunta di 50% calcare e 50% zeolite, mentre il minore ritiro lo ottiene la miscela con fumo di silice.

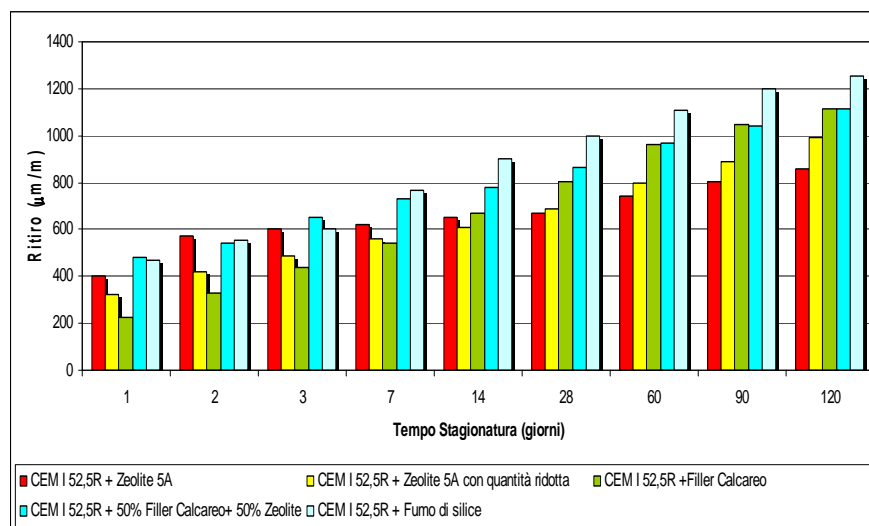


Fig. 6.39 - Ritiro ottenuto dalle miscele con CEM I 52.5 R e le varie aggiunte (filler calcareo, zeolite, fumo di silice).

Nella figura 6.39 sono graficamente riportati i valori di ritiro dei provini delle varie miscele con l'utilizzo del CEM I 52.5 R, si evince che il ritiro maggiore lo ottiene la miscela realizzata con aggiunta di fumo di silice, mentre il minore ritiro lo ottiene la miscela realizzata con zeolite (150kg/m^3).

6.7 Conclusioni

Si è cercato di ottimizzare miscele di calcestruzzi autocompattanti realizzate con cemento bianco ed utilizzando come materiale fine la zeolite 5A sintetica di colore bianco. Come confronto sono state realizzate, con gli stessi cementi, delle miscele di calcestruzzi autocompattanti impiegando materiali fini convenzionali, normalmente utilizzati nella produzione degli SCC. Pertanto i fini utilizzati sono stati:

- zeolite 5A;
- 50% di zeolite 5A e 50% di filler calcareo;
- filler calcareo;
- fumo di silice.

Particolare attenzione è stata prestata al mix-design dei calcestruzzi in funzione delle proprietà reologiche allo stato fresco e delle resistenze meccaniche a compressione allo stato indurito.

I risultati sperimentali conseguiti hanno messo in evidenza che si possono realizzare calcestruzzi autocompattanti con cemento bianco con classe di resistenza 32,5 e 52,5 utilizzando la zeolite 5A.

Allo stato fresco le miscele realizzate hanno evidenziato che:

- gli impasti confezionati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e il filler calcareo necessitano dell'aggiunta di additivo viscosizzante per evitare i fenomeni di bleeding e di segregazione;
- gli impasti confezionati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e la zeolite 5A di tipo industriale hanno mostrato un'ottima lavorabilità senza l'aggiunta di viscosizzante; inizialmente si ha una elevata viscosità, dovuta all'effetto accelerante della zeolite, che tende a scomparire all'aumentare dei tempi di miscelazione;
- la miscela confezionata con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e l'aggiunta del 50% di filler calcareo e del 50% di zeolite 5A, anche se inizialmente risulta un po' viscosa per la presenza della zeolite, necessita di piccole quantità di additivo viscosizzante per evitare i fenomeni di bleeding e di segregazione;
- per effetto della maggiore finezza del cemento le miscele confezionate con il CEM I 52,5 R bianco ed i vari finissimi non hanno richiesto l'aggiunta di additivo viscosizzante;
- nelle miscele realizzate con il CEM I 52,5 R bianco e la zeolite 5A, utilizzata nelle varie percentuali, si è riscontrata una maggiore viscosità iniziale tendente a diminuire all'aumentare del tempo di miscelazione.

Allo stato indurito i calcestruzzi autocompattanti realizzati, con i vari fini, hanno mostrato che:

- i provini di calcestruzzo autocompattante confezionati con la zeolite 5A di tipo industriale hanno esibito elevate resistenze meccaniche sia alle brevi che alle medie stagionature rispetto ai provini realizzati con il filler calcareo ed entrambi i cementi utilizzati;

- le resistenze a compressione più elevate dopo 28 giorni di stagionatura sono state ottenute dai provini di calcestruzzo confezionati con l'aggiunta di zeolite 5A e fumo di silice indipendentemente dal tipo di cemento;
- le resistenze meccaniche dei provini realizzati con il CEM I 52,5 R bianco, utilizzando come materiale fine sia la zeolite che il fumo di silice, sono tipiche degli HSCC (High-Strength-Compacting Concrete).

I risultati ottenuti in questo lavoro di tesi mostrano le straordinarie prestazioni conseguibili con i calcestruzzi autocompattanti realizzati con la zeolite 5A, in quanto permettono di ottenere delle superfici bianche, molto pregiate dal punto di vista estetico. Inoltre, i calcestruzzi autocompattanti confezionati con la zeolite 5A, facilmente reperibile nel territorio calabrese (stabilimenti della SASOL di Crotona e dell'U.O.P. di Reggio Calabria), sono proponibili sul mercato locale.

I calcestruzzi autocompattanti realizzati con la zeolite 5A per le elevate resistenze meccaniche a compressione fatte registrare alle brevi stagionature possono essere utilizzati per realizzare opere che richiedono un rapido disarmo dei getti, garantendo così alle imprese un'ulteriore ottimizzazione dei costi.

I risultati espressi dalle prove di ritiro e dalle prove di gelo e disgelo hanno messo in evidenza che:

- i provini confezionati con l'aggiunta di zeolite 5 A industriale hanno esibito valori del ritiro più bassi rispetto agli altri indipendentemente dal tipo di cemento utilizzato;
- i provini di calcestruzzo che hanno raggiunto una resistenza meccanica più bassa hanno esibito valori del ritiro più elevati, indice di una maggiore porosità del conglomerato;
- la differenza tra il peso dei provini di calcestruzzo misurato alla fine dei cicli di gelo e disgelo e il peso ad inizio ciclo è molto contenuta. Tutti i provini, infatti, hanno esibito incrementi di peso inferiori all'1%, evidenziando una ridotta porosità e quindi una elevata compattezza;
- i provini di calcestruzzo realizzati hanno esibito una buona resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
- solo uno dei provini confezionati con CEM II/B-LL 32,5 R e aggiunta di filler calcareo è risultato non idoneo a resistere ai cicli di gelo e disgelo, avendo esibito

una perdita di peso pari a circa l'8%;

- i provini di calcestruzzo che hanno subito minore variazione della resistenza meccanica per effetto dei cicli di gelo e disgelo sono stati quelli confezionati con il CEM I 52,5 R.

Pertanto per gli elevati valori della resistenza meccanica raggiunti e per la resistenza ai cicli di gelo e disgelo mostrata, i calcestruzzi autocompattanti confezionati possono essere proposti per la realizzazione di grandi e complesse opere in calcestruzzo bianco a faccia vista.

L'utilizzo della zeolite 5A, anche se comporta un aumento dei costi di produzione dei calcestruzzi Self Compacting Concrete (SCC), incrementa sensibilmente le prestazioni del conglomerato confezionato, permette di realizzare superfici bianche molto pregiate anche da un punto di vista estetico e di realizzare opere che richiedono un rapido disarmo dei getti, garantendo alle imprese di ottimizzare i costi.

CAPITOLO 7

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI CALCESTRUZZI CON AGGREGATI DA RICICLO

7.1 Premessa

Dopo i calcestruzzi HPC ed SCC si sono esaminati i calcestruzzi con aggregati da riciclo, partendo da diverse miscele.

7.2 Studio delle miscele

Lo studio della composizione delle miscele di calcestruzzo è stato effettuato per gradi d'approssimazione successivi che possono essere così riassunti:

Adozione di una miscela teorica basata sui dati ricavati dalle analisi granulometriche, dalle esperienze di laboratorio e dalle esperienze precedenti.

Lo studio della miscela teorica si è basato su dei parametri che sono stati fissati a priori e mantenuti costanti in tutti gli impasti (rapporto a/c pari a 0,45, classe di consistenza S4, quantitativo di cemento pari a 400 Kg/m³), i parametri variabili sono stati i tipi di cemento (CEM II A-LL 32,5R, CEM II A-L 42,5R), i quantitativi e i tipi di additivi (ERGOMIX 180, FLUID PREMIA 150), nonché gli aggregati che sono stati utilizzati nelle quantità ricavate con gli studi granulometrici di laboratorio.

Esecuzione d'impasti di prova per la verifica della miscela teorica (prima approssimazione).

Sono stati effettuati impasti da 6,5 litri per quantificare orientativamente le percentuali d'additivo da aggiungere agli impasti definitivi, inoltre in questi impasti si è presa in considerazione l'ipotesi di eliminare dal riciclato la parte passante allo staccio da 0,106 mm, in modo da studiare gli effetti prodotti da questa eliminazione sulla lavorabilità e sulle proprietà meccaniche con, inoltre, la possibilità di ottenere, così, dagli aggregati di riciclo un materiale molto fino da poter utilizzare come filler nei calcestruzzi autocompattanti (SCC). Le prove sulla lavorabilità del calcestruzzo sono state effettuate mediante lo slump-test (abbassamento al cono di Abrams).

Correzione delle miscele in base ai risultati degli impasti di prova (seconda approssimazione)

In questa fase sono stati ripreparati alcuni impasti al fine di ottimizzare il quantitativo di additivo ed ottenere in tal modo il progetto definitivo delle miscele da realizzare tramite miscelazione meccanica, in volumi maggiori.

Confezionamento degli impasti finali

Gli impasti sono stati realizzati in betoniera in volumi maggiori (26 litri); con il calcestruzzo ottenuto da questi impasti sono stati confezionati mediamente 20 provini cubici di lato 10*10*10 cm da sottoporre a prove di resistenza a compressione, prove di resistenza al gelo e disgelo, prove di durabilità agli attacchi di cloruri e solfati e per alcuni impasti si sono confezionati provini di lato 10*10*50 cm da sottoporre a prove di ritiro.

7.3 Determinazione delle curve granulometriche

Per i singoli campioni di inerti è stata effettuata l'analisi granulometrica, in riferimento alla norma UNI EN 933-1 che stabilisce le modalità da seguire per la determinazione, mediante vagliatura, dell'assortimento presente nella pezzatura di aggregato.

A secondo della pezzatura dell'aggregato, la massa minima del campione utilizzato dipende dalla dimensione massima della particella D.

Dopo aver verificato l'essiccazione della porzione di prova, si è provveduto a pesare e registrare la massa M. Si sono predisposti i vagli in ordine crescente di maglia impilandoli uno sopra l'altro e si è immesso il materiale dall'alto, procedendo poi ad agitare la colonna manualmente. Una volta che il materiale è risultato vagliato, si sono rimossi gli stacci uno per uno, calcolando la massa del trattenuto su ciascun staccio.

Quindi si sono calcolate le percentuali in massa di ogni singolo vaglio, facendo uso della seguente espressione:

$$100 \left(\frac{M_t}{M} \right)$$

dove:

M_t è la massa in grammi del trattenuto su ogni vaglio;

M è la massa in grammi del campione essiccato.

A questo punto è stato possibile passare al calcolo del materiale passante ad ogni setaccio (trattenuto parziale).

I quantitativi da combinare per la determinazione della distribuzione granulometrica sono stati calcolati tramite l'equazione di Bolomey, la quale rispetto alla curva di Fuller prevede un maggior contenuto di materiale fino ed un minor contenuto di ghiaia, consentendo in questo modo di ottenere un miglior impacchettamento della matrice cementizia e di realizzare miscele con lavorabilità elevate.

Nel lavoro sperimentale, sono state determinate le curve granulometriche per le miscele così costituite:

- 100% Aggregati naturali;
- 100% Aggregati da riciclo;
- 25% Aggregati naturali + 75% Aggregati da riciclo;
- 50% Aggregati naturali + 50% Aggregati da riciclo;
- 75% Aggregati naturali + 25% Aggregati da riciclo.

Calcolo del misto ottimale della miscela 1.

Per la valutazione del misto ottimale sono stati considerati i seguenti dati:

Cemento: 400 kg/m³

a/c =0,45

consistenza: fluida

slump: 150-200 mm

Aggregati tondeggianti: A=12

| Componenti | Peso Specifico (Kg/l) | Quantità (Kg/m ³) | Quantità (l/m ³) |
|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Cemento | 3.10 | 400 | 129 |
| Acqua | 1.00 | 180 | 180 |
| Aria | - | - | 10 |
| Aggregati | 2.65 | 1805 | 681 |

Tab. 7.1 - Quantità dei componenti della miscela 1.

$$\text{VOLUME AGGREGATI} = 1000 - (129 + 180 + 10) = 681 \text{ l/m}^3$$

$$\text{PESO AGGREGATI} = 681 * 2,65 = 1804,65 \text{ g}$$

Applicando la legge di Bolomey riferita al solo aggregato, si ottiene, portando in conto anche il pietrisco setacciato al vaglio $d=10 \text{ mm}$ e $d=16 \text{ mm}$, il passante P ideale dell'intero aggregato (sabbia+pietrisco):

$$P = \frac{(A + (100-A) * (d/D)^{1/2} - C) * 100}{100-C}$$

con:

$$C = c / (c+i) = 18,14$$

c = quantità di cemento

i = peso aggregati

| Equaz.Bolomey | Valori di P |
|---------------|-------------|
| P(d=16mm) | 78,01 |
| P(d=10mm) | 59,59 |
| P(d=7,10mm) | 48,65 |
| P(d=4mm) | 34,03 |
| P(d=2,80mm) | 26,85 |
| P(d=0,850mm) | 10,33 |
| P(d=0,425mm) | 4,39 |
| P(d=0,250mm) | 1,05 |

Tab. 7.2 - Valori di P.

Riportando graficamente (fig. 7.1) le percentuali di passanti di sabbia e pietrisco della tabella 7.3 si è proceduto all'assortimento degli aggregati.

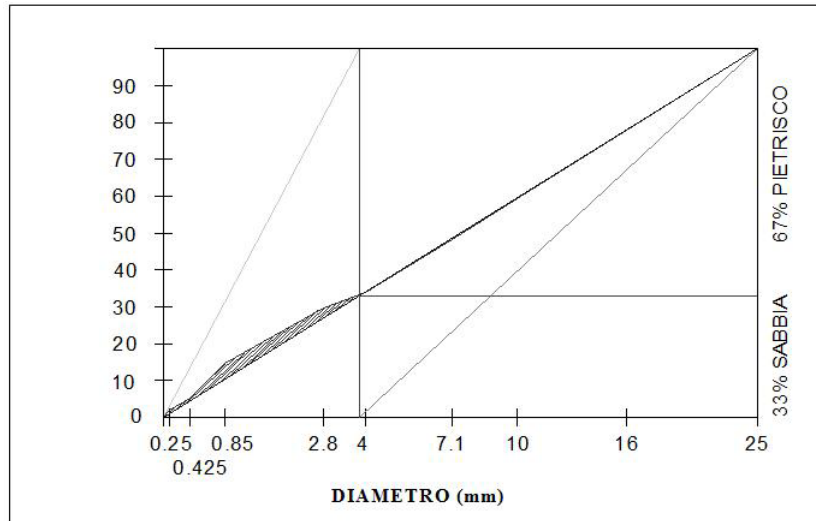


Fig. 7.1 - Curva granulometrica per il calcolo grafico dell'assortimento dei due aggregati.

I punti rappresentativi dell'analisi granulometrica del pietrisco appartengono alla retta interpolatrice, essendo state imposte le percentuali di passante. Difatti, il pietrisco è stato suddiviso in quattro frazioni granulometriche e per ogni frazione è stata utilizzata la percentuale riportata in tabella 6.4. Intersecando la retta ottenuta unendo il punto corrispondente al diametro massimo della frazione di passante della sabbia e il punto corrispondente al diametro minimo della frazione di passante del pietrisco, con la curva ideale di Bolomey, si ottengono le percentuali di sabbia (33%) e di pietrisco (67%). Dalla percentuale di passante si determina quella di trattenuto, necessaria per la determinazione dell'assortimento granulometrico degli agglomerati da utilizzare nell'impasto (tab. 7.3).

| Apertura vagli | Misto Ottimale | Pietrisco% | Sabbia % | Contributo Pietrisco% | Contributo Sabbia% | Miso Ottenuto% |
|----------------|----------------|------------|----------|-----------------------|--------------------|----------------|
| 25 | 100 | 100 | 100 | 67,00 | 33,00 | 100,00 |
| 16 | 78,01 | 67 | 100 | 44,89 | 33,00 | 77,89 |
| 10 | 59,59 | 39,5 | 100 | 26,47 | 33,00 | 59,47 |
| 7,1 | 48,65 | 23 | 100 | 15,41 | 33,00 | 48,41 |
| 4 | 34,03 | 2 | 98,83 | 1,34 | 32,61 | 33,95 |
| 2,8 | 26,85 | 0 | 90,23 | 0,00 | 29,78 | 29,78 |
| 0,85 | 10,33 | 0 | 43,93 | 0,00 | 14,50 | 14,50 |
| 0,425 | 4,39 | 0 | 16,23 | 0,00 | 5,36 | 5,36 |
| 0,25 | 1,05 | 0 | 6,23 | 0,00 | 2,06 | 2,06 |

Tab. 7.3 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (100% naturale).

Calcolo del misto ottimale della miscela 2

Nota la curva di Bolomey ideale è stata riportata sul grafico la curva granulometrica relativa al materiale riciclato (fig. 7.2).

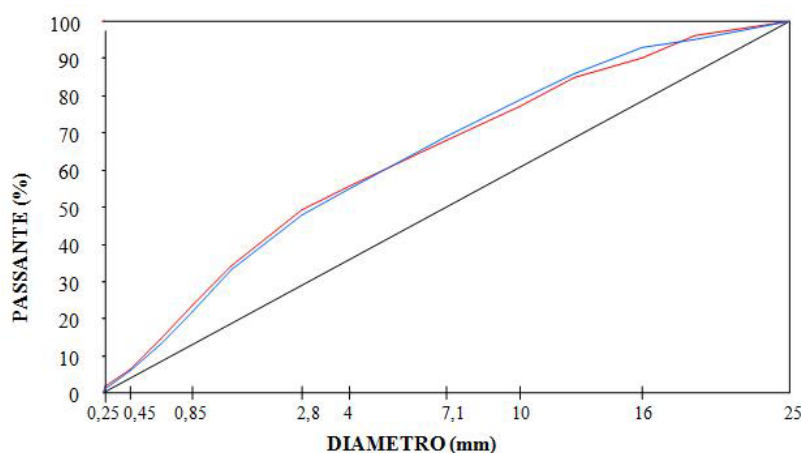


Fig. 7.2 - Curva granulometrica dell'aggregato riciclato.

La differenza tra la curva ideale e le curve ottenute mediante l'analisi granulometrica è notevole.

Per ovviare a questo problema si è provveduto a setacciare il materiale suddividendolo in due frazioni, una di granulometria più grossa con diametro compreso tra 25 mm e 10 mm, l'altra, denominata con l'appellativo "fino", con una granulometria più sottile con diametro compreso tra 10 mm e 0,106 mm. Dopo aver compiuto quest'operazioni si è ulteriormente suddiviso il materiale di diametro compreso tra 25 mm e 10 mm in due frazioni granulometriche, trattenuto allo staccio da 16 mm e trattenuto allo staccio da 10

mm, e per ogni frazione è stata utilizzata la percentuale riportata in tabella 6.5. Intersecando la retta ottenuta unendo il punto corrispondente al diametro massimo della frazione di passante del fino e il punto corrispondente al diametro minimo della frazione di passante del pietrisco con la curva ideale di Bolomey, si ottengono le percentuali di fino (54%) e di pietrisco (46%). Dalla percentuale di passante si determina quella di trattenuto, necessaria per la determinazione dell'assortimento granulometrico degli agglomerati da utilizzare nell'impasto (tab. 7.4).

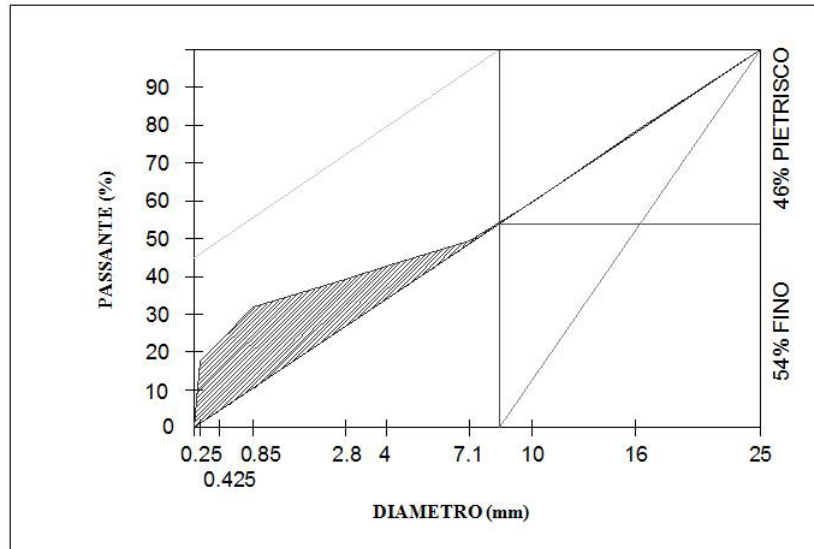


Fig. 7.3 - Curva granulometrica per il calcolo grafico dell'assortimento dei due inerti.

| Apertura vagli | Misto Ottimale | Pietrisco% | Fino % | Contributo Pietrisco% | Contributo Fino% | Miso Ottenuto% |
|----------------|----------------|------------|--------|-----------------------|------------------|----------------|
| 25 | 100 | 100 | 100 | 46,00 | 54,00 | 100,00 |
| 16 | 78,01 | 53 | 100 | 24,38 | 54,00 | 78,38 |
| 10 | 59,59 | 12 | 100 | 5,52 | 54,00 | 59,52 |
| 7,1 | 48,65 | 0 | 91,55 | 0,00 | 49,44 | 49,44 |
| 4 | 34,03 | 0 | 79,13 | 0,00 | 42,73 | 42,73 |
| 2,8 | 26,85 | 0 | 72,63 | 0,00 | 39,22 | 39,22 |
| 0,85 | 10,33 | 0 | 59,03 | 0,00 | 31,88 | 31,88 |
| 0,425 | 4,39 | 0 | 41,98 | 0,00 | 22,67 | 22,67 |
| 0,25 | 1,05 | 0 | 32,66 | 0,00 | 17,64 | 17,64 |

Tab. 7.4 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (100%riciclato). Calcolo del misto ottimale della miscela 3.

Per il calcolo del misto ottimale della miscela di calcestruzzo contenente il 25% di aggregati riciclati ed il 75% di aggregati naturali si è proceduto in maniera non convenzionale.

Si è sostituito, infatti, rispetto al misto ottimale della miscela 1 (100% naturale), il 25% in peso di aggregati naturali con aggregati di riciclo per ogni classe di diametro, ottenendo il misto di tabella 7.5.

| Apertura vagli | Misto Ottimale | 25% Ric. | 75% Nat. | Misto Ottenuto% |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| 25 | 100 | 25 | 75 | 100,00 |
| 16 | 78,01 | 19,59 | 58,41 | 78,01 |
| 10 | 59,59 | 14,88 | 44,59 | 59,48 |
| 7,1 | 48,65 | 12,36 | 36,30 | 48,67 |
| 4 | 34,03 | 10,68 | 25,46 | 36,15 |
| 2,8 | 26,85 | 9,80 | 22,33 | 32,14 |
| 0,850 | 10,33 | 7,96 | 10,87 | 18,84 |
| 0,425 | 4,39 | 5,67 | 4,01 | 9,68 |
| 0,250 | 1,05 | 4,41 | 1,54 | 5,95 |

Tab. 7.5 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (25% riciclato+75% naturale).

Successivamente si è tracciata graficamente la curva granulometrica per un confronto con quella ideale di Bolomey (fig. 7.4).

Ovviamente la curva così ottenuta non può che occupare una posizione compresa nell'intervallo tra la curva della miscela 1 (100% aggregati naturali) e la curva della miscela 2 (100% aggregati di riciclo), rimanendo, comunque, non molto distante da quella ideale.

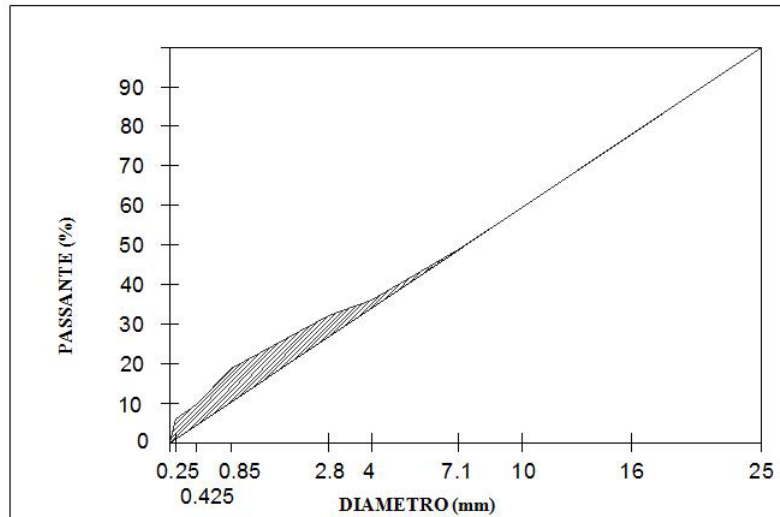


Fig. 7.4 - Curva granulometrica della miscela 3.

Calcolo del misto ottimale della miscela 4

Anche per il calcolo del misto ottimale della miscela di calcestruzzo contenente il 50% di aggregati riciclati ed il 50% di aggregati naturali si è proceduto in maniera non convenzionale.

Come nel caso precedente, si è sostituito, rispetto al misto ottimale della miscela 1 (100% naturale), il 50% in peso di aggregati naturali con aggregati di riciclo per ogni classe di diametro, ottenendo il misto di tabella 7.6.

| Apertura vagli | Misto Ottimale | 50% Ric. | 50% Nat. | Miso Ottenuto% |
|----------------|----------------|----------|----------|----------------|
| 25 | 100 | 50 | 50 | 100,00 |
| 16 | 78,01 | 39,19 | 38,94 | 78,14 |
| 10 | 59,59 | 29,76 | 29,73 | 59,49 |
| 7,1 | 48,65 | 24,71 | 24,20 | 48,92 |
| 4 | 34,03 | 21,36 | 16,97 | 38,34 |
| 2,8 | 26,85 | 19,61 | 14,88 | 34,50 |
| 0,850 | 10,33 | 15,93 | 7,24 | 23,19 |
| 0,425 | 4,39 | 11,33 | 2,67 | 14,01 |
| 0,250 | 1,05 | 8,8182 | 1,02 | 9,85 |

Tab. 7.6 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (50% riciclato+50% naturale).

Successivamente si è tracciata graficamente la curva granulometrica per un confronto con quella ideale di Bolomey (fig 7.5).

Anche la curva della suddetta miscela occupa una posizione compresa nell'intervallo tra la curva della miscela 1 (100% aggregati naturali) e la curva della miscela 2 (100% aggregati di riciclo), e si colloca in una posizione esattamente intermedia la cui differenza rispetto a quella ideale risulta ancora accettabile.

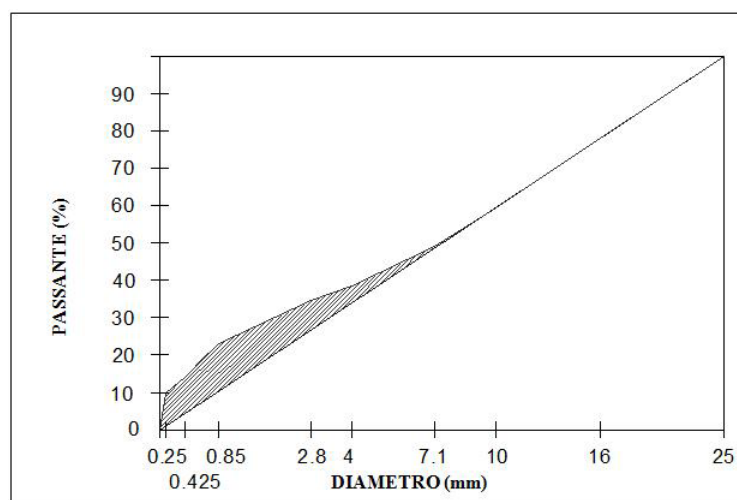


Fig. 7.5 - Curva granulometrica della miscela 4.

Calcolo del misto ottimale della miscela 5.

Anche per il calcolo del misto ottimale della miscela di calcestruzzo contenente il 75% di aggregati riciclati ed il 25% di aggregati naturali si è proceduto in maniera non convenzionale. Come nel caso precedente, si è sostituito, rispetto al misto ottimale della miscela 1 (100% naturale), il 75% in peso di aggregati naturali con aggregati di riciclo per ogni classe di diametro, ottenendo il misto di tabella 7.7.

| Apertura vagli | Misto Ottimale | 75% Ric. | 25% Nat. | Misto Ottenuto% |
|----------------|----------------|----------|----------|-----------------|
| 25 | 100 | 75 | 25 | 100,00 |
| 16 | 78,01 | 58,78 | 19,47 | 78,26 |
| 10 | 59,59 | 44,64 | 14,86 | 59,51 |
| 7,1 | 48,65 | 37,07 | 12,10 | 49,18 |
| 4 | 34,03 | 32,04 | 8,48 | 40,54 |
| 2,8 | 26,85 | 29,41 | 7,44 | 36,86 |
| 0,850 | 10,33 | 23,91 | 3,62 | 27,53 |
| 0,425 | 4,39 | 17,01 | 1,33 | 18,34 |
| 0,250 | 1,05 | 13,22 | 0,51 | 13,74 |

Tab. 7.7 - Assortimento granulometrico del misto ottimale (75% riciclato+25% naturale).

Successivamente si è tracciata graficamente la curva granulometrica per un confronto con quella ideale di Bolomey (fig. 7.6). Anche la curva della suddetta miscela occupa una posizione compresa nell'intervallo tra la curva della miscela 1 (100% aggregati naturali) e la curva della miscela 2 (100% aggregati di riciclo), e si colloca in una posizione la cui differenza da quella ideale risulta significativa.

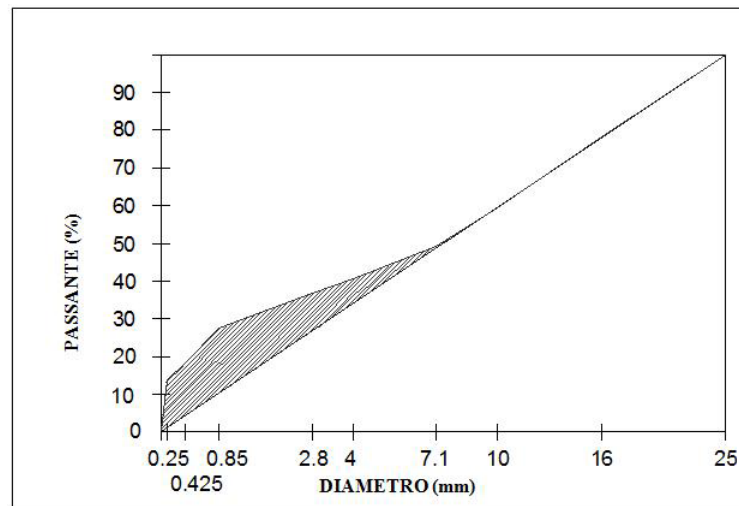


Fig. 7.6 - Curva granulometrica della miscela 5.

7.4 Dosaggio delle miscele.

Dopo aver determinato, attraverso il calcolo del misto ottimale, la percentuale di aggregato passante per ogni frazione granulometrica e per ogni tipo di miscela, si è calcolato il dosaggio di ogni componente facendo riferimento ad 1 m³ di materiale.

Dosaggio per le miscele di tipo 1

Si sono mantenute costanti le seguenti quantità (tab. 7.2):

Contenuto di cemento: 400 kg/m³

Rapporto a/c: 0,45

Acqua totale degli impasti: 180 l/m³

Peso totale degli aggregati: 1805 kg

Dalla somma totale degli aggregati conoscendo le rispettive percentuali si ricava il quantitativo di sabbia e di pietrisco:

Peso sabbia = 33% × 1805 = 595,65 kg

Peso pietrisco = $1805 - 595,65 = 1209,35$ kg

Ottenuto il peso totale del pietrisco, si procede al calcolo del quantitativo per ogni frazione, mentre la sabbia viene utilizzata tal quale.

La frazione in peso di pietrisco calcolata è stata ripartita secondo le percentuali di trattenuto teorico ai vari crivelli, ricavando, quindi, le diverse frazioni granulometriche impiegate (tab. 7.8).

| Diametro (mm) | % Passante | % Trattenuto | Quantità (kg) |
|---------------|------------|--------------|---------------|
| 25 | 100 | 0 | - |
| 16 | 67,0 | 33 | 399,08 |
| 10 | 39,5 | 27,5 | 332,57 |
| 7,1 | 23,0 | 16,5 | 199,54 |
| 4 | 2,0 | 23 | 278,16 |

Tab. 7.8 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 1.

Dosaggio per le miscele di tipo 2

Si sono mantenute costanti le seguenti quantità (tab. 7.2):

Contenuto di cemento: 400 kg/m^3

Rapporto a/c: 0,45

Acqua totale degli impasti: 180 l/m^3

Peso totale degli aggregati: 1805 kg

Dalla somma totale degli aggregati conoscendo le rispettive percentuali si ricava il quantitativo di fino e di pietrisco:

Peso fino = $54\% \times 1805 = 974,7$ kg

Peso pietrisco = $1805 - 974,7 = 830,3$ kg

Ottenuto il peso totale del pietrisco, si procede al calcolo del quantitativo per ogni frazione, mentre il fino viene utilizzato tal quale.

La frazione in peso di pietrisco calcolata è stata ripartita secondo le percentuali di trattenuto teorico ai vari crivelli, ricavando, quindi, le diverse frazioni granulometriche utilizzate (tab. 7.9).

| Diametro (mm) | % Passante | % Trattenuto | Quantità (kg) |
|--------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| 25 | 100 | 0 | - |
| 16 | 53,0 | 47,0 | 390,24 |
| 10 | 12,0 | 53,0 | 440,06 |

Tab. 7.9 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 2.

Dosaggio per le miscele di tipo 3.

Si sono mantenute costanti le seguenti quantità:

Contenuto di cemento: 400 kg/m³

Rapporto a/c: 0,45

Acqua totale degli impasti: 180 l/m³

Peso totale degli aggregati: 1805 kg

Si è proceduto, poi, al calcolo del quantitativo di aggregati per ogni frazione per semplice combinazione delle percentuali richieste, nel caso in esame, 25% riciclato e 75% naturale. I risultati sono riportati in tabella 7.10.

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------------|--------------------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 447,19 |
| 25 | - |
| 16 | 299,11 |
| 10 | 249,50 |
| 7,1 | 149,69 |
| 4 | 208,54 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 243,65 |
| 25 | - |
| 16 | 97,58 |
| 10 | 110,00 |
| Peso tot. | 1805 kg |

Tab. 7.10 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 3.

Dosaggio per le miscele di tipo 4.

Si sono mantenute costanti le seguenti quantità:

Contenuto di cemento: 400 kg/m³

Rapporto a/c: 0,45

Acqua totale degli impasti: 180 l/m³

Peso totale degli aggregati: 1805 kg

Si è proceduto, poi, al calcolo del quantitativo di aggregati per ogni frazione per semplice combinazione delle percentuali richieste, nel caso in esame, 50% riciclato e 50% naturale. I risultati sono riportati in tabella 7.11.

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------------|--------------------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 298,08 |
| 25 | - |
| 16 | 199,42 |
| 10 | 166,35 |
| 7,1 | 99,81 |
| 4 | 139,04 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 469,23 |
| 25 | - |
| 16 | 207,88 |
| 10 | 225,38 |
| Peso tot. | 1805 kg |

Tab. 7.11 - Quantità di aggregati utilizzati alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 4.

Dosaggio per le miscele di tipo 5.

Si sono mantenute costanti le seguenti quantità:

Contenuto di cemento: 400 kg/m³

Rapporto a/c: 0,45

Acqua totale degli impasti: 180 l/m³

Peso totale degli aggregati: 1805 kg

Si è proceduto, poi, al calcolo del quantitativo di aggregati per ogni frazione per semplice combinazione delle percentuali richieste, nel caso in esame, 75% riciclato e 25% naturale. I risultati sono riportati in tabella 7.12.

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------------|--------------------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 149,04 |
| 25 | - |
| 16 | 99,69 |
| 10 | 83,15 |
| 7,1 | 49,88 |
| 4 | 69,50 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 730,78 |
| 25 | - |
| 16 | 292,88 |
| 10 | 330,00 |
| Peso tot. | 1805 kg |

Tab. 7.12 - *Quantità di aggregati utilizzate alle diverse frazioni granulometriche per la miscela tipo 5.*

7.5 Impasti ottimali

Gli impasti definitivi sono stati preparati in dosaggi da 26 litri ed impastati in betoniera.

Miscela “H”

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 50% naturale, 50% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “H” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,187 l (1,8%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 7,75 |
| 25 | - |
| 16 | 5,18 |
| 10 | 4,32 |
| 7,1 | 2,59 |
| 4 | 3,61 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 12,2 |
| 25 | - |
| 16 | 5,40 |
| 10 | 5,86 |

Tab. 7.13 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela H.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti elevati valori di resistenza, come denota il grafico in figura 7.7.

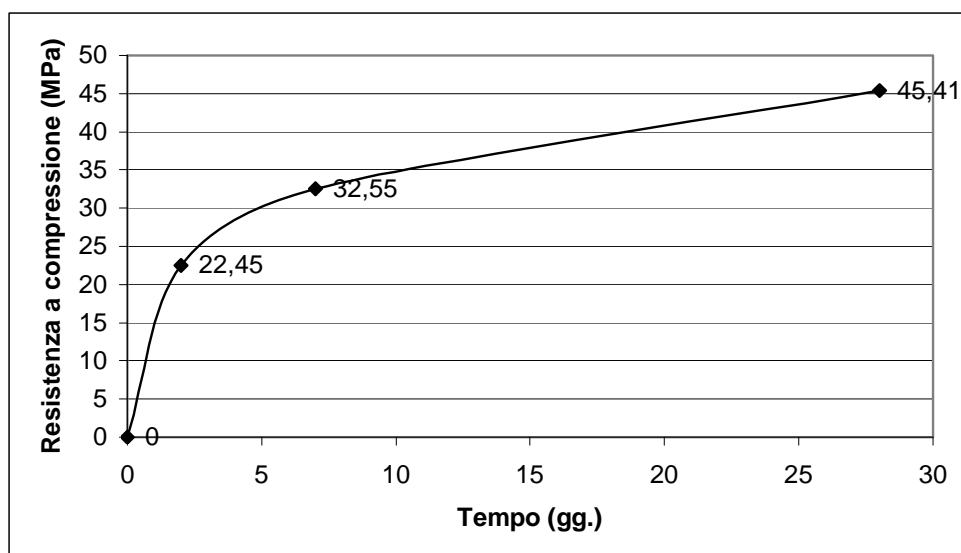


Fig. 7.7 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela H.

Miscela "I"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 75% naturale, 25% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "I" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,083 l (0,8%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------------|--------------------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 11,63 |
| 25 | - |
| 16 | 7,78 |
| 10 | 6,49 |
| 7,1 | 3,89 |
| 4 | 5,47 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 6,33 |
| 25 | - |
| 16 | 2,54 |
| 10 | 2,86 |

Tab. 7.14 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela I.

Per la miscela di tipo "I" si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 20 cm, verificatosi come "crollo veloce" (fig. 7.8). L' impasto presenta ottime qualità di fluidità e lavorabilità.



Fig. 7.8 - Prova di abbassamento al cono di Abrams della miscela I.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.9

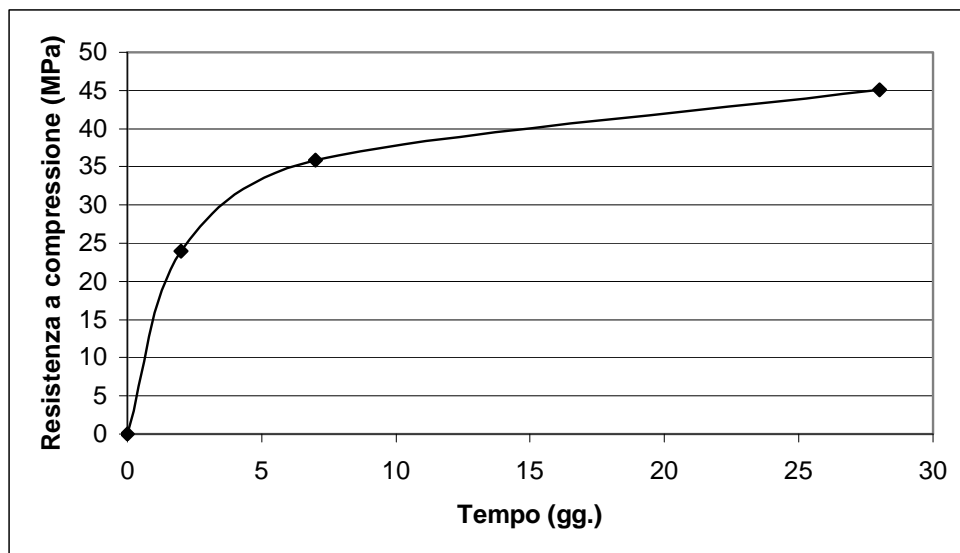


Fig. 7.9 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela I.

Miscela "L"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 100% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "L" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l

- Contenuto di additivo: 0,416 l (4,0%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato riciclato | |
| fino | 25,34 |
| 25 | - |
| 16 | 10,15 |
| 10 | 11,41 |

Tab. 7.15 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela L.

Per la miscela di tipo “L” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 13 cm, verificatosi come “crollo”. Nonostante l’abbassamento al cono sia notevole, per merito dell’elevata quantità di additivo, questo impasto denota scarse qualità di lavorabilità, dovute alla presenza di molto materiale fino che assorbe molta acqua e provoca un precoce indurimento del calcestruzzo.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.10

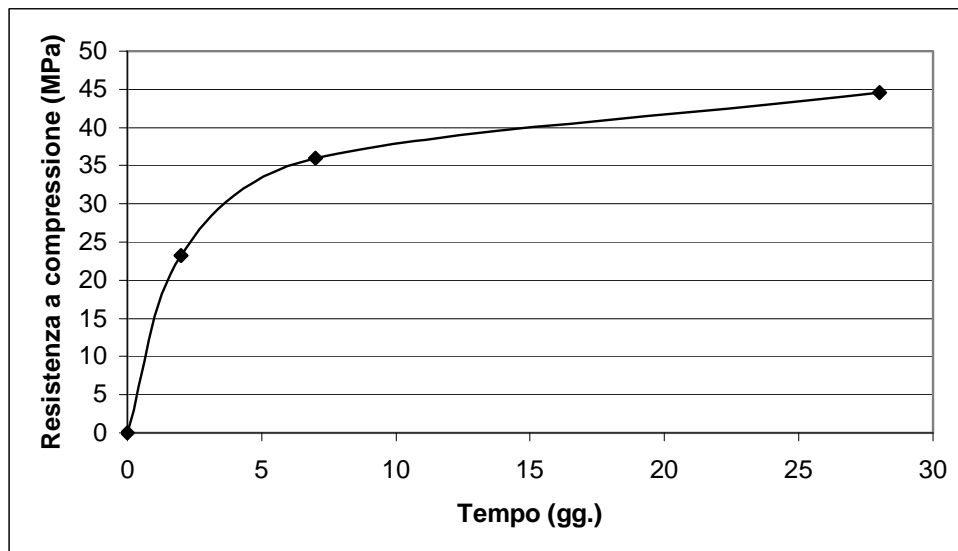


Fig. 7.10 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela L.

Miscela "M"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di:

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 25% naturale, 75% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "M":

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,312 l (3,0%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 3,87 |
| 25 | - |
| 16 | 2,59 |
| 10 | 2,16 |
| 7,1 | 1,29 |
| 4 | 1,81 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 19,00 |
| 25 | - |
| 16 | 7,61 |
| 10 | 8,58 |

Tab. 7.16 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela M.

Per la miscela di tipo "M" si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 18 cm, verificatosi come "crollo veloce". Anche in questo caso, nonostante l'abbassamento al cono sia elevato, questo impasto denota qualità di lavorabilità appena sufficienti dovute alla presenza di molto materiale fino che lo rende molto viscoso. Nel confezionamento dei provini è stato necessario, quindi, un maggior lavoro di costipazione.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.11.

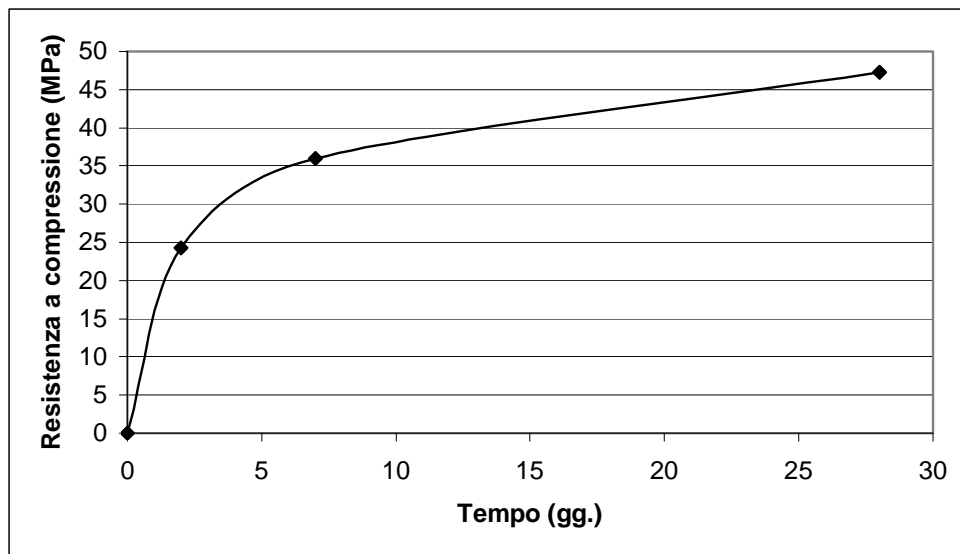


Fig. 7.11 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela M.

Miscela "N"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 100% naturale

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "N" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: /
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 15,5 |
| 25 | - |
| 16 | 10,37 |
| 10 | 8,65 |
| 7,1 | 5,19 |
| 4 | 7,23 |

Tab. 7.17 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela N.

Per la miscela di tipo “N” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 3 cm. In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.12.

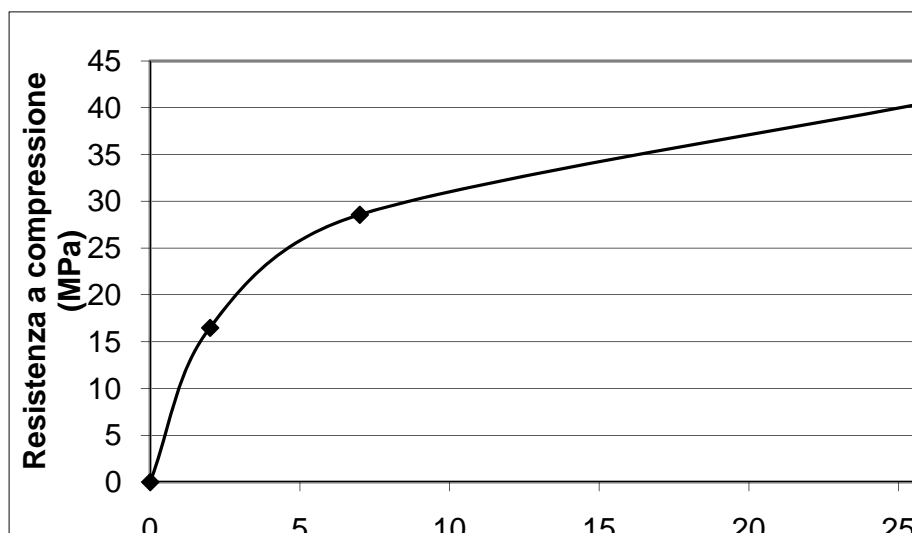


Fig. 7.12 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela N.

Miscela “O”

- La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :
- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 75% naturale, 25% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “O” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d’acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,083 l (0,8%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------------|--------------------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 11,63 |
| 25 | - |
| 16 | 7,78 |
| 10 | 6,49 |
| 7,1 | 3,89 |
| 4 | 5,47 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 6,33 |
| 25 | - |
| 16 | 2,54 |
| 10 | 2,86 |

Tab. 7.18 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela O.

Per la miscela di tipo “O” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 15 cm, verificatosi come “crollo”. L’impasto presenta ottime qualità di fluidità e lavorabilità.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.13.

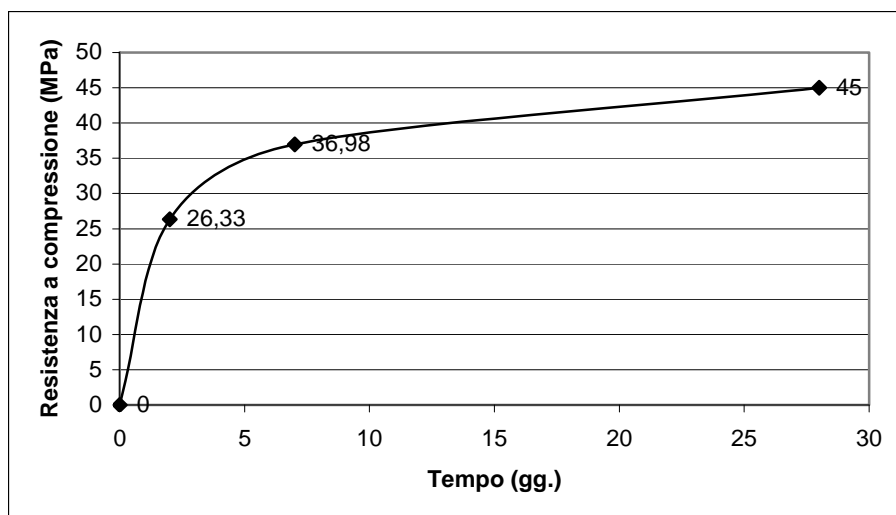


Fig. 7.13 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela O.

Miscela "P"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- aggregati tipo: 100% naturale

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "P" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,04 l (0,4%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 15,5 |
| 25 | - |
| 16 | 10,37 |
| 10 | 8,65 |
| 7,1 | 5,19 |
| 4 | 7,23 |

Tab. 7.19 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela P.

Per la miscela di tipo “P” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 20 cm, verificatosi come “crollo veloce”. L’impasto presenta ottime qualità di fluidità e lavorabilità.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.14.

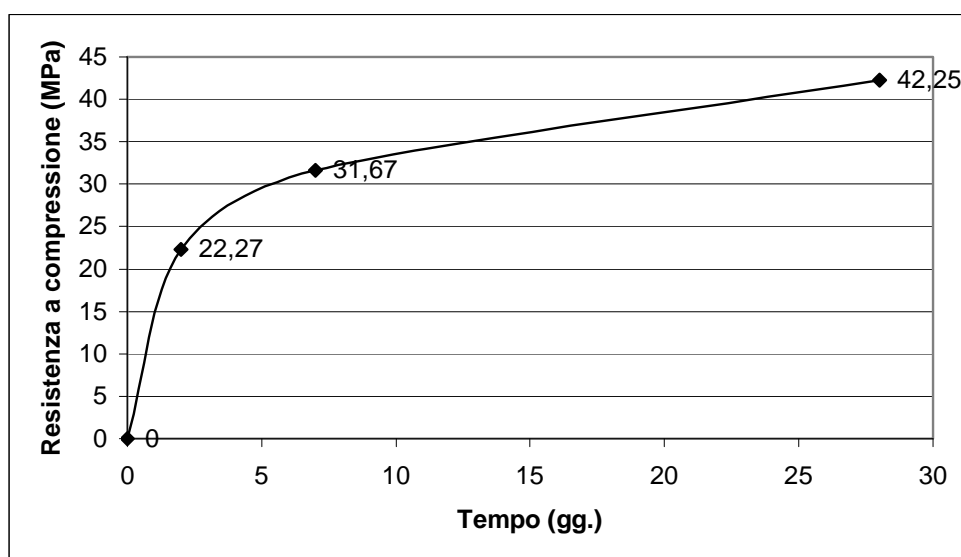


Fig. 7.14 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela P.

Miscela “Q”

La suddetta miscela è caratterizzata dall’utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 25% naturale, 75% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “Q” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d’acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,27 l (2,6%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------|---------------|
|---------------|---------------|

| Aggregato naturale | |
|---------------------|-------|
| Sabbia | 3,87 |
| 25 | - |
| 16 | 2,59 |
| 10 | 2,16 |
| 7,1 | 1,29 |
| 4 | 1,81 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 19,00 |
| 25 | - |
| 16 | 7,61 |
| 10 | 8,58 |

Tab. 7.20 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela Q.

Per la miscela di tipo “Q” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 14 cm, verificatosi come “crollo”. L’impasto presenta una minore lavorabilità rispetto ai precedenti, anche se i provini dopo la sformatura si presentano ben costipati.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni sono stati ottenuti ottimi risultati, come si evince dal grafico in figura 7.15.

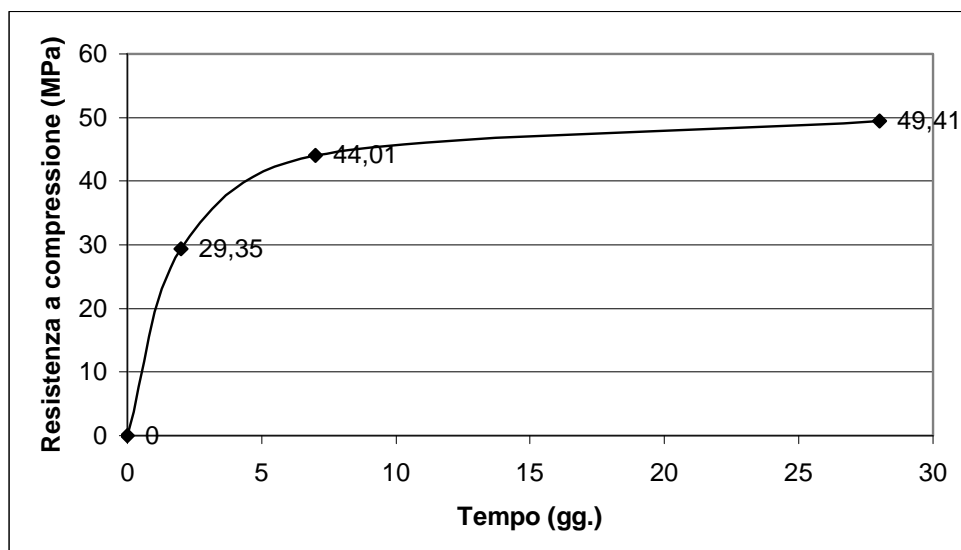


Fig. 7.15 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela Q.

Miscela “R”

La suddetta miscela è caratterizzata dall’utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 100% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “R” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d’acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,416 l (4,0%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato riciclato | |
| fino | 25,34 |
| 25 | - |
| 16 | 10,15 |
| 10 | 11,41 |

Tab. 7.21 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela R.

Per la miscela di tipo “R” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 8 cm, verificatosi come “lento crollo”. Questo impasto denota scarse qualità di lavorabilità, dovute alla presenza di molto materiale fino.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.16.

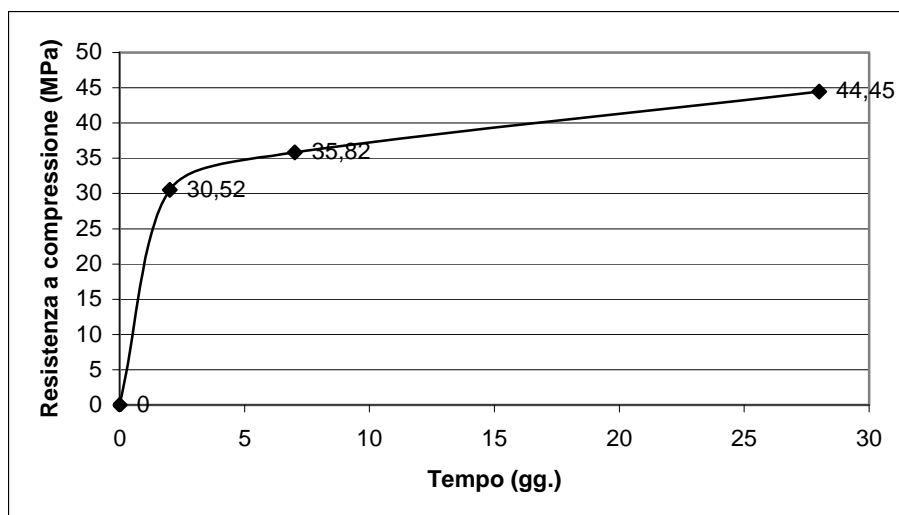


Fig. 7.16 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela R.

Miscela "S"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 75% naturale, 25% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "S" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,083 l (0,8%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 11,63 |
| 25 | - |
| 16 | 7,78 |
| 10 | 6,49 |
| 7,1 | 3,89 |
| 4 | 5,47 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 6,33 |
| 25 | - |
| 16 | 2,54 |
| 10 | 2,86 |

Tab. 7.22 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela S.

Per la miscela di tipo “S” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 18 cm, verificatosi come “crollo veloce”. L’impasto presenta ottime qualità di fluidità e lavorabilità.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.17.

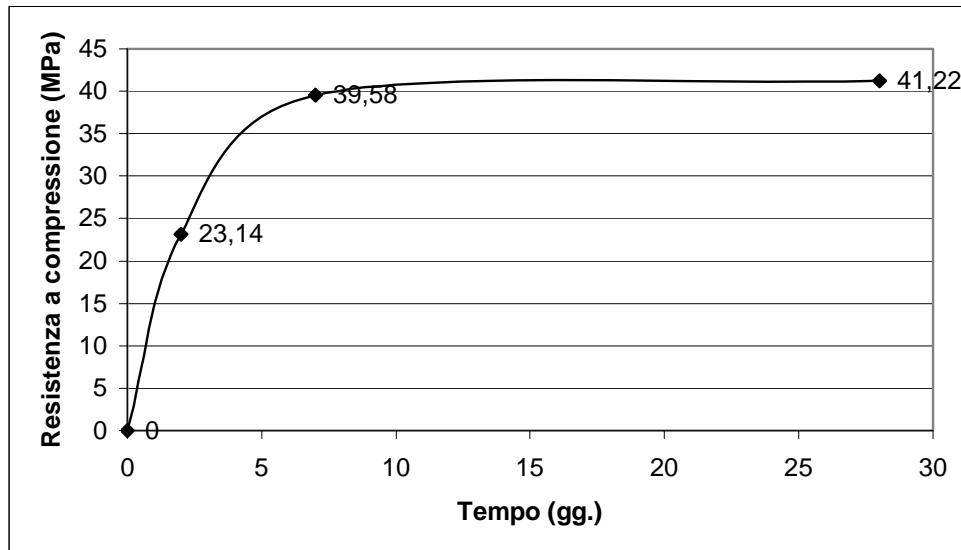


Fig. 7.17 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela S.

Miscela “T”

La suddetta miscela è caratterizzata dall’utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Ergomix 180
- Aggregati tipo: 50% naturale, 50% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “T”:

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d’acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,187 l (1,8%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 7,75 |
| 25 | - |
| 16 | 5,18 |
| 10 | 4,32 |
| 7,1 | 2,59 |
| 4 | 3,61 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 12,2 |
| 25 | - |
| 16 | 5,40 |
| 10 | 5,86 |

Tab. 7.23 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela T.

Per la miscela di tipo “T” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 17 cm, verificatosi come “crollo veloce”.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.18.

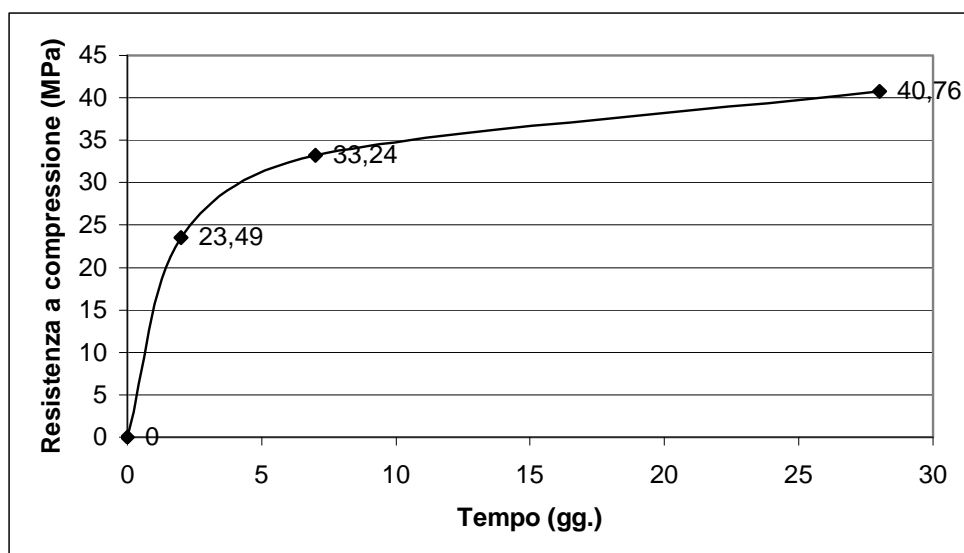


Fig. 7.18 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela T.

Miscela “U”

La suddetta miscela è caratterizzata dall’utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 25% naturale, 75% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “U” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d’acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,27 l (2,6%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|--------------------------|--------------------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 3,87 |
| 25 | - |
| 16 | 2,59 |
| 10 | 2,16 |
| 7,1 | 1,29 |
| 4 | 1,81 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 19,00 |
| 25 | - |
| 16 | 7,61 |
| 10 | 8,58 |

Tab. 7.24 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela U.

Per la miscela di tipo “U” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 18 cm, verificatosi come “crollo veloce”. Nonostante l’abbassamento al cono sia elevato, questo impasto denota qualità di lavorabilità appena sufficienti, dovute alla presenza di molto materiale fino che lo rende viscoso. Nel confezionamento dei provini è stato necessario, quindi, un maggior lavoro di costipazione.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.19.

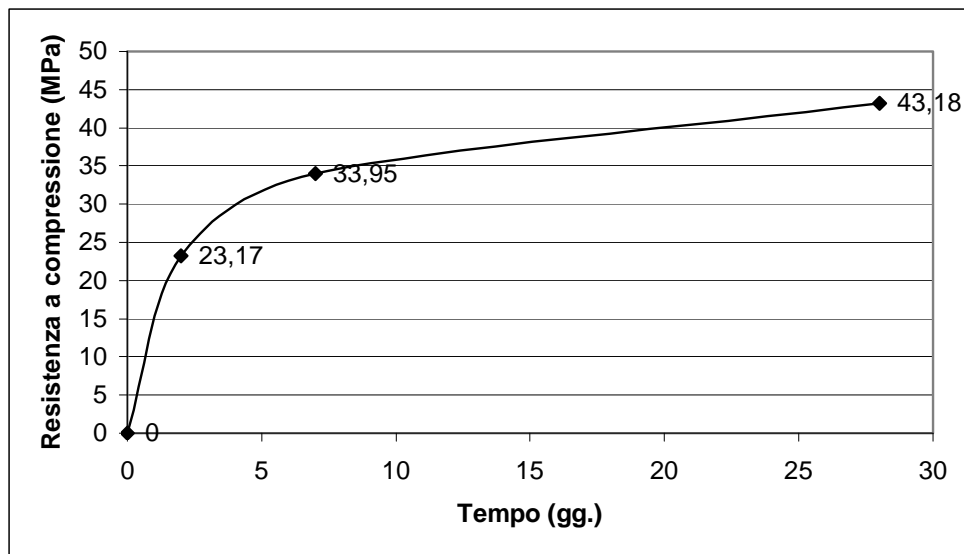


Fig. 7.19 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela U.

Miscela "V"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 50% naturale, 50% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "V" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,166 l (1,6%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 7,75 |
| 25 | - |
| 16 | 5,18 |
| 10 | 4,32 |
| 7,1 | 2,59 |
| 4 | 3,61 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 12,2 |
| 25 | - |
| 16 | 5,40 |
| 10 | 5,86 |

Tab. 7.25 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela V.

Per la miscela di tipo “V” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 15 cm, verificatosi come “crollo veloce”. L’impasto presenta una buona qualità di fluidità e lavorabilità.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.20.

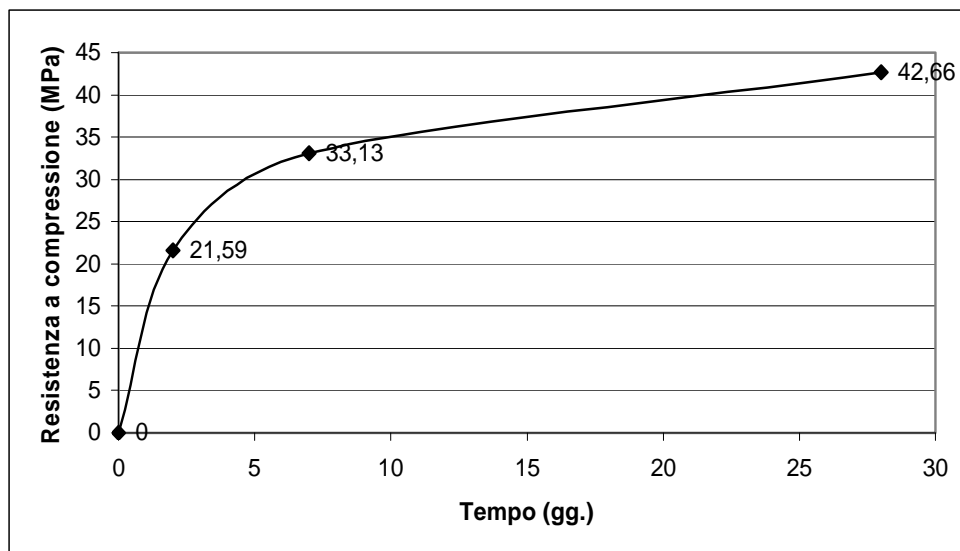


Fig. 7.20 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela V.

Miscela “W”

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 75% naturale, 25% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “W” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,062 l (0,6%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 11,63 |
| 25 | - |
| 16 | 7,78 |
| 10 | 6,49 |
| 7,1 | 3,89 |
| 4 | 5,47 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 6,33 |
| 25 | - |
| 16 | 2,54 |
| 10 | 2,86 |

Tab. 7.26 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela W.

Per la miscela di tipo “W” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 19 cm, verificatosi come “crollo veloce” (fig. 7.32).L'impasto evidenzia ottime qualità di fluidità e lavorabilità.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.21.

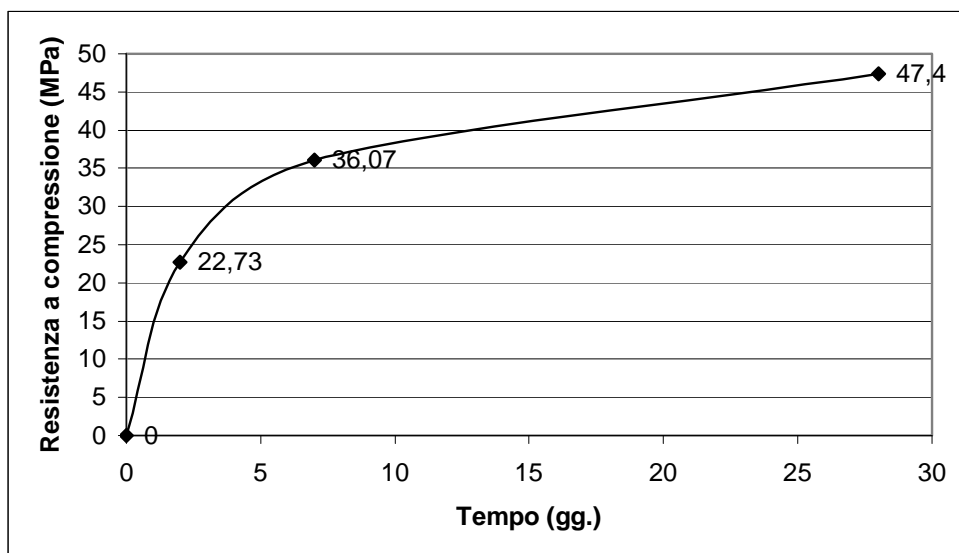


Fig. 7.21 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela W.

Miscela "Z"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di:

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 50% naturale, 50% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "Z":

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,166 l (1,6%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 7,75 |
| 25 | - |
| 16 | 5,18 |
| 10 | 4,32 |
| 7,1 | 2,59 |
| 4 | 3,61 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 12,2 |
| 25 | - |
| 16 | 5,40 |
| 10 | 5,86 |

Tab. 7.27 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela Z.

Per la miscela di tipo “Z” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 20 cm, verificatosi come “crollo veloce”. Anche in questo caso l’impasto evidenzia ottime qualità di fluidità e lavorabilità.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.22.

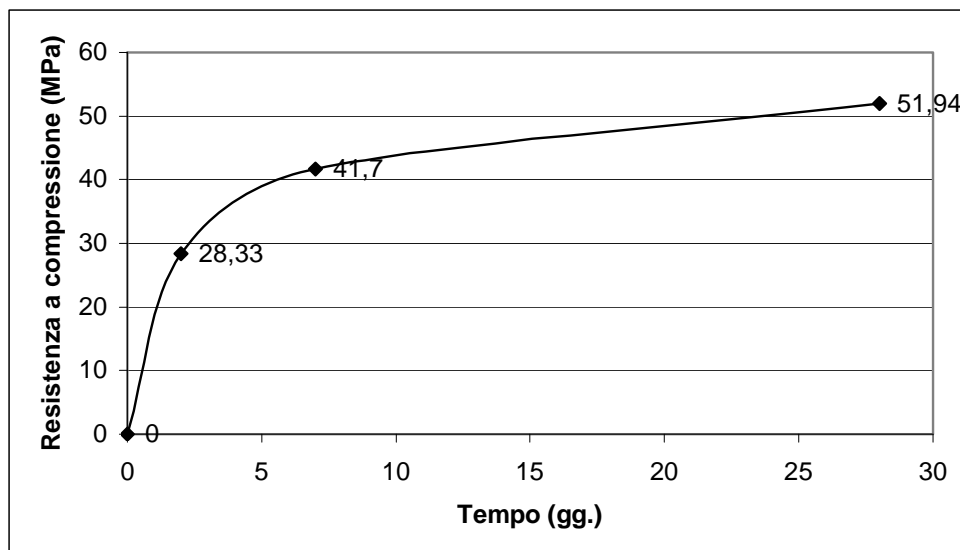


Fig. 7.22 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela Z.

Miscela “K”

La suddetta miscela è caratterizzata dall’utilizzo di:

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 100% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “K”:

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d’acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,436 l (4,2%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato riciclato | |
| fino | 25,34 |
| 25 | - |
| 16 | 10,15 |
| 10 | 11,41 |

Tab. 7.28 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela K.

Per la miscela di tipo “K” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 18 cm, verificatosi come “lento crollo”. Questo impasto denota scarse qualità di lavorabilità, dovute alla presenza di molto materiale fino.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.23.

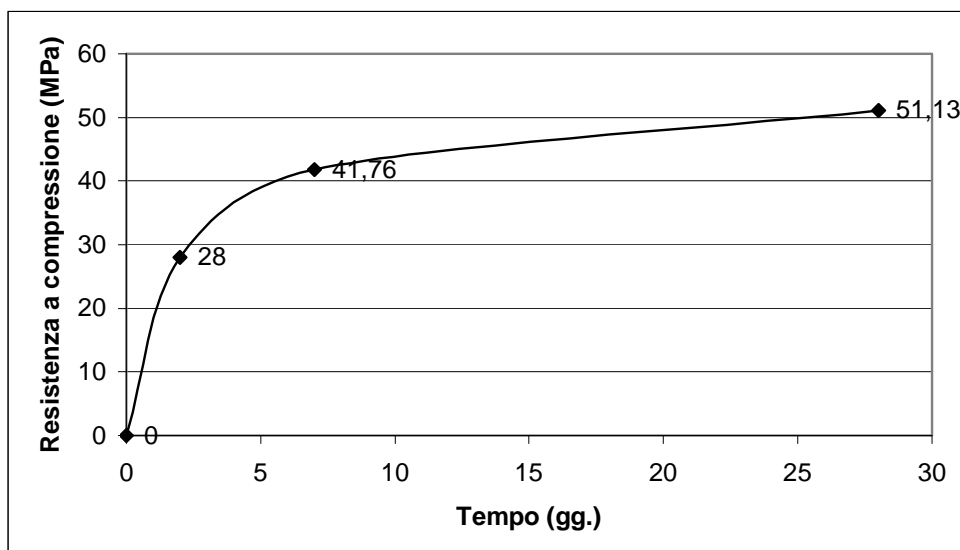


Fig. 7.23 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela K.
Miscela "Y"

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/LL 32,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 100% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo "Y" :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,436 l (4,2%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato riciclato | |
| fino | 25,34 |
| 25 | - |
| 16 | 10,15 |
| 10 | 11,41 |

Tab. 7.29 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela Y.

Per la miscela di tipo “Y” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 19 cm, verificatosi come “lento crollo”. Anche questo impasto denota scarse qualità di lavorabilità, dovute alla presenza di molto materiale fino.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.24.

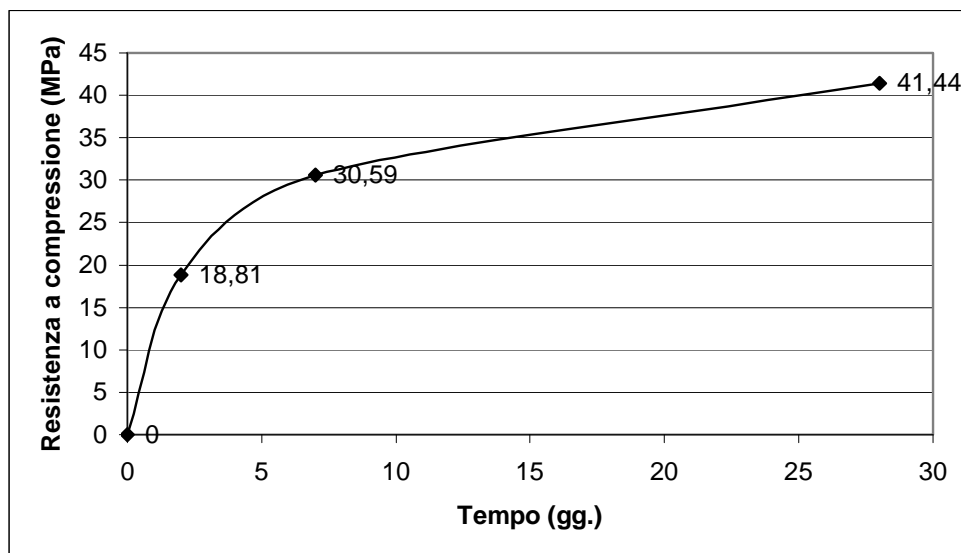


Fig. 7.24 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela Y.

Miscela “X”

La suddetta miscela è caratterizzata dall'utilizzo di :

- cemento tipo: CEM II A/L 42,5 R
- additivo tipo: Fluid Premia 150
- Aggregati tipo: 25% naturale, 75% riciclato

Si riporta di seguito la composizione della miscela di tipo “X” :

- Contenuto di cemento: 10,4 kg
- Contenuto d'acqua : 4,68 l
- Contenuto di additivo: 0,29 l (2,8%)
- Peso totale degli aggregati: 46,90 kg

Gli aggregati sono stati dosati, in considerazione della granulometria ottimale, nelle seguenti quantità:

| Diametro (mm) | Quantità (kg) |
|---------------------|---------------|
| Aggregato naturale | |
| Sabbia | 3,87 |
| 25 | - |
| 16 | 2,59 |
| 10 | 2,16 |
| 7,1 | 1,29 |
| 4 | 1,81 |
| Aggregato riciclato | |
| fino | 19,00 |
| 25 | - |
| 16 | 7,61 |
| 10 | 8,58 |

Tab. 7.30 - Quantitativi delle diverse frazioni granulometriche utilizzate per la miscela X.

Per la miscela di tipo “X” si è misurato un abbassamento al cono di Abrams di 18 cm, verificatosi come “crollo veloce”. Nonostante l’abbassamento al cono sia elevato, questo impasto denota qualità di lavorabilità appena sufficienti, dovute alla presenza di molto materiale fino che lo rende viscoso.

In seguito alle prove di resistenza a compressione effettuate a 2, 7 e 28 giorni si sono ottenuti ottimi risultati, come denota il grafico in figura 7.25.

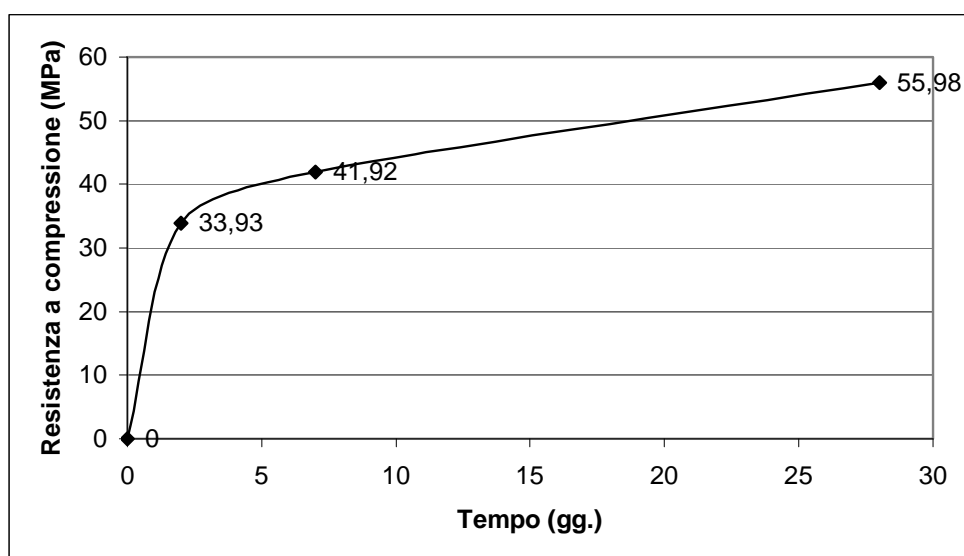


Fig. 7.25 - Valori di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo realizzati con la miscela X.

7.6 Confronti ed osservazioni

7.6.1 Lavorabilità

Osservando la tabella 7.31 che riassume gli abbassamenti ottenuti per le diverse miscele si nota immediatamente che alcuni impasti non ricadono nella classe di consistenza S4. La classe di consistenza desiderata è stata, però, raggiunta per tutte le miscele con aggregati misti.

Tuttavia non si sono ripetuti ulteriormente gli impasti perché la sola prova di slump non è rappresentativa del comportamento effettivo della miscela in relazione alla lavorabilità.

| Tipo misc. | Nat%/Ric.% | Cemento | Additivo (%) | SLUMP (cm) |
|------------|------------|---------|--------------|------------|
| H | 50/50 | 32.5 | Ergomix 1.8 | 15 |
| I | 75/25 | 32.5 | Ergomix 0.8 | 20 |
| L | 0/100 | 32.5 | Ergomix 4.0 | 13 |
| M | 25/75 | 32.5 | Ergomix 3.0 | 18 |
| N | 100/0 | 32.5 | - | 3 |
| O | 75/25 | 42.5 | Ergomix 0.8 | 15 |
| P | 100/0 | 42.5 | Ergomix 0.4 | 20 |
| Q | 25/75 | 42.5 | Ergomix 2.6 | 14 |
| R | 0/100 | 42.5 | Ergomix 4.0 | 8 |
| S | 75/25 | 32.5 | Premia 0.8 | 18 |
| T | 50/50 | 42.5 | Ergomix 1.8 | 17 |
| U | 25/75 | 32.5 | Premia 2.6 | 18 |
| V | 50/50 | 32.5 | Premia 1.6 | 15 |
| Z | 50/50 | 42.5 | Premia 1.6 | 20 |
| W | 75/25 | 42.5 | Premia 0.6 | 19 |
| K | 0/100 | 42.5 | Premia 4.2 | 18 |
| Y | 0/100 | 32.5 | Premia 4.2 | 19 |
| X | 25/75 | 42.5 | Premia 2.8 | 18 |

Tab. 7.31 - Slump relativo alle miscele definitive.

Prendendo in considerazione la miscela M, con un contenuto di aggregati riciclati del 75% in peso, si ottiene un abbassamento al cono di 18 cm, che presuppone una buona lavorabilità, mentre si riscontra una difficile lavorabilità in fase di miscelazione.

Infatti si è osservato che la presenza del materiale fine dell'aggregato di riciclo provoca nelle miscele di calcestruzzo un comportamento viscoso, che aumenta in funzione della percentuale di aggregato riciclato.

Nelle miscele con percentuale di aggregato riciclato fino al 50% si riscontra una buona lavorabilità, mentre per percentuali maggiori, nonostante un elevato abbassamento al cono, dovuto all'azione fluidificante degli additivi, si nota un precoce indurimento che rende l'impasto poco lavorabile.

Tra le diverse miscele quelle preparate con l'additivo Premio 150 esibiscono una migliore lavorabilità rispetto a quelle preparate con l'additivo Ergomix 180.

A titolo di esempio basti osservare le miscele T e Z, la cui composizione differisce solo per il tipo di additivo utilizzato.

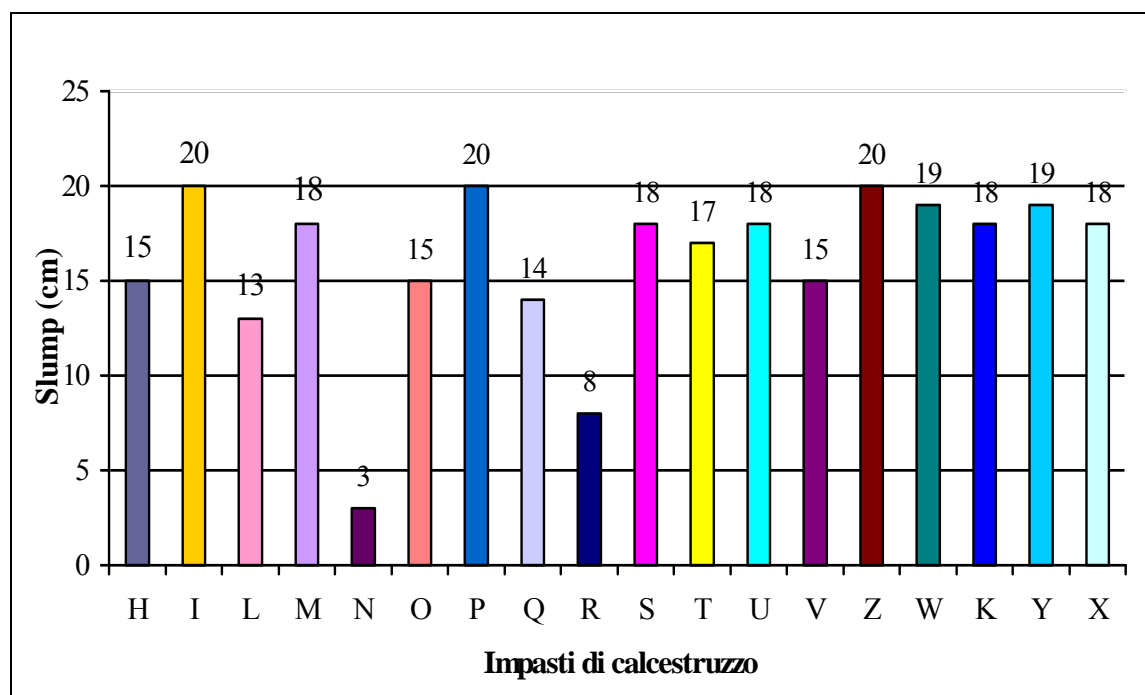


Fig. 7.26 - Slump relativo agli impasti delle miscele definitive.

La miscela Z raggiunge un abbassamento al cono di 20 cm contro i 17 cm della miscela T, nonostante la percentuale di additivo Premia sia inferiore a quella di additivo Ergomix del 2%.

Una ulteriore conferma di quanto detto sopra nasce dal confronto tra le miscele O e W o ancora tra le miscele M ed U per le quali si è misurato lo stesso abbassamento al cono utilizzando una percentuale di Premia inferiore del 4%.

7.6.2 Resistenza a compressione

| Misc. | Nat%/Ric.% | Cemento | Additivo | R _c (MPa) 2 gg | R _c (MPa) 7 gg | R _c (MPa) 28 gg |
|-------|------------|---------|-----------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| H | 50/50 | 32.5 | Erg. 1.8% | 22,45 | 32,55 | 45,41 |
| I | 75/25 | 32.5 | Erg. 0.8% | 23,96 | 35,89 | 45,05 |
| L | 0/100 | 32.5 | Erg. 4.0% | 23,26 | 35,95 | 44,60 |
| M | 25/75 | 32.5 | Erg. 3.0% | 24,32 | 35,95 | 47,33 |
| N | 100/0 | 32.5 | - | 16,47 | 28,55 | 41,76 |
| O | 75/25 | 42.5 | Erg. 0.8% | 26,33 | 36,98 | 45,00 |
| P | 100/0 | 42.5 | Erg. 0.4% | 22,27 | 31,67 | 42,25 |
| Q | 25/75 | 42.5 | Erg. 2.6% | 29,35 | 44,01 | 49,41 |
| R | 0/100 | 42.5 | Erg. 4.0% | 30,52 | 35,82 | 44,45 |
| S | 75/25 | 32.5 | Pre. 0.8% | 23,14 | 39,58 | 41,22 |
| T | 50/50 | 42.5 | Erg. 1.8% | 23,49 | 33,24 | 40,76 |
| U | 25/75 | 32.5 | Pre. 2.6% | 23,17 | 33,95 | 43,18 |
| V | 50/50 | 32.5 | Pre. 1.6% | 21,59 | 33,13 | 42,66 |
| Z | 50/50 | 42.5 | Pre. 1.6% | 28,33 | 41,70 | 51,94 |
| W | 75/25 | 42.5 | Pre. 0.6% | 22,73 | 36,07 | 47,04 |
| K | 0/100 | 42.5 | Pre. 4.2% | 28,00 | 41,76 | 51,13 |
| Y | 0/100 | 32.5 | Pre. 4.2% | 18,81 | 30,59 | 41,44 |
| X | 25/75 | 42.5 | Pre. 2.8% | 33,93 | 41,92 | 55,98 |

Tab. 7.32 - Resistenze a compressione a 2, 7, 28 giorni relative ai provini realizzati con gli impasti delle miscele definitive.

Nella tabella 7.30 sono riportate le resistenze meccaniche a compressione dei provini realizzati con le varie miscele, a diversi tempi di stagionatura. I risultati ottenuti sono meglio esplicitati nel grafico di figura 7.27.

È immediato rilevare che la massima resistenza a compressione si ottiene per i provini di calcestruzzo realizzati con la miscela X, caratterizzati dall' utilizzo di cemento di tipo CEM II A-L 42,5 R, additivo Premio 150 e aggregati riciclati per il 75%.

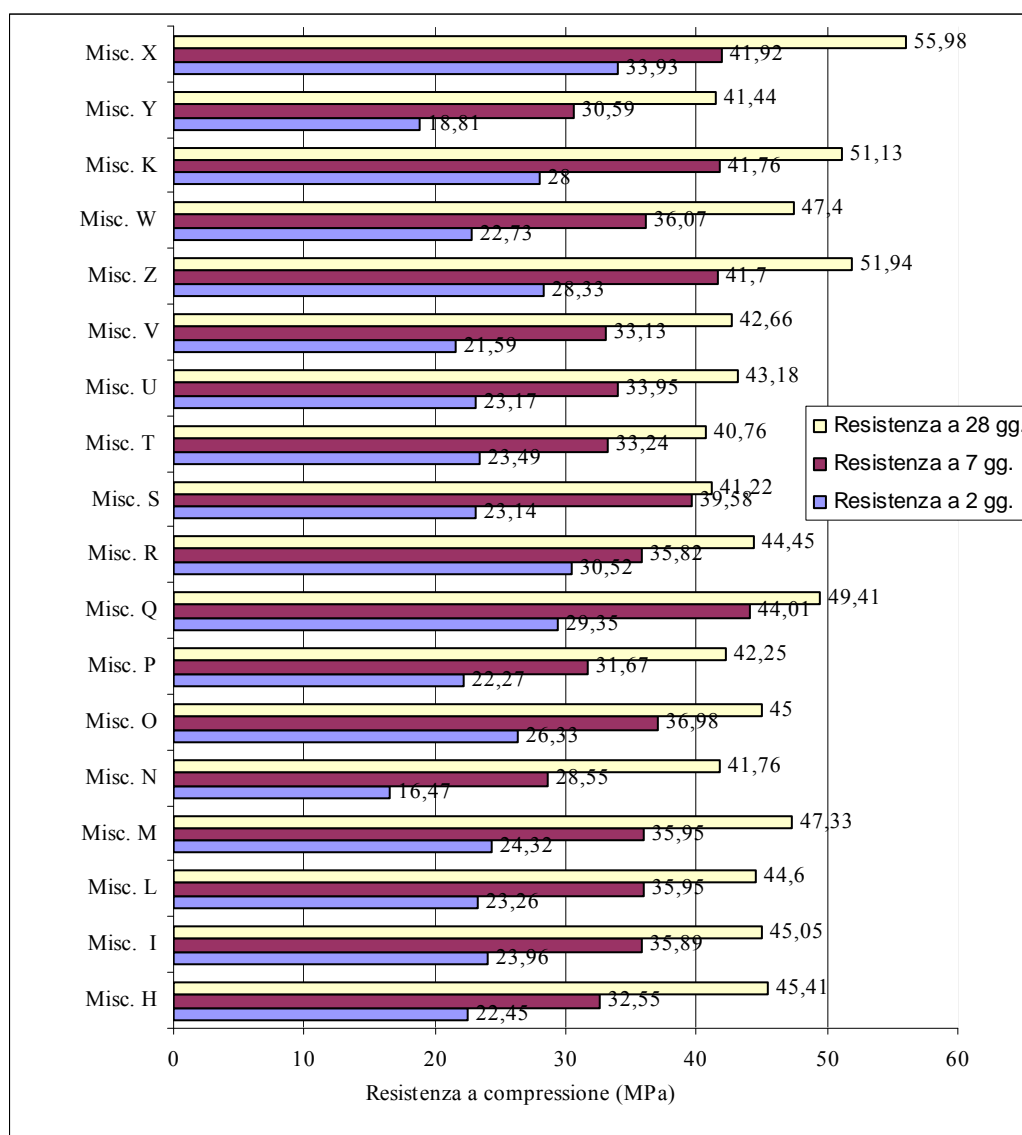


Fig. 7.27 - Resistenze a compressione a 2, 7, 28 giorni relative ai provini di calcestruzzo realizzati con le miscele definitive.

Per questi provini si raggiungono i 56 MPa circa a 28 giorni di stagionatura, un risultato sorprendente se raffrontato con la massima resistenza raggiunta dai provini P, che rappresentano miscele largamente in uso per calcestruzzi strutturali.

La resistenza più bassa si registra, invece, per i provini di calcestruzzo realizzati con le miscele T, anche se si è ottenuto, comunque, il valore di 40,76 MPa a 28 giorni di stagionatura.

Dal confronto tra le resistenze dei vari provini, ed in particolare tra quelli realizzati con le miscele H e V (fig. 7.28), che, a parità di slump differiscono solo per il tipo di additivo adottato, risulta che alle brevi e medie stagionature i provini confezionati con l'aggiunta di Ergomix raggiungono resistenze maggiori, mentre alle lunghe stagionature quelli confezionati con additivo Premio 150 risultano più resistenti.

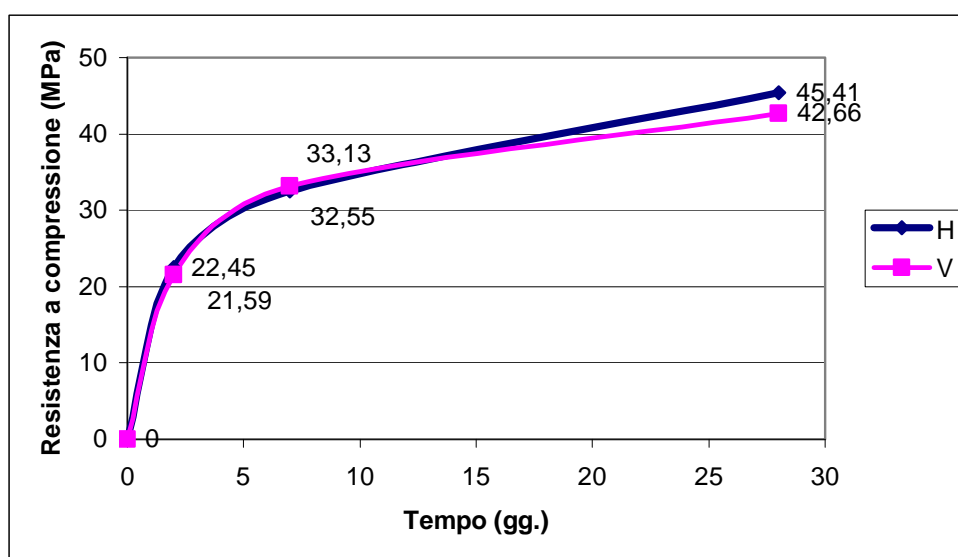


Fig. 7.28 - Resistenze a compressione a 2, 7, 28 giorni relative ai provini realizzati con le miscele H e V.

In effetti i provini che hanno superato i 50 MPa di resistenza a compressione a 28 giorni sono stati confezionati tutti con l'aggiunta di additivo Premio 150.

Di seguito sono stati confrontati i risultati delle prove di resistenza a compressione dei provini aventi stessa composizione granulometrica in funzione della variazione di cemento ed additivo. Dai grafici nelle figure successive risulta evidente che la resistenza a compressione aumenta, in funzione del tipo di cemento utilizzato, ma soprattutto in relazione alla quantità di aggregato riciclato.

Questo risultato è da attribuire anzitutto alla buona qualità degli aggregati di riciclo, all'ottimizzazione dei costituenti degli impasti, ma soprattutto alla presenza del materiale fino.

Gli aggregati di riciclo hanno la caratteristica intrinseca di assorbire molta acqua, per la presenza di materiale fino, per cui il rapporto a/c è minore rispetto alla stessa miscela con aggregati naturali, inoltre la frazione più fina va ad occupare gli spazi vuoti producendo un aumento di resistenza.

Dal grafico in figura 7.29 si evince che i provini realizzati con il 50% di aggregati riciclati e additivo Premio hanno ottenuto una resistenza meccanica maggiore.

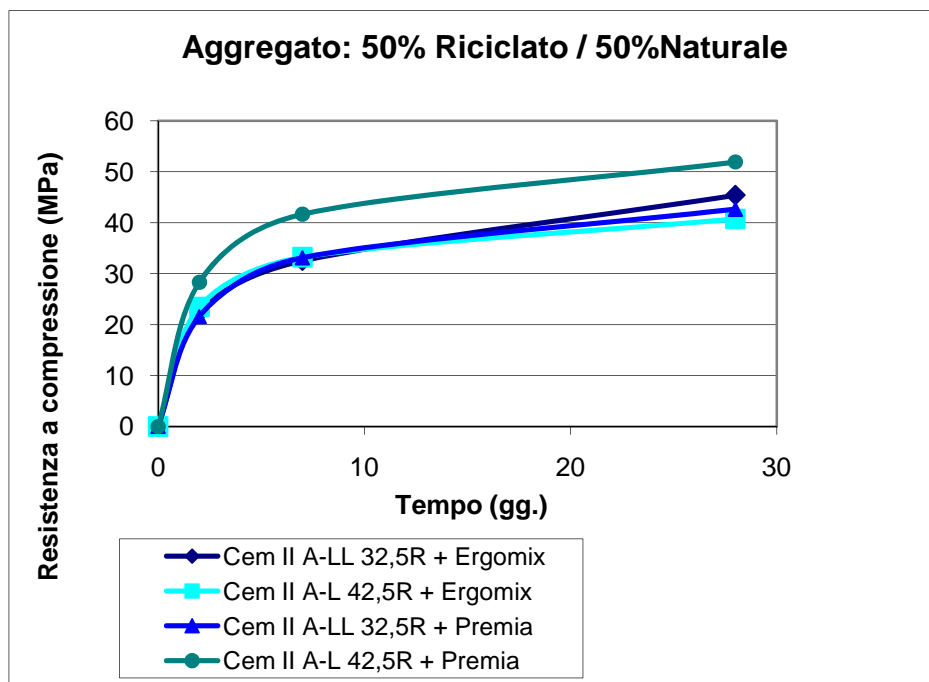


Fig. 7.29 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica.

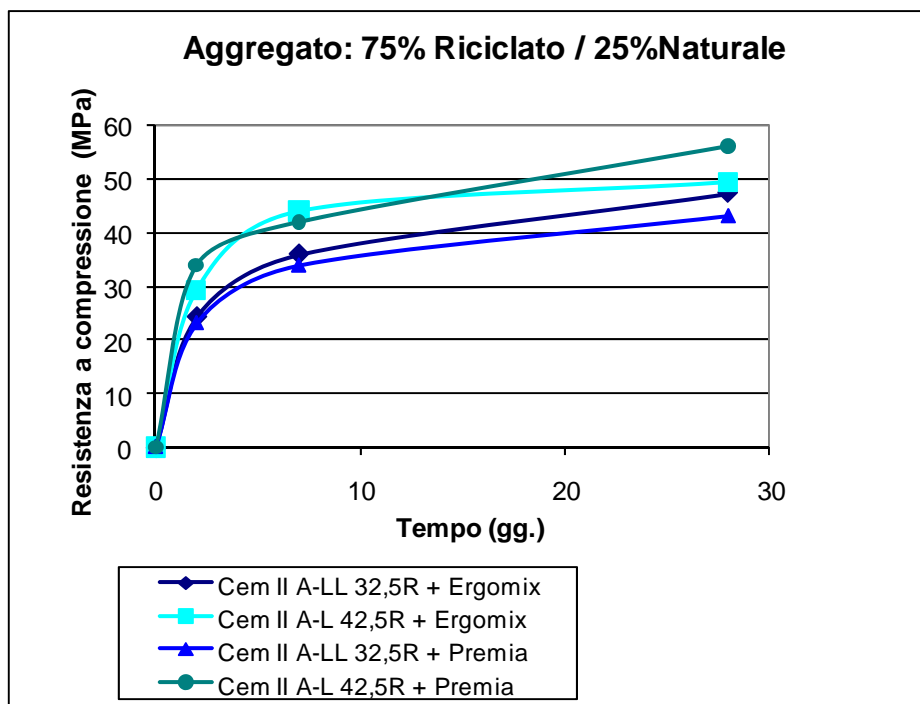


Fig. 7.30 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica.

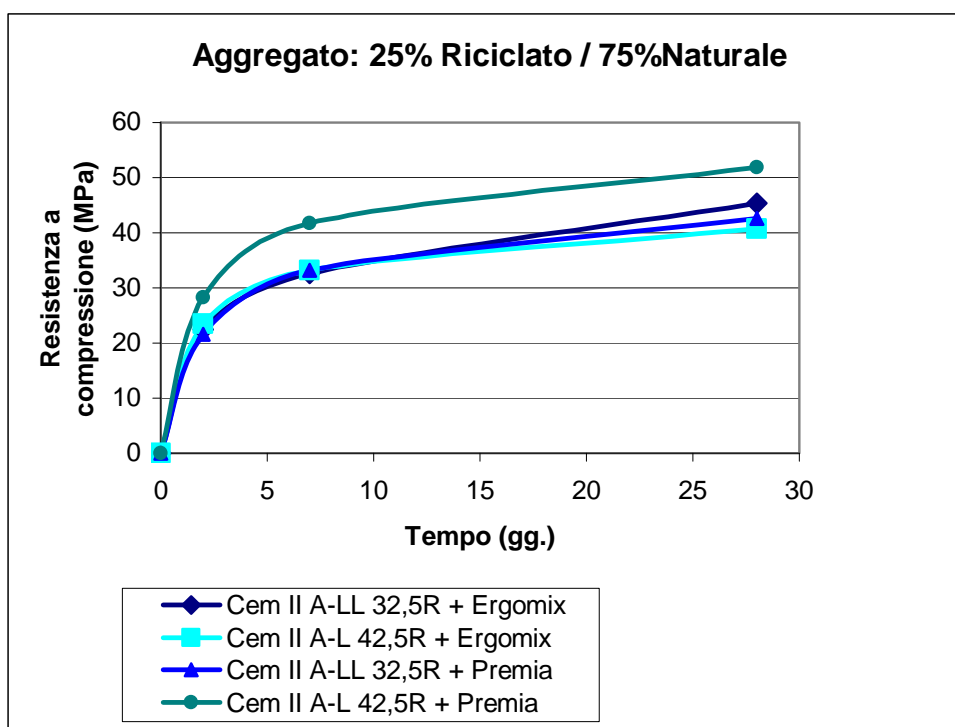


Fig. 7.31 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con diversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica.

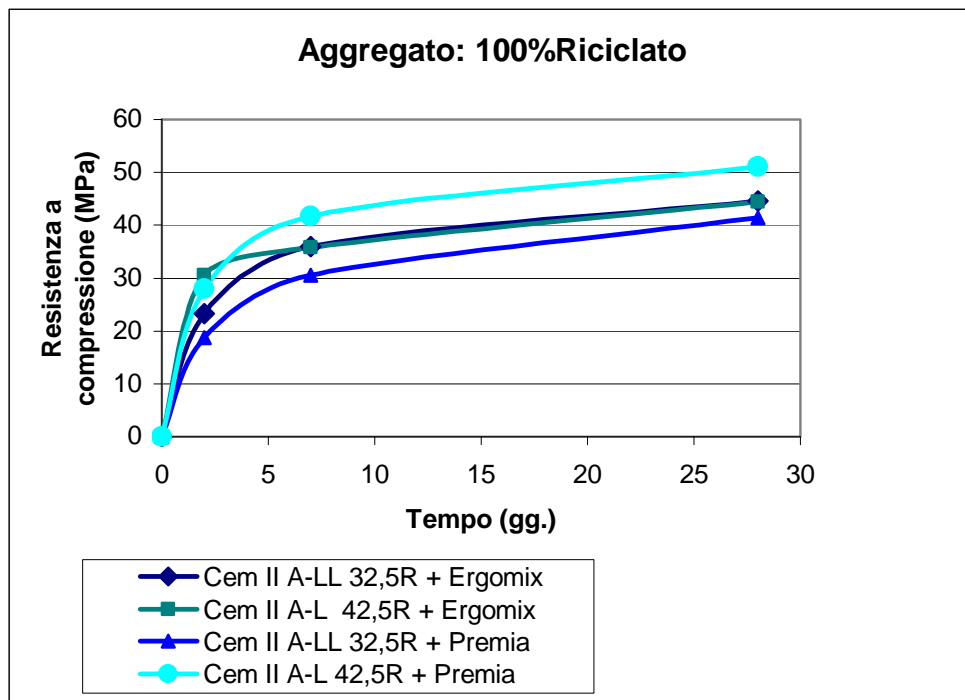


Fig. 7.32 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati codiversi tipi di cemento e additivo e uguale composizione granulometrica.

Come osservato precedentemente i provini confezionati con l'aggiunta di Ergomix raggiungono resistenze maggiori alle brevi stagionature, mentre alle lunghe stagionature quelli confezionati con Premia risultano più resistenti.

Per i provini confezionati con l'additivo Ergomix si osserva alle lunghe stagionature una convergenza di risultati per entrambe i tipi di cemento.

In definitiva l'utilizzo dell'additivo Premia nelle miscele con aggregati riciclati permette di raggiungere risultati migliori in relazione alla lavorabilità e alle resistenze a compressione alle lunghe stagionature rispetto ai provini delle miscele realizzate con additivo Ergomix.

Di seguito si sono confrontati i risultati delle prove di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo confezionati con miscele aventi stesso tipo di cemento ed additivo, in funzione della variazione della composizione dell'aggregato.

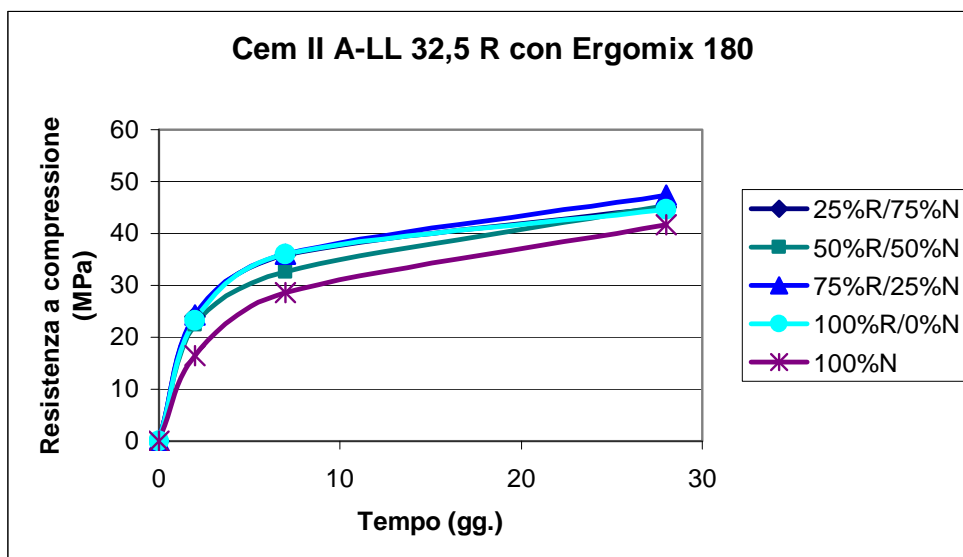


Fig. 7.33 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-LL 32,5 R ed Ergomix 180 e diverse composizioni di aggregato.

Dai grafici nelle figure 7.33 e 7.34 si evince come l'impiego dell'additivo Ergomix esalti le qualità del cemento CEM II A-LL 32,5R, in quanto si raggiungono, resistenze elevate sia alle brevi che alle lunghe stagionature.

L'utilizzo dell'additivo Premia permette invece il raggiungimento di resistenze meccaniche leggermente inferiori.

Tutte le miscele confezionate con CEM II A-LL 32,5R e Premia 150 alle lunghe stagionature sembrano convergere verso valori simili di resistenza (fig. 7.34).

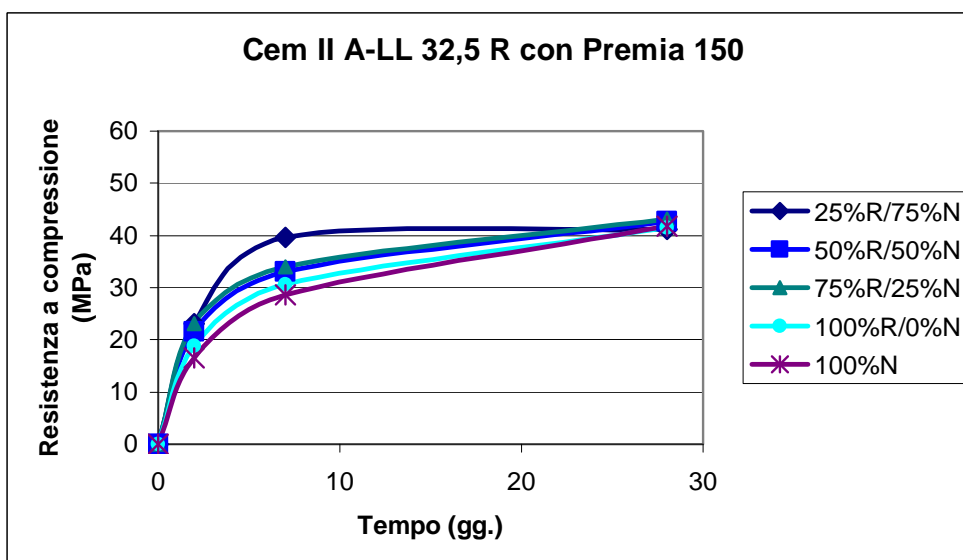


Fig. 7.34 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-LL 32,5 R e Premia 150 e diverse composizioni di aggregati.

Dai grafici nelle figure 7.35 e 7.36 si può notare, invece, come l'impiego dell'additivo Premio 150 esalti le qualità del cemento CEM II A-L 42,5R. Si raggiungono, infatti, sia alle brevi che alle lunghe stagionature, resistenze più elevate rispetto a quelle ottenute con l'additivo Ergomix e lo stesso tipo di cemento.

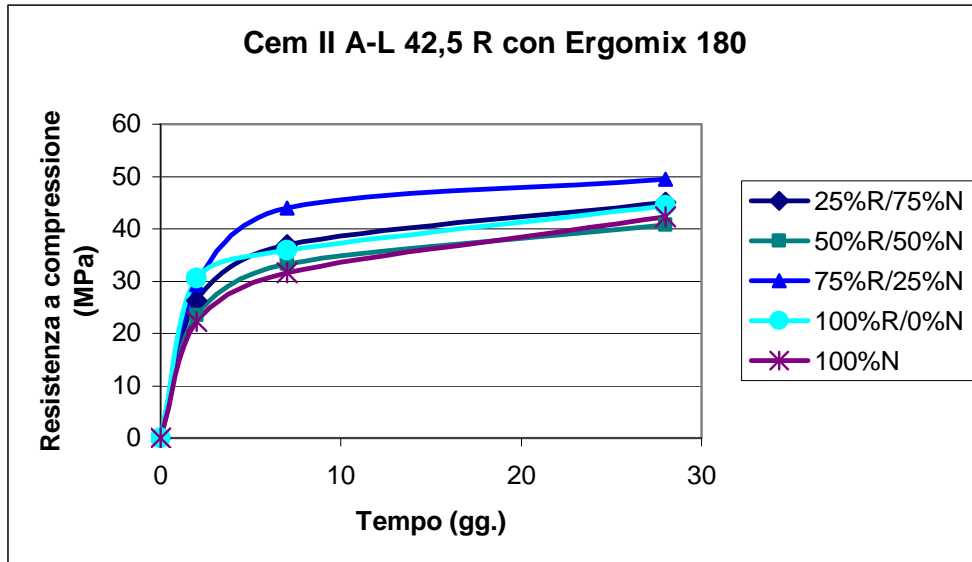


Fig. 7.35 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-L 42,5 R ed Ergomix 180 e diverse composizioni di aggregati.

Il valore più elevato di resistenza a compressione si raggiunge sui provini confezionati con la miscela X, che raggiungono valori prossimi a 56 MPa.

L'utilizzo dell'additivo Ergomix non permette invece di superare resistenze di 50 Mpa.

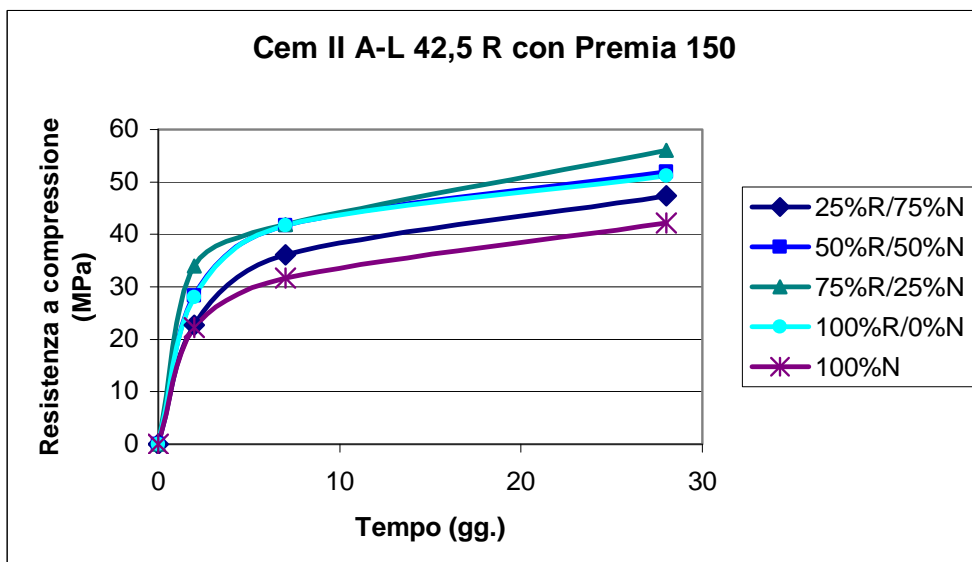


Fig. 7.36 - Andamento delle resistenze a compressione nel tempo dei provini realizzati con CEM II A-L 42,5 R e Premio 150 e diverse composizioni di aggregati.

7.7 Determinazione penetrabilità dello ione cloruro

La seguente tabella (Tab.7.33), riassume i risultati di penetrazione dello ione cloruro ottenuti nei provini sottoposti all'attacco chimico. Mentre le figure 7.8 e 7.9 evidenziano per entrambe le tipologie di cemento usato, la penetrazione in millimetri dell'agente aggressivo nei provini campionati. Come si può osservare i valori sono molto bassi, il che ci permette di affermare che le miscele proposte manifestano una buona opposizione all'avanzamento dello ione cloruro.

| Sigla impasto | INERTE DI RICICLO % | INERTE PULITO % | CEMENTO | ADDITIVO (tipo e %) | aggressione (mm) |
|---------------|---------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------------|
| H | 50 | 50 | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 1.8 | 13 |
| I | 25 | 75 | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 0.8 | 12 |
| L | 100 | - | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 4.0 | 14 |
| M | 75 | 25 | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 3.0 | 10 |
| N | - | 100 | II/A-LL 32.5 R | ----- | 15 |
| S | 25 | 75 | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 0.8 | 11 |
| U | 75 | 25 | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 2.6 | 6 |
| V | 50 | 50 | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 1.6 | 7 |
| Y | 100 | - | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 4.2 | 3 |
| K | 100 | - | II/A-L 42.5 R | PREMIA 4.2 | 4 |
| O | 25 | 75 | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 0.8 | 6 |
| P | - | 100 | II/A-L 42.5 R | ----- | 9 |
| Q | 75 | 25 | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 2.6 | 4 |
| R | 100 | - | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 4.0 | 2 |
| T | 50 | 50 | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 1.8 | 8 |
| W | 25 | 75 | II/A-L 42.5 R | PREMIA 0.6 | 2 |
| X | 75 | 25 | II/A-L 42.5 R | PREMIA 2.8 | 3 |
| Z | 50 | 50 | II/A-L 42.5 R | PREMIA 1.6 | 4 |

Tab. 7.33 - Profondità di penetrazione dello ione cloruro nei provini di calcestruzzo realizzati.

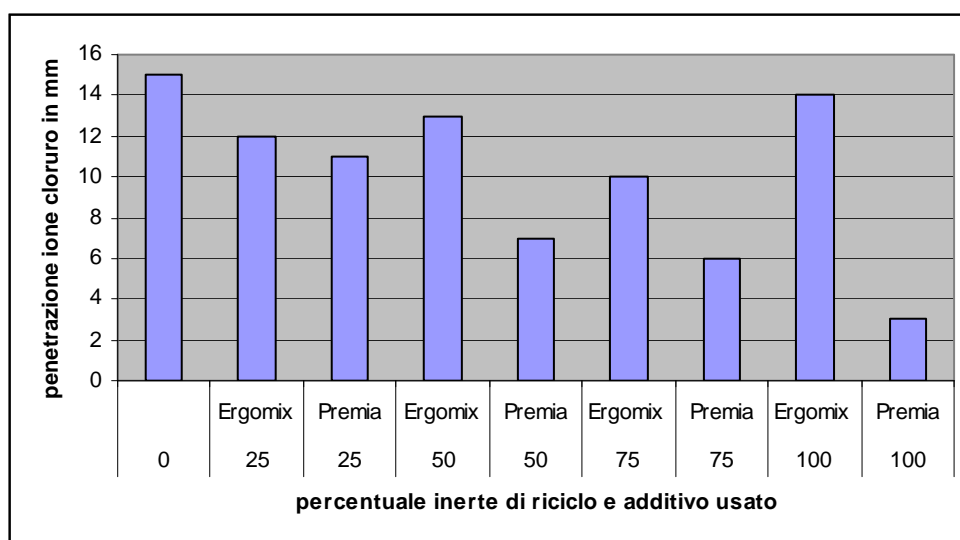


Fig. 7.37 - Profondità di penetrazione da cloruri, nei provini confezionati con CEM II/A-LL 32.5 R.

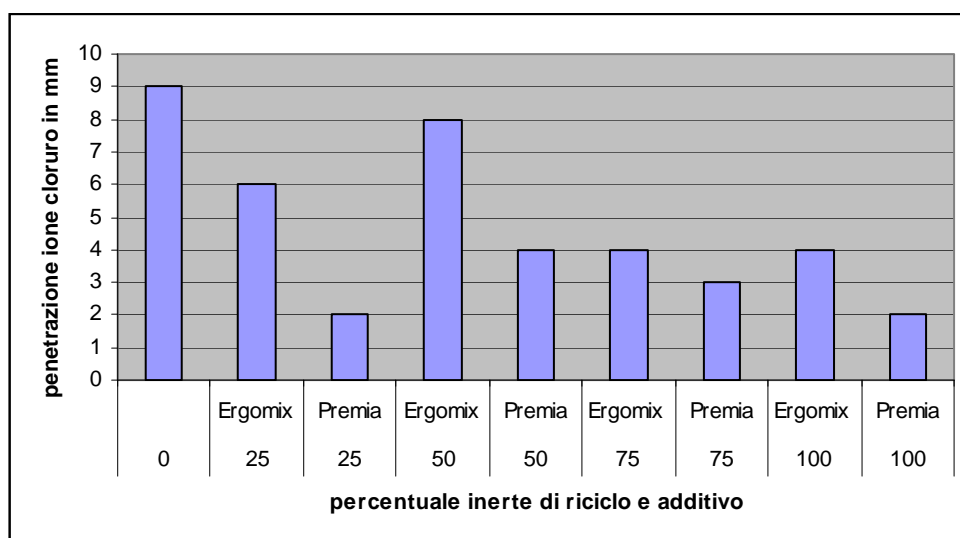


Fig. 7.38 - Profondità di penetrazione da cloruri, nei provini confezionati con CEM II/A-L 42.5 R.

7.8 Determinazione penetrabilità dello ione solfato

Come si vede dalla figura 7.39 nelle prove effettuate si è riscontrato un piccolo attacco chimico dei provini, quindi la penetrazione dei solfati è stata minima, se non nulla, ciò ci permette di affermare che le miscele proposte manifestano un'elevata opposizione all'avanzamento dello ione solfato.

| Sigla impasto | INERTE DI RICICLO % | INERTE PULITO % | CEMENTO | ADDITIVO (tipo e %) | aggressione (mm) |
|---------------|---------------------|-----------------|----------------|---------------------|------------------|
| H | 50 | 50 | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 1.8 | 1 |
| I | 25 | 75 | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 0.8 | 2 |
| L | 100 | - | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 4.0 | 1 |
| M | 75 | 25 | II/A-LL 32.5 R | ERGOMIX 3.0 | 3 |
| N | - | 100 | II/A-LL 32.5 R | ----- | 2 |
| S | 25 | 75 | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 0.8 | 1 |
| U | 75 | 25 | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 2.6 | 2 |
| V | 50 | 50 | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 1.6 | 1 |
| Y | 100 | - | II/A-LL 32.5 R | PREMIA 4.2 | 3 |
| K | 100 | - | II/A-L 42.5 R | PREMIA 4.2 | 2 |
| O | 25 | 75 | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 0.8 | 3 |
| P | - | 100 | II/A-L 42.5 R | ----- | 1 |
| Q | 75 | 25 | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 2.6 | 1 |
| R | 100 | - | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 4.0 | 2 |
| T | 50 | 50 | II/A-L 42.5 R | ERGOMIX 1.8 | 3 |
| W | 25 | 75 | II/A-L 42.5 R | PREMIA 0.6 | 2 |
| X | 75 | 25 | II/A-L 42.5 R | PREMIA 2.8 | 3 |
| Z | 50 | 50 | II/A-L 42.5 R | PREMIA 1.6 | 1 |

Tab. 7.34 - Profondità di penetrazione dello ione solfato nei provini di calcestruzzo realizzati.



Fig. 7.39 - I provini dopo l'attacco chimico da solfati.

7.9 Prove di ritiro

La norma di riferimento è la UNI 6555-73, essa stabilisce quali sono le regole per: "la determinazione del ritiro assiale di provini aventi dimensioni di 10 cm x 10 cm x 50 cm confezionati in calcestruzzo con inerti della dimensione massima fino a 3 cm."

Il ritiro è la variazione di lunghezza espressa in micrometri e riferita al metro di lunghezza ($\mu\text{m}/\text{m}$).

E' quindi misurato come una deformazione adimensionale su provini standard in assenza di carico, conservati in un ambiente ad umidità e temperatura prefissati e costanti nel tempo.

La preparazione dei provini consiste nell'assestare il calcestruzzo negli appositi recipienti, rispettando le prescrizioni della UNI EN 12390-2 del 2002. I contenitori sono costituiti da stampi metallici, così composti:

- due fiancate;
- due testate (portaspina);
- una piastra di base;

Le caratteristiche, le dimensioni delle spine e la lunghezza della parte immersa sono realizzate con acciaio Fe 42 B rispettando tutte le dimensioni imposte dalla UNI 7070-72. La distanza tra le due estremità interne delle testate portaspina deve essere di $500 + 0.25$ mm. Tutti i punti di giunzione degli elementi che compongono lo stampo devono essere a perfetta tenuta per impedire perdite d'acqua dell'impasto, le superfici interne devono essere trattate con una pellicola d'olio minerale.

| Sigla impasto | RICICLATO % | PULITO % | CEMENTO | ADDITIVO | slump (cm) |
|---------------|-------------|----------|---------|--------------|------------|
| H | 50 | 50 | 32.5 | Ergomix 1.8% | 15 |
| K | 100 | -- | 42.5 | Premia 4.2% | 18 |
| L | 100 | -- | 32.5 | Ergomix 4% | 13 |
| N | -- | 100 | 32.5 | ----- | 3.5 |
| P | -- | 100 | 42.5 | ----- | 20 |
| R | 100 | -- | 42.5 | Ergomix 4% | 8 |
| T | 50 | 50 | 42.5 | Ergomix 1.8% | 17 |
| V | 50 | 50 | 32.5 | Premia 1.6% | 15 |
| Y | 100 | -- | 32.5 | Premia 4.2% | 19 |
| Z | 50 | 50 | 42.5 | Premia 1.6% | 20 |

Tab. 7.35 - Miscele provini destinati alla prova del ritiro.

Sono stati realizzati 10 provini da destinare alla prova del ritiro, escludendo soltanto gli impasti realizzati con il 25% di aggregati riciclati ed il 75% di aggregati naturali e viceversa. Nella tabella 8.1 sono riportati in dettaglio le serie di provini sottoposti alle prove di ritiro, distinguendo sia i componenti delle miscele sia il loro dosaggio e riportando anche lo slump ottenuto dalle stesse.

7.9.1 Stagionatura e misurazioni

La norma prescrive che dopo la realizzazione i provini devono essere mantenuti negli stampi alla temperatura di 20 ± 1 °C in ambiente saturo d'umidità, o coperti con un telo mantenuto umido. Dopo ventiquattro ore i provini sono scasserati e posti in un ambiente di stagionatura condizionato ad una temperatura di 20 ± 1 °C con umidità relativa del 50 ± 3 % successivamente è stata eseguita la prima misurazione (misura di riferimento). Le misurazioni successive sono state eseguite alle varie scadenze imposte dalla norma, ossia: 1-2-3-7-14-28-60-90 giorni rispetto alla prima misurazione.

La misurazione prevede:

- taratura del micrometro, tramite l'uso di un'asta di riferimento lunga 50 cm (lunghezza di riferimento 10);
- sostituzione dell'asta e disposizione del provino nell'alloggiamento dello strumento;

- misurazione dei valori del ritiro dei provini;
- calcolo dell'esatto valore del ritiro come media dei valori ottenuti su tre misure.



Fig. 7.40 - Provini, contenitore e strumento di misura usato.

Nelle tabelle 7.36 e 7.37 è espresso l'andamento del ritiro nel tempo. Tale andamento risulta più chiaro nelle figure 7.41 e 7.42 in cui, mediante l'uso di diagrammi, riportiamo l'andamento della deformazione da ritiro al variare dei giorni di stagionatura.

| Sigla impasto | Cemento | Additivo (tipo e %) | Inerti %riciclo-%puliti | Scadenze di misurazione a vari giorni, espresse in micron (μm) | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------------|-------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 |
| N | II/A-LL 32.5 R | // | 0-100 | 120 | 160 | 200 | 290 | 356 | 480 | 550 | 620 |
| H | II/A-LL 32.5 R | Ergomix1.8 | 50-50 | 70 | 90 | - | 150 | 170 | 302 | 370 | 520 |
| L | II/A-LL 32.5 R | Ergomix 4 | 100-0 | 130 | - | 160 | 272 | 360 | 490 | 604 | 748 |
| V | II/A-LL 32.5 R | Premia 1.6 | 50-50 | 210 | 320 | 410 | 470 | 556 | 690 | 794 | 876 |
| Y | II/A-LL 32.5 R | Premia 4.2 | 100-0 | 460 | - | 506 | 520 | 632 | 716 | 828 | 932 |

Tab. 7.36 - Valori del ritiro per provini di calcestruzzo realizzati con cemento II/A-LL 32.5 R.

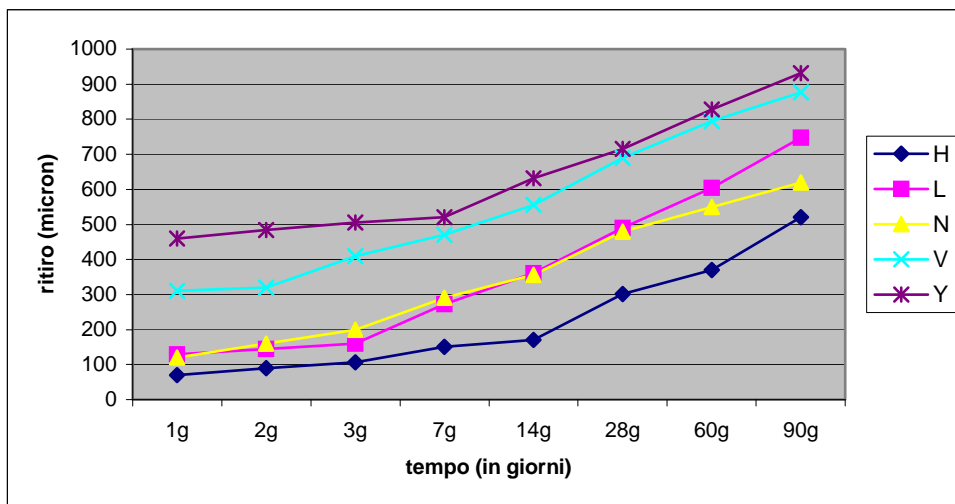


Fig. 7.41 - Andamento del ritiro nel tempo (CEM II/A-LL 32.5 R).

| Sigla impasto | Cemento | Additivo (tipo e %) | Inerti %riciclo-%puliti | Scadenze di misurazione a vari giorni, espresse in micron (μm) | | | | | | | |
|---------------|---------------|---------------------|-------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 7 | 14 | 28 | 60 | 90 |
| P | II/A-L 42.5 R | ----- | 0-100 | 186 | 196 | 210 | 330 | 470 | 540 | 600 | 682 |
| R | II/A-L 42.5 R | Ergomix4.0 | 100-0 | 140 | 160 | 246 | 290 | 430 | 520 | 624 | 722 |
| T | II/A-L 42.5 R | Ergomix1.8 | 50-50 | 180 | 316 | -- | 390 | 494 | 520 | 660 | 750 |
| Z | II/A-L 42.5 R | Premia 1.6 | 50-50 | 460 | 530 | -- | 630 | 700 | 772 | 820 | 872 |
| K | II/A-L 42.5 R | Premia 4.2 | 100-0 | 360 | -- | 410 | 530 | 570 | 670 | 780 | 860 |

Tab. 7.37 - Valori del ritiro per provini di calcestruzzo realizzati con cemento II/A-L 42.5 R.

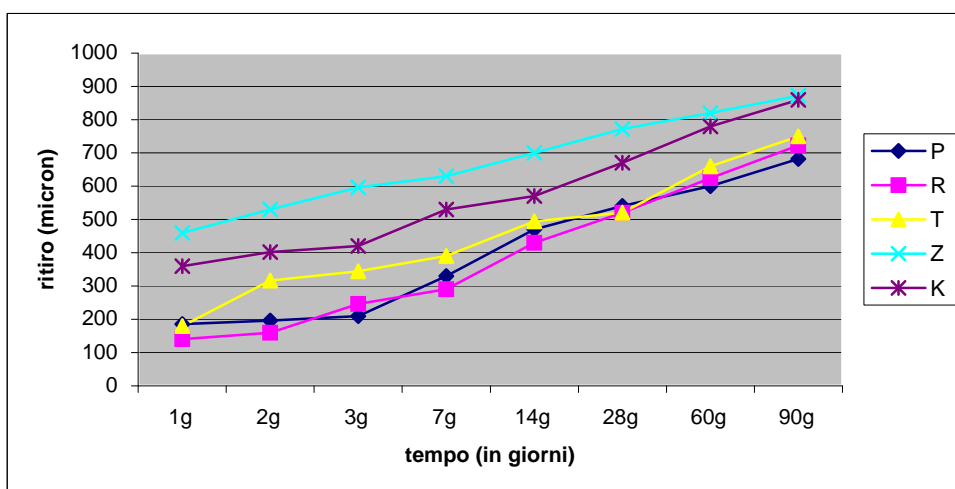


Fig. 7.42 - Andamento del ritiro nel tempo (CEM II/A-L 42.5 R).

La norma prescrive che: “la misura del ritiro dei provini confezionati in calcestruzzo deve essere effettuata mediante apparecchi che consentano di valutare le variazioni di lunghezza fra le estremità delle spine, con precisione minore di 5 µm”, nella campagna di indagine si è fatto uso di un micrometro e sono state eseguite 3 misurazioni su ogni provino; si è assunto come valore del ritiro ad una data scadenza la media dei valori misurati.

Nelle figure 7.43e 7.44 è riportato l’andamento della deformazione da ritiro a 90 giorni di stagionatura. In particolare, in figura 7.43 è riportata la deformazione da ritiro per le miscele di calcestruzzo preparate con il cemento CEM II/A-LL 32.5 R. Come sappiamo questa deformazione dipende anche dal tipo di cemento usato, dal calore d’idratazione, dalla finezza di macinazione del clinker e dalla sua composizione.

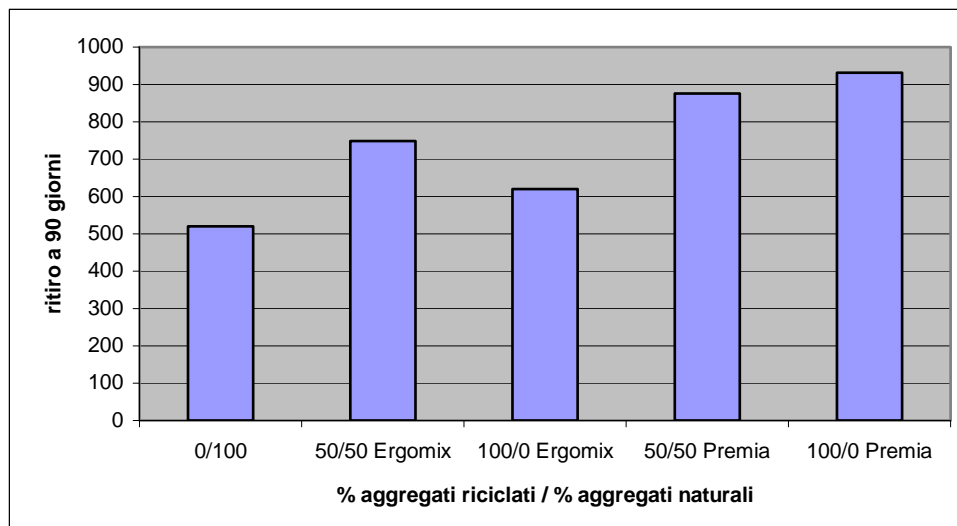


Fig. 7.43 - Ritiro dei provini di calcestruzzo realizzati con CEM II/A-LL 32,5 R, additivi premia ed ergomix, aggregati alluvionali, di riciclo, alluvionali/riciclo dopo 90 giorni di stagionatura.

Dai risultati riportati in figura 7.43 emerge una crescita del ritiro in funzione dell’aumento del dosaggio di aggregati riciclati. Altro fenomeno indicativo che influisce sul ritiro è la tipologia d’additivo usato nella preparazione degli impasti: l’Ergomix 180 ha prodotto valori di ritiro delle miscele inferiori rispetto al Fluid Premia 150. Dalla tabella 7.35 e dai risultati di figura 7.43 si individua per le miscele preparate con CEM II/A-LL 32,5 R una crescita del ritiro all’aumentare dello slump.

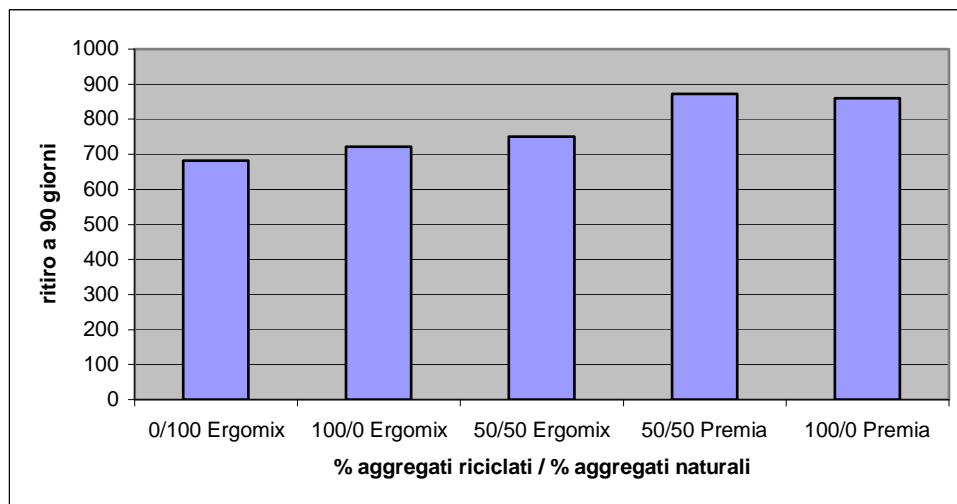


Fig. 7.44 - Ritiro dei provini di calcestruzzo realizzati con CEM II/A-L 42,5 R, additivi premia ed ergomix, aggregati alluvionali, di riciclo, alluvionali/riciclo dopo 90 giorni di stagionatura.

Nella figura 7.44 è riportato l'andamento del ritiro a 90 giorni delle miscele preparate con cemento CEM II/A-L 42.5 R. Come per le miscele realizzate con cemento CEM II/A-LL 32.5 R, anche per queste tipologie di miscele si ottengono valori di ritiro che crescono in funzione dell'aumento della frazione di aggregati riciclati. Sempre come nel caso precedente, le miscele realizzate con l'additivo Ergomix 180 esibiscono valori di ritiro più bassi rispetto a quelle realizzate con l'additivo Fluid Premia 150. Tuttavia, con l'uso del cemento CEM II/A-L 42,5 R si hanno valori di ritiro maggiori, ciò è conseguenza del maggiore sviluppo del calore d'idratazione, che determina un'accelerazione del processo d'idratazione e quindi della presa e dell'indurimento.

I valori di ritiro registrati sono in ogni modo nella maggior parte dei casi minori di quelli riscontrati nella letteratura tecnica.

Dall'esame dei valori ottenuti si rivela una crescita della deformazione da ritiro massima del 30% circa, rispetto all'impasto privo d'aggregati provenienti da demolizione per i preparati con il 32.5R e del 27% circa per gli impasti con il 42.5R.

Gli impasti invece, confezionati con l'additivo fluidificante Ergomix 180, nel caso d'uso del cemento CEM II/A-LL 32.5R danno una crescita della deformazione da ritiro poco superiore al 17%, mentre nelle miscele confezionate usando il cemento CEM II/A-L 42.5R la crescita è del 9%.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi è stata verificata la compatibilità chimico-fisica di alcuni materiali zeolitici, in sostituzione della silice fume, nelle preparazioni di malte e calcestruzzi ad alte prestazioni, malte e calcestruzzi autocompattanti ed infine malte e calcestruzzi con aggregati da riciclo.

Per i calcestruzzi ad alte prestazioni i materiali zeolitici utilizzati sono stati le zeoliti 4A e 5A di provenienza industriale, e le zeoliti 4A e 5A, a grana fine, sintetizzate in laboratorio. L'utilizzo di questi materiali è motivato dalla loro economicità rispetto alla silice fume, comunemente usata nella preparazione dei calcestruzzi HPC.

I risultati sperimentali ottenuti dalla realizzazione di provini di malta, confezionati effettuando una sostituzione del 10% del cemento considerato con il materiale zeolitico o la silice fume, hanno evidenziato che: i provini di malta realizzati con le zeoliti 5A esibiscono resistenze a compressione, sia alle brevi che alle lunghe stagionature, superiori a quelle ottenute con i provini realizzati con la silice fume, indipendentemente dal tipo di cemento utilizzato. La sostituzione del 10% di zeolite 5A al CEM II/A-S 42,5 R, nel confezionamento dei provini di malta, ha consentito di ottenere resistenze a compressione, a tempi brevi di stagionatura, tipiche di un cemento 52,5.

I provini realizzati con le zeoliti 4A non incrementano rispetto al tal quale, nella maggior parte delle miscele realizzate, le proprietà meccaniche di resistenza a compressione, sia alle brevi che alle lunghe stagionature. I risultati sperimentali ottenuti dalla realizzazione dei provini di calcestruzzo, confezionati aggiungendo il 10% in peso di zeolite, hanno confermato quanto già ottenuto con le malte.

Con le zeoliti 5A i provini di calcestruzzo hanno dato resistenze meccaniche più elevate sia alle brevi che alle lunghe stagionature rispetto ai provini di calcestruzzo realizzati senza aggiunta.

Le resistenze meccaniche dei provini di calcestruzzo realizzati con le zeoliti 5A sono state superiori a quelle dei provini realizzati con il CEM I 42,5 R ed il 10% in peso di silice fume e simili a quelle dei provini di calcestruzzo realizzati i cementi CEM II/A-S 42,5 R e CEM III/A 42,5 N additivati con la silice fume.

Inoltre la zeolite 5A sui calcestruzzi realizzati con il cemento d'altoforno ha un effetto iniziale accelerante sull'indurimento senza pregiudicare le resistenze finali, rendendo così il CEM III simile ad un CEM I a rapido indurimento.

L'aumento del rapporto a/c (da 0,35 a 0,37) che si realizza negli impasti, causato dal quantitativo di acqua di costituzione (20% in peso) contenuto nella zeolite, influenza le prestazioni meccaniche finali dei calcestruzzi HPC. Pertanto tali prestazioni possono essere migliorate considerando, nella preparazione delle miscele, sia l'acqua presente nella zeolite che il peso della zeolite in forma anidra.

L'aggiunta della zeolite 5A alle varie miscele realizzate per la preparazione dei calcestruzzi HPC comporta una leggera diminuzione della lavorabilità, rispetto agli impasti realizzati con il solo cemento, essa è comunque nettamente maggiore rispetto agli impasti realizzati con la silice fume.

Inoltre si è riscontrato che i calcestruzzi (HPC) realizzati esibiscono significative resistenze agli agenti aggressivi ed ai cicli di gelo e disgelo anche se le resistenze meccaniche a compressione raggiunte non sono state superiori agli 80 MPa per la scarsa qualità degli aggregati utilizzati. Gli aggregati utilizzati, infatti, sono stati di tipo alluvionale normalmente utilizzati per il confezionamento di calcestruzzi ordinari. Dalle prove di durabilità eseguite (attacco cloruri, attacco solfati, carbonatazione ed esposizione ai cicli ripetuti di gelo e disgelo) si è riscontrato che i provini di calcestruzzo, contenenti il cemento CEM III/A 42,5N, hanno subito la minore penetrazione dello ione cloruro, ed in particolare quelli contenenti la zeolite 5A mostrano un'elevata impermeabilità.

Nelle prove di carbonatazione tutti i calcestruzzi realizzati si sono dimostrati inattaccabili, dimostrando la compatibilità delle zeoliti con i cementi e gli additivi utilizzati.

Per quanto riguarda il degrado provocato dall'esposizione ai cicli ripetuti di gelo e disgelo l'aggiunta delle zeoliti al pari dell'aggiunta della silice fume, ha reso i provini meno permeabili all'acqua.

Appare evidente, quindi, che tali materiali zeolitici possono sostituire vantaggiosamente, dal punto di vista prestazionale ed economico, la silice fume quale aggiunta per la produzione di HPC.

Per i calcestruzzi autocompattanti si è cercato di ottimizzare delle miscele confezionate con cemento bianco ed utilizzando come materiale fine la zeolite 5A sintetica di colore bianco. Come confronto sono state realizzate, con gli stessi cementi, delle miscele di calcestruzzi autocompattanti impiegando materiali fini convenzionali, normalmente utilizzati nella produzione degli SCC.

Pertanto i fini utilizzati sono stati: zeolite 5A, 50% di zeolite 5A e 50% di filler calcareo, filler calcareo e fumo di silice.

Particolare attenzione è stata prestata al mix-design dei calcestruzzi in funzione delle proprietà reologiche allo stato fresco e delle resistenze meccaniche a compressione allo stato indurito. I risultati sperimentali conseguiti hanno messo in evidenza che si possono realizzare calcestruzzi autocompattanti con cemento bianco con classe di resistenza 32,5 e 52,5 utilizzando la zeolite 5A.

Allo stato fresco le miscele realizzate hanno evidenziato che: gli impasti confezionati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e il filler calcareo necessitano dell'aggiunta di additivo viscosizzante per evitare i fenomeni di bleeding e di segregazione; gli impasti confezionati con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e la zeolite 5A di tipo industriale hanno mostrato un'ottima lavorabilità senza l'aggiunta di viscosizzante; inizialmente si ha una elevata viscosità, dovuta all'effetto accelerante della zeolite, che tende a scomparire all'aumentare dei tempi di miscelazione; la miscela confezionata con il CEM II/B-LL 32,5 R bianco e l'aggiunta del 50% di filler calcareo e del 50% di zeolite 5A, anche se inizialmente risulta un po' viscosa per la presenza della zeolite, necessita di piccole quantità di additivo viscosizzante per evitare i fenomeni di bleeding e di segregazione; per effetto della maggiore finezza del cemento le miscele confezionate con il CEM I 52,5 R bianco ed i vari finissimi non hanno richiesto l'aggiunta di additivo viscosizzante; nelle miscele realizzate con il CEM I 52,5 R bianco e la zeolite 5A, utilizzata nelle varie percentuali, si è riscontrata una maggiore viscosità iniziale tendente a diminuire all'aumentare del tempo di miscelazione.

Allo stato indurito i calcestruzzi autocompattanti realizzati, con i vari fini, hanno evidenziato che: i provini di calcestruzzo autocompattante confezionati con la zeolite 5A di tipo industriale hanno esibito elevate resistenze meccaniche sia alle brevi che alle medie stagionature rispetto ai provini realizzati con il filler calcareo ed entrambi i cementi utilizzati; le resistenze a compressione più elevate dopo 28 giorni di stagionatura

sono state ottenute dai provini di calcestruzzo confezionati con l'aggiunta di zeolite 5A e fumo di silice indipendentemente dal tipo di cemento; le resistenze meccaniche dei provini realizzati con il CEM I 52,5 R bianco, utilizzando come materiale fine sia la zeolite che il fumo di silice, sono tipiche degli HSCC (High-Strength-Compacting Concrete).

I calcestruzzi autocompattanti realizzati con la zeolite 5A per le elevate resistenze meccaniche a compressione fatte registrare alle brevi stagionature possono essere utilizzati per realizzare opere che richiedono un rapido disarmo dei getti, garantendo così alle imprese un'ulteriore ottimizzazione dei costi.

Volgendo particolare attenzione alla resistenza alle prove di ritiro e di degrado per cicli di gelo e disgelo i risultati sperimentali conseguiti hanno messo in evidenza che: i provini confezionati con l'aggiunta di zeolite 5 A industriale hanno esibito valori di ritiro più bassi rispetto agli altri indipendentemente dal tipo di cemento utilizzato; i provini di calcestruzzo che hanno raggiunto una resistenza meccanica più bassa hanno esibito valori di ritiro più elevati, indice di una maggiore porosità del conglomerato; la differenza tra il peso dei provini di calcestruzzo misurato alla fine dei cicli di gelo e disgelo e il peso ad inizio ciclo è molto contenuta. Tutti i provini, infatti, hanno presentato incrementi di peso inferiori all'1%, evidenziando una ridotta porosità e quindi una elevata compattezza; i provini di calcestruzzo realizzati hanno ottenuto una buona resistenza ai cicli di gelo e disgelo; i provini di calcestruzzo che hanno subito minore variazione della resistenza meccanica per effetto dei cicli di gelo e disgelo sono stati quelli confezionati con il CEM I 52,5 R.

I risultati ottenuti mostrano le ottime prestazioni conseguibili con i calcestruzzi autocompattanti realizzati con la zeolite 5A, in quanto permettono di ottenere delle superfici bianche, molto pregiate dal punto di vista estetico. Inoltre, i calcestruzzi autocompattanti confezionati con la zeolite 5A, facilmente reperibile nel territorio calabrese (stabilimenti della SASOL di Crotona e dell'U.O.P. di Reggio Calabria), sono proponibili sul mercato locale.

Infine per i calcestruzzi realizzati con aggregati da riciclo si può affermare che gli inerti ottenibili dai rifiuti delle demolizioni nel campo dell'edilizia e delle grandi opere infrastrutturali, insieme agli scarti derivanti dai processi di produzione di elementi,

componenti e manufatti prefabbricati, costituiscono una materia prima secondaria di enorme valore, utilizzabile per realizzare nuove opere nel rispetto dell'ambiente.

Per un corretto reimpiego, occorre che vengano rispettati alcuni requisiti fondamentali di pulizia dell'inerte e di raggiungimento di costanza nel tempo delle caratteristiche granulometriche e compositive. Tali requisiti possono essere assicurati dagli impianti fissi di frantumazione e trattamento. Occorre, inoltre, conoscere approfonditamente e controllare frequentemente le caratteristiche dell'inerte prodotto, allo scopo di garantire un buon risultato nei diversi campi di impiego.

Nella sperimentazione compiuta, successivamente alle normali fasi di frantumazione e trattamento, sono seguite ulteriori fasi di selezione e di integrazione con altro aggregato naturale, al fine di valutare un possibile impiego degli aggregati di riciclo nei calcestruzzi strutturali.

Nel valutare le caratteristiche dei materiali di riciclo sono stati considerati non solo i criteri di accettazione tradizionali, ma anche i requisiti funzionali richiesti dagli specifici impieghi, poiché quelle che, ad un'analisi superficiale, possono apparire carenze, come la presenza eccessiva di materiale fino, sono a volte punti di forza di questo materiale alternativo.

A tal proposito l'analisi sperimentale condotta può essere riassunta in tre fasi: caratterizzazione dei materiali utilizzati; progetto e realizzazione della miscela; caratterizzazione del calcestruzzo allo stato fresco ed indurito.

Nella prima fase, per quanto riguarda la caratterizzazione degli aggregati, è immediatamente emersa quella che è la peculiarità principale degli aggregati riciclati, cioè la presenza di un'elevata quantità di materiale fino, costituito essenzialmente da calcare, quarzo e silicati.

Nella seconda fase è stato affrontato il progetto sostituendo alle miscele, realizzate con aggregato naturale, del materiale riciclato in quantità pari al 25%, 50%, 75% e 100% in peso. Si è tenuto costante il rapporto a/c pari a 0,45 e si sono utilizzati, nella realizzazione dei calcestruzzi, 2 tipi di cemento e 2 tipi di additivo.

Nella terza fase, dalle prove effettuate sul calcestruzzo allo stato fresco, è emerso che: le miscele realizzate con il 25% e 50% di aggregati di riciclo hanno evidenziato buone qualità di lavorabilità con l'impiego di modeste quantità di additivo; le miscele realizzate con il 75% e 100% di aggregati di riciclo, pur raggiungendo la classe di consistenza

desiderata hanno esibito una minore lavorabilità, dovuta ad una maggiore viscosità dell'impasto; la miscela realizzata con l'inerte di riciclo, privato della frazione passante a 0,106 mm, ha evidenziato un notevole miglioramento della lavorabilità; tutte le miscele realizzate con l'additivo Premia 150 hanno presentato una migliore lavorabilità rispetto a quelle realizzate con l'aggiunta dell'additivo Ergomix 180.

Dalle prove di resistenza meccanica a compressione effettuate sui provini di calcestruzzo si nota che la resistenza a compressione aumenta, in funzione del tipo di cemento utilizzato, ma soprattutto in relazione alla quantità di aggregato riciclato presente nella miscela. Questo risultato è da attribuire anzitutto alla buona qualità degli aggregati di riciclo, all'ottimizzazione dei costituenti degli impasti, ma soprattutto alla presenza del materiale fino; Le resistenze ottenute alle lunghe stagionature variano tra i 40 MPa e i 56 MPa;

I calcestruzzi realizzati con CEM II A-LL 32,5 R ed additivati con Ergomix 180 hanno esibito le migliori proprietà meccaniche, mentre i calcestruzzi realizzati con CEM II A-L 42,5 R hanno evidenziato le migliori resistenze meccaniche con l'aggiunta dell'additivo Premia 150. In particolare, i calcestruzzi realizzati con CEM II A-L 42,5 R, additivo Premia 150 ed il 75% di aggregati riciclati hanno esibito valori di resistenza meccanica di circa 56 MPa.

Riguardo alle prove di durabilità e di ritiro eseguite tutte le miscele realizzate hanno conseguito ottima resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro e solfato che contenuti valori di ritiro.

Per cui è sicuramente possibile produrre, con l'utilizzo di inerti ottenibili dai rifiuti da costruzione e demolizione, previa caratterizzazione e ottimizzazione dei costituenti delle miscele, calcestruzzi strutturali di ottima fattura, con elevate resistenze e con diversi requisiti funzionali richiesti dalle esigenze di impiego.

BIBLIOGRAFIA.

ACI COMMITTEE 363, (1984) State of the art report on High Strength Concrete, pp. 362-411.

ACI COMMITTEE 201, (1992) "Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-92)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 41 pp.

Aiello R., (1993) "Le Zeoliti: nuovi materiali per le tecnologie avanzate", Scienza e Governo, nuov. Tecn.

Aitcin P. C., Jolicoeur C., MacGregor J., (1994) Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, Concr. Int. 16 (5) 45-52.

Aitcin P.C., (1998) "HPC" 1th Edition E&FN SPON.

Aitcin P.C., Neville A. and Acker P., (1997) "Integrated view of Shrinkage deformation" Concrete International, Vol. 19, N. 9, pp. 35-41.

Aitcin P.-C., Neville A.M., (1993) High-performance concrete demystified, Concr. Int. 15 (1) pp. 21-26.

Aitcin P.C. and Mehta P.K., (1990) "Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete", ACI Materials Journal, vol. 87, n. 2, pp. 103-107.

Aitcin, P.-C., Sarkar, S.L., Regourd, M., Volant, M., (1987) Retardation Effect of Superplasticizer on Different Cement Fraction, Cement and Concrete Research. vol. 17, n° 6, p. 995-997.

Ahmad S.Shah S.P., (1988) “High Strength Concrete – A Review. First symposium on Utilization of High Strength Concrete”, Stavanger.

Araya A., B. M. Lowe, (1984) “Zeolites”, 4, 280.

ASTM Designation C 117-95. (1995). Materials Finer than 75 μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. Philadelphia.

ASTM Designation C 127-88e1. (1993). Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Philadelphia.

ASTM Designation C 227-90. (1990). Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). Philadelphia.

ASTM Designation C 295-90. (1990). Petrographic Examination of Aggregates for Concrete. Philadelphia.

ASTM Designation C 70-94. (1994). Surface Moisture in Fine Aggregate. Philadelphia.

Bache H.H., (1981) “Densified Cement /Ultra-Fine Particle-Based Materials”, presentato alla 2nd Int. Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa Canada.

Barrer R. M., (1982) “Hydrothermal Chemistry of Zeolites”, Academic Press, New York.

Bentur A. and Goldman A., (1989). Curing Effects, Strength and Physical Properties of High Strength Silica Fume Concretes, J. Mater. Civil Eng., ASCE, 1, No. I : pp. 46-58.

Berke N.S., (1989) “Resistance of microsilica concrete to steel corrosion, erosion and chemical attack”, Proceedings of the International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolanas in Concrete, SP-114, V.M. Malhotra,ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 861-886.

Berra M., Mangialardi T., Nishida T., Paolini A.E., Pezzotti G., (1996). L'Industria Italiana del Cemento, LXVI (4), p. 280.

Berra, M., Tavano, S. (1986). Il Cemento, 83 (4), p. 361.

Bleszynski Roland, Rdoug Hooton, Michael D.A. Thomas and Chris A. Rogers, (2002) "Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies". ACI Materials Journal, V. 99, N. 5, pp 499-508.

Broomfield J.P., (1997) Corrosion of steel in concrete, E & FN Spon, London, p. 240.

Caldarone M A, Gruber K A, and Burg R G, (1994) High Reactivity metakaolin: A New Generation Admixture. Concrete Intemational, Nov. American Concrete Institute, Detroit, pp. 37-40

Carrasquillo et al., (1981) " Microcracking and Behaviour of HSC subject to Short-Term Loading", ACI-Journal, May-June.

Centro Studi e Ricerche Sposato P&P s.r.l., Atti del convegno: "Calcestruzzi autocompattanti ordinari: Progettazione, produzione e controlli sperimentali", 2003;

Colleparidi M. (1995) "Water Reduces/Retarders", V.S. Ramachandran Ed., Noyes Publication, New Jersey, pag.286.

Colleparidi M., Coppola L. (1992) "Durabilità e restauro delle opere in calcestruzzo", pp. 3-4, Ed. Enco, Spregiano.

Colleparidi M., Coppola L., Cerulli T., Pistolesi C., Zaffaroni P., Deroches G. and Drapeau A., (1994) "Acrylic Based Superplasticizer", Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Materials, SP-148 V.M. Malhotra, ed. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 1-18.

Colleparidi M.: "Il nuovo calcestruzzo", terza edizione, Tintoretto, 2003;

Colleparidi M., Marcialis A. and Turriziani R., (1972) "Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes", *Journal of American Ceramic Research Society*, V. 55, N. 10, pp. 534-535.

Coppola L., (1996) "Calcestruzzo ad alta resistenza meccanica. Proprietà fisiche ed elasto-meccaniche. Normative, Realizzazioni strutturali", *Atti del Convegno "Il Calcestruzzo alle soglie del 2000"*, Bologna, Ottobre.

Coppola L.: "Concretum", McGraw-Hill, 2007;

Costa, U., Massazza, F. (1986). *Il Cemento*, 83 (4), p. 397.

Csicsery S.M., (1976) *ACS Monograph*, 171, , p.680.

Damour A., *Ann. Mines* 17, 1844, p. 191.

Damtoft J.S., Herfort D., Yde E.; (1999) in "Modern Concrete Materials: Binders, Additions and Admixtures". *Proceedings Int. Conf. University Dundee, Scotland*, 8-10 Sept. 1999, Edited by R.K.Dhir and T.D.Dyer, Publ. T.Telford, pp 1-16.

Davis M.E., Lobo R.F., (1992) *Chem. Mater.* 4 p. 756.

Derucker K. N., Korfiatis G.P. and Ezeldin A.S., (1994) *Materials for Civil and Highway Engineering* 3rd Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Dewar, I.D. (1984). *Workshop: Slag Cements. Research and Practice*. March, University Park, P.A. USA.

Diamon M. and Goto S., (1984) "Diffusion of ion in hardened cement paste", *Proceedings, Cement, Concrete Symposium*, pp. 1-4.

Diamond S., (1983). Effect of Mio-osilica (Silica Fumé) on Pore Solution Chemistry of Cement Pastes, *J. American Ceramic Soc.*, 66, No. 5: pp. C-82-C-84.

Diamond S., (1978). Significance of tests and properties of concrete making materials, *ASTM Sp. Teck. Publ.* 169B: 708-721.

FIB-CEB Working Group, “High Strength Concrete. State of the Report”.

Flanigen, E. M., (1980) In *Proc. 5th Int. Conf. Zeolites* Rees, L. V. C. Ed., Heyden London, p. 760.

Friedel G., (1896) *Bull. Soc. Franc. Mineral. Cristallogr.* 19, pp. 94-118.

Frigione, G., (1986). *Symp. Amer. Soc. Test. Mater.*, SP 897, Philadelphia, p. 15.

Frigione, G., Sersale, R. (1985). *Cem. Concr. Res.* 15 (1), p. 159.

Gagne R., Pigeon M. and Aitcin P.C., (1990). Deicer Sali Scaling Resistance of High Performance Concrete, *Proc. Symp. on Performance of Concrete*, (Ed. D. Whiting), Detroit, ACI SP-122: pp. 29-44.

Gjorv O. E., (1983). Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume, *Proc. First. Int. Conf. Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-products in Concrete*, Montebello, (Ed. V. M. Malhotra), ACI SP-79,2: pp. 695-708.

Gjorv O., Monteiro P. J. M. and Mehta P. K., (1990). Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond, *ACI Mater. J.*, 87, No. 6: pp. 573-580.

Grose R. W., Mifflangen E., (1977) U. S. Patent 4,061,724.

Haque M.N., (1996) “Strength development and drying shrinkage of high strength concretes”, *Cement and Concrete Composite*, V. 18, pp. 333-342.

Helland S., (1990). "High Strength Concrete used in Highway Pavements", Proceedings of the 2nd Int. Symposium on the Utilization of High Performance Concrete, Berkeley Usa.

Helmut, R. (1987). Fly Ash in Cement and Concrete. Portland Cement Association, Skokie, USA. pp. 203.

Higgins, D.D. (1988). Concrete, March, p. 21.

Jahren P., (1983). Use of Silica Fume in Concrete, Proc. First Int. Conf. Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-products in Concrete, Montebello, (Ed. V. M. Malhotra), ACI SP-79, 2, pp. 625-642.

Jansen J.C., (1991) Stud. Surf. Sci. Catal. 58 p. 77

Jian Yin, Shiqiong Zhou, Youjun Xie, Yu Chen and Qinlian Yan, (2002) "Investigation on compounding and application of C80-C100 high performance concrete, Cement and concrete Research 32 173-177.

Khatib, J.M. and Wild, S. (1998). Cem. Concr. Res. 28 (1), p. 83.

Kaushik V.K., Vijayalakshmi R.P., Choudary N.V., Bhat S.G.T., (2002) "XPS Studies on cation exchanged zeolite A", Microporous and Mesoporous Materials 51, p.139-144.

Khayat K. H. and Polivka M., (1989). Cryogenic Frost Resistance of Lightweight Concrete Containing Silica Fumé, Proc. Third Int. Con/, on Fly Ash, Silica Fumé, Slag, and Naturai Pozzolans in Concrete, Trondheim, (Ed. V. M. Malhotra), ACI SP-114, 2 : pp. 915-928.

Larsen T., Helland S.; (1987) " Experience from the use of High Strength Concrete on 3 Sites in Norway", Proceedings of the 1 st Int. Symposium on the Utilization of High Strength Concrete, pp. 517 – 526, Stavanger, Norway.

Leuado R. A., (1983) Proc 6th Int. Zeolites, Reno USA, Butterworths.

Lok B.M., Cannon T.R., Messina C.A., (1988) Zeolites, 3, 282.

Magne Maage; (2001) "Come nacque il fumo di silice" Enco Journal, n.18.

Malhotra V.M. and Mehta P.K., (1996) "Pozzolanic and Cementitious Materials", Advance in Concrete Technology, V.1, Gordon and Breach Publishers, Canada.

Malhotra V.M., Carrette G.G. and Sivasundaram V.; (1992) Role of silica fume in concrete: a review. Advances in Concrete Technology.

Malier Y., (1992) "High Performance Concrete: From Materials to Structures", Edited by Y. Malier, E & FN Spon London.

Marotta, R. (1975). Il Calcestruzzo. Il controllo della Qualità, Published by Cementir, Roma.

Marro P, (1996) "Le strutture di calcestruzzo ad alta prestazione: i modelli di calcolo, le realizzazioni". Atti del seminario "L'evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni", pp.163- 184, Malta.

Massazza, F. (1980-81). Cement, Br 1, p. 3.

Matsumoto; (1976) "Precast Prestressed Concrete Truss Railway Bridge using Extremely High Strength Concrete", Proc. of IABSE Congress.

Mehta P. K., (1983). Mechanism of sulfate attack on Portland cement concrete, another look, Cem. Concr. Res. 13, 401-406.

Mehta P.K. (1977) "Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash".ACI JOURNAL N.9 Vol.74

Mehta P.K. and Aitcin P.C.; (1990) "Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete". in Utilization of High-Strength Concrete – 2nd Int. Symp. ACI SP-121, Detroit, Michigan, pp 265-286.

Mehta P.K. and Monteiro P.J.M., (1993) Concrete: Structures, properties and Materials, 2nd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Mehta P.K. and Pirtz D., (1978) "Use of Rice Husk Ash to Reduce Temperature in High-Strength Mass Concrete" J Amer. Constr. Inst., 75, 60-63

Mehta P.K., (1983) "Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete – a critical review" Fly ash, silica fume, slag & other mineral by-products in concrete, SP-79, V.I., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. pp 1-46.

Mehta P.K.; (1986) "Concrete. Structures, Properties and Materials", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Meier, W. M. Olson, D.H. and Baerlocher, Ch. (1996) Atlas of Zeolite Structure Type, Fourth Edition. ed. Elsevier, London.

Naiqian F., (1996) High-Performance Concrete, China Construction Industry Publishing House, Beijing.

Neville A. and Aitcin P.C., (1998) "HPC – an overview" Materials and Structures, V. 31, pp. 111-117.

Neville, A.M., (1995). Properties of Concrete. Fourth Edition. Publ. Longman Group, Essex (UK).

Neville A., (1995 b) Chloride attack of reinforced concrete: an overview, Materials and Structures, 28, pp. 63-70.

Parrott, (1969) "The Production and Properties of High Strength Concrete", Concrete.

Poon C.S., Lamand L. and Kou S.C., (2000) Effectiveness of natural zeolites as a mineral admixture in concrete. Cement and Concrete Technology in the 2000 s. 6-10. Istambul, Turkey.

Powers T. C., Copeland L. E. and Mann H. N., (1954). Permeability of Portland cement paste, /. Am. Concr. Inst. 5:285-298.

Punkki J., Golaszewski J. And Giorv O.E., (1996) "Workability loss of high strength concrete", ACI Materials Journal, Vol. 93, N.5, pp. 427-431.

Ramachandran, V.S., Beaudoin, J.J., Shihva, Z. (1989) Control of Slump Loss in Superplasticized Concrete, Matériaux et constructions. n0 22, p. 107-111.

Randall V. and Foot K.. (1989) High-strength concrete for pacific first center. Concrete International, Vol. 11, 4, pp .14-16

Reeves, C.M. (1985). Proceedings "How to make today's concrete durable for tomorrow" Seminar. Association of Municipal Engineers of the Institution of Civil Engineers. London, May.

Regourd M., A (1987) Review of (he use of proton magnetic resonance to study superplasticizers, Mater. Res. Soc. Proc. 85 245-254.

Regourd M., Mortureux B., Aitcin P.C., and Pinsonneault P.; (1983) Proceedings, 4th Int. Symp. on cement Microscopy, Nevada, USA, pp. 249-260.

Regourd M.; (1995) "Microstructure of high strength cement paste systems", Very High-Strength Cement-based Materials, Materials Research Society, Proceedings, vol. 42, pp. 3-17.

Regourd, M. (1983). in Condensed Silica Fume, Ed. Aïtcin P.C., Booklet from University de Sherbrooke, Quebec, Canada, August, p. 20.

Regourd, M. (1985). "Microstructure of high Strength Cement Paste Systems". Material Research Society Symposia Proceedings, Vol. 42, p. 3.

Russel H.G., (1987) Proceedings of the 1st Int. Symp. on the Utilization of High High Strength Concrete, Stavanger, Norway, pp 561-572.

Sellevold E. J., (1984). Review: Microsilica in Concrete, Project Rep. No. 08037-EJS TJJ, Norwegian Building Research Institute, Oslo.

Sherman J. D., (1980) "Zeolites: Science and Tecnology", Nato Asi Series E: Applied Science N. 80, Martinus Nijhoff.

Sivasundaram V., Carette G.G., and Malhotra V.M., (1990) Cem. Concr. Compos. 12, 263

Sivasundaram, V. And Malhotra V.M. (1992). ACI Materials J., 89 (6), p. 554.

Sivasundardam V., Carette G.G., and Malhotra V.M., (1991) ACI Mater. J. 88, 407

Smepllass S., Justenes H., Sellevold E.J., Ronning T., (1990) "Results from the Norwegian Research Project: Materialutvikling Hoyfast Betong", Report available from the Cement and Concrete Research Institute, Trondheim.

Smolczyk H.G. (1980) "Structure et caractérisation des laiters" 7th Int Congr. Chem. Cem., Paris, Vol I, III-1/3, III-1/16

Sorensen E. V., (1982) Concrete With Condensed Silica Fume-A Preliminary Study of Strength and Permeability, Rep. BML 82.610, The Norwegian Institute of Technology, Trondheun: pp. 189-202.

Suruma, M.S. and Joshi, S.N. (1988). Advances in Cement Research 1 (4), p. 238.

Szostak R., (1984) "Handbook of Molecular Sieves", New York, Van Nostrand Reinhold.

Sybertz, F. (1988a). Betonwerk+Fertigteil-Technik. Part 1, 54 (1), p. 42.

Sybertz, F. (1988b). Betonwerk+Fertigteil-Technik. Part 2, 54 (2), p. 80.

Thomas A., (1979) IEEE Cement Industry Technical Conference, May 20-24, 1979, Florida USA.

Tomaszewicz, Bynboe, Jensen, Hoyfast betong. Delrapport 5. Sintef report STF65 A 85006.

Torrenti S.M., Matte V., Maret V., Richet C., (1996). "High Integrity Containers for Interim Storage of Nuclear Wastes Using Reactive Powder Concrete", Proceedings of the Fourth Int. Symposium of the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, pp. 1407, 1413, Paris France.

Norme UNI

UNI 6132 Prove distruttive sui calcestruzzi. Prova di compressione.

UNI 6393, Controllo della composizione del calcestruzzo fresco.

UNI 7044 Determinazione della consistenza delle malte cementizie mediante l'impiego di tavola a scosse.

UNI 7087 Calcestruzzo. Determinazione della resistenza alla degradazione per cicli di gelo e disgelo.

UNI 7928 Calcestruzzo. Determinazione della penetrabilita' dello ione cloruro.

UNI 8019 Calcestruzzo. Determinazione della penetrabilità dello ione solfato.

UNI 8520-2 Aggregati per confezione di calcestruzzi. Requisiti.

UNI 8520-7 Aggregati per confezione calcestruzzi. Determinazione del passante allo staccio 0,075 UNI 2332.

UNI 8520-11 Aggregati per confezione di calcestruzzi. Determinazione del contenuto di solfati.

UNI 8520-12 Aggregati per confezione di calcestruzzi. Determinazione del contenuto di cloruri solubili in acqua.

UNI 8520-13 Aggregati per confezione di calcestruzzi. Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento degli aggregati fini.

UNI 8520-16 Aggregati per confezione di calcestruzzi. Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento degli aggregati grossi

UNI 8520-17 Aggregati per confezione di calcestruzzi. Determinazione della resistenza a compressione degli aggregati grossi.

UNI 8981, Durabilità delle opere e manufatti in calcestruzzo;

UNI 9156, Cementi resistenti ai solfati. Classificazioni e composizione;

UNI 9418, Calcestruzzo fresco – Determinazione della consistenza – Prova di abbassamento al cono;

UNI 9944 Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.

UNI EN 206-1 2001 - Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

UNI EN 11040, Calcestruzzo Autocompattante. Specifiche, caratteristiche e controlli;

UNI EN 11041, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello spandimento e del tempo di spandimento;

UNI EN 11042, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco; Determinazione del tempo di efflusso dall'imbuto;

UNI EN 11043, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad L;

UNI EN 11044, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello scorrimento confinato mediante anello a J;

UNI EN 11045, Prove sul Calcestruzzo Autocompattante fresco. Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad L;

UNI 11104, Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1;

UNI 12350, Prove sul calcestruzzo fresco;

UNI 12390, Prove sul calcestruzzo indurito;

UNI 12504, Prove sul calcestruzzo nelle strutture;

UNI EN 12620, Aggregati per calcestruzzo;

UNI EN 13055, Aggregati leggeri;

UNI EN 933-3 1998 - Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della forma dei granuli - Coefficiente di appiattimento

UNI-EN 196-1 Metodi di prova dei cementi. Determinazione delle resistenze meccaniche.

UNI-EN 196-5 Metodi di prova dei cementi. Prova di pozzolanicità dei cementi pozzolanici.

UNI-EN 197-1 Cemento. Composizione, specificazioni e criteri di conformità. Cementi comuni.

UNI EN 480, Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Metodi di prova;

UNI EN 932, Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati;

UNI EN 1008, Acqua d'impasto per calcestruzzo;

UNI EN 1367, Prove per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati;

Vennestand O. and Gjørsv O.E., (1983). Silica Concrete-Protection Corrosion of Embedded Steel, Proc. First Int. Con/, on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By- Products in Concrete, Montebello, (Ed. V. M. Malhotra), ACI SP-79, 2, pp. 719-729.

Wild, S., Khatib, J.M. and Jones, A. (1996). Cem. Concr. Res., 26 (10), p. 1537.

Zhang M.H., (1995) Cem. Concr. Res. 25, 1165

Zhang, M.-H. and Malhotra, V.M. (1995). Cem. Concr. Res., 25 (8), p. 1713

Zhang, M.-H. and Malhotra, V.M. (1996). ACI Materials J., 93 (6), p. 629.

Publicazioni

Articoli

Frontera P. , Marchese S., Crea F. , Aiello R. , Nagy J. B. , " The strength effects of synthetic zeolites on properties of high performance concrete". In High Performance Structures and Materials III, Southampton: WIT Press, 2006, pp. 449-459.

Marchese S. , Bonavita L. , Frontera P. , Crea F. , Aiello R. , Nagy J. B. , Proceedings VII Convegno Nazionale Scienza e Tecnologia delle Zeoliti. Cap. -, " The strength effects of synthetic zeolite admixture on cement concrete", Università della Calabria: Centro Editoriale e Librario. 2005. pp. 99-102.

Atti di convegno

Iacobini I. , Crea F. , Frontera P. , Marchese S. , " Caratterizzazione meccanica di malte confezionate con materiali derivanti da pneumatici a fine vita e zeolite sintetica". Atti del convegno "9° Convegno Nazionale AIMAT", Piano di Sorrento (Na), 29/06-02/07, 2008, 2008, pp. -

Baldino N. , Gabriele D. , De Cindio B. , Frontera P. , Marchese S. , Candamano S. , Crea F. , " Archeological investigation of synthetic zeolite addition on cement paste". Atti del convegno "AERC 2007", Napoli Italy, 12-14 April, 2007, 2007, pp. 196-

Crea F. , Frontera P. , Marchese S. , Antonucci P. , " Calcestruzzi ad Alte Prestazioni (HPC): Durabilità e Proprietà Meccaniche". Atti del convegno "Crasc'06", Messina, 2006, Dario Flaccovio:palermo, 2007, Vol. Prima edizione, pp. 817-825.

Frontera P. , Crea F. , Bonavita L. , Marchese S. , Aiello R. , " Synthetic Zeolite as Admixture in White High Strength Concrete". Atti del convegno "8° Convegno Nazionale AIMAT", Palermo, 27 Giugno -01 Luglio, 2006, 2006, pp. -

Frontera P. , Crea F. , Marchese S. , Antonucci P. , " Self Compacting Concrete Incorporating Synthetic Zeolite". Atti del convegno "8° Convegno Nazionale AIMAT", Palermo, 27 Giugno-01 Luglio, 2006, 2006, pp. -