

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Orientamento Infrastrutture di Trasporto



INDAGINE SPERIMENTALE SUL CALCESTRUZZO PER FINITRICI A CASSEFORME SCORREVOLI: MIX-DESIGN, REOLOGIA E CAMPI PROVA

Relatore:

Prof. Ing. **Filippo GIUSTOZZI**

Tesi di Laurea di:

Matteo BOTTANI 799329

Michela BREVIARIO 801280

Anno Accademico 2013-2014

Prefazione

All'inizio di questa Tesi, sviluppata presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano, desideriamo ringraziare quanti, in modo diverso, hanno contribuito al suo sviluppo.

Un primo ringraziamento va al Professor *Filippo Giustozzi*, che, in qualità di nostro supervisore, ci ha proposto questa ricerca innovativa, incoraggiandoci e rendendosi sempre disponibile per qualsiasi tipo di chiarimento.

Ringraziamo anche il Professor *Maurizio Crispino* per averci concesso l'opportunità di intraprendere questa esperienza formativa in collaborazione con le aziende del settore.

Vorremo inoltre ringraziare *Tecnochem Italiana S.p.A.*, *Wirtgen Macchine S.r.l.* e *l'Impresa Bacchi S.r.l.* per averci permesso di svolgere questa ricerca, mettendo a nostra disposizione strutture, materiali e macchinari.

Un sentito grazie va al nostro tutor aziendale P.Ch. *Dario Scarpellini* che in tutti questi mesi ci ha seguiti passo dopo passo nel nostro apprendimento, con grande pazienza e disponibilità, fornendo spiegazioni a qualsiasi nostro dubbio, dedicando il suo tempo, cercando il più possibile di assecondare le nostre esigenze e facendoci appassionare a questo lavoro.

Infine un grazie in particolare va ai ragazzi del laboratorio: *Daniela, Nadia, Riccardo, Davide, Pietro, Roberto, Mauro, Gianluca, Omar, Paolo, Efrem* che si sono prodigati per aiutarci e fornirci tutto ciò di cui avevamo bisogno, accogliendo e soddisfacendo ogni nostra richiesta.

Milano, Ottobre 2014

Matteo Bottani

Michela Breviario

Sommario

Il presente lavoro di Tesi consiste in un'indagine sperimentale su calcestruzzi per finitrici a casseforme scorrevoli (slip-form) ed ha come obiettivo l'individuazione di parametri guida per la corretta progettazione e messa in opera di conglomerati cementizi.

La slip-form, sempre più diffusa per la sua efficienza e convenienza, permette in un solo passaggio la compattazione, l'estrusione e la finitura di lastre in calcestruzzo. Per testare l'effetto sulla stesa di miscele sperimentali di calcestruzzo di diversa composizione è stato realizzato un cassero sperimentale che simula il comportamento di una slip-form.

L'analisi sperimentale si è focalizzata principalmente sul ruolo del rapporto acqua/cemento e del quantitativo di additivo superfluidificante nei calcestruzzi estrusi, parametri che sono stati variati per ciascuno degli impasti testati. Il set di prove ha valutato la reologia in laboratorio tramite prove di consistenza su calcestruzzi e malte e prove di viscosità su boiacche, nonché le loro caratteristiche fisico/meccaniche con prove di resistenza a compressione, flessione e misura di modulo elastico. Si è poi proceduto alla realizzazione e alla valutazione di lastre stese con il cassero sperimentale. Le indicazioni sono state fornite dalla correlazione tra i risultati delle prove di laboratorio ed i campi prova.

L'analisi dei risultati ha fatto emergere l'importanza della prescrizione di una classe di consistenza al momento del getto per questo tipo di applicazioni. Sono stati poi individuati specifici intervalli ottimali di variazione del valore di viscosità della boiaccia e di spandimento della malta. Dal campo prova sul cassero sperimentale si evince che i fattori che influiscono principalmente sulla buona riuscita di una stesa non sono solo il corretto proporzionamento del calcestruzzo, ma anche la sua vibrazione e la perdita di lavorabilità. Le resistenze a compressione delle lastre stese con cassero sperimentale, rispetto ai valori di laboratorio, e la qualità della finitura superficiale forniscono indicazioni sulla vibrazione del calcestruzzo. Il confronto tra le resistenze e i moduli elastici di boiacche, malte e calcestruzzi ha invece messo in evidenza l'influenza degli aggregati e delle loro dimensioni.

I risultati mostrati in questa prima fase di studio suggeriscono possibili ulteriori sviluppi di ricerca che possono portare all'individuazione di altri parametri capaci di influenzare il comportamento del calcestruzzo estruso.

Indice

Prefazione	2
Sommario	3
Indice	4
Elenco delle figure	10
Elenco delle tabelle	13
Elenco dei grafici	16
CAPITOLO 1	
Introduzione	20
CAPITOLO 2	
Analisi bibliografica	22
2.1 Pavimentazioni rigide in calcestruzzo.....	22
I giunti	23
Le tecniche di costruzione.....	27
2.2 Slip-form	29
La compattazione	30
Il sistema di guida	31
Le barre d'armatura.....	32
La finitura superficiale	32
La protezione del getto	34

Esempio di utilizzo in Italia	35
2.3 Influenza della curva granulometrica.....	36
Percentuale combinata di aggregato trattenuto	36
Coarseness Factor e Workability Factor	38
2.4 Calcestruzzi per slip-form secondo ETL 97-5	40
2.5 Teoria della vibrazione.....	42
2.6 Teoria della viscosità	47
2.7 Sperimentazioni con mini slip-form	51

CAPITOLO 3

I materiali	53
3.1 Aggregati.....	53
3.2 Cemento	61
3.3 Gli additivi e le fibre	63
3.4 Mix design del calcestruzzo	65

CAPITOLO 4

Cassero sperimentale	67
4.1 Sperimentazione.....	67
4.2 Descrizione	69
4.3 Fattore di scala	71
4.4 Approvvigionamento del materiale e funzionamento.....	72
4.5 Vibrazione.....	74
4.6 Finitura della lastra	75

CAPITOLO 5

Piano sperimentale.....	76
5.1 Parametri di indagine	76
Mix design del calcestruzzo	78
Mix design della boiaccia.....	81

	Mix design della malta	82
5.2	Prove sul calcestruzzo fresco	84
	Prova di abbassamento al cono di Abrams.....	84
	Prova di spandimento su tavola a scosse.....	85
	Indice di compattabilità.....	85
	Contenuto d'aria – Metodo per pressione manometrico	87
	Determinazione del contenuto d'acqua	88
5.3	Prove sul calcestruzzo indurito	90
	Massa volumica del calcestruzzo indurito	90
	Prova di resistenza a compressione	90
	Prove ultrasoniche	92
5.4	Prove su boiacche	95
	Prova di viscosità	95
	Massa volumica su boiaccia fresca e indurita	97
	Resistenze: compressione e flessione.....	97
	Prove ultrasoniche – Modulo elastico	98
5.5	Prove su malte	99
	Prova di spandimento	99
	Massa volumica su malta fresca e indurita.....	100
	Resistenze: compressione e flessione.....	100
	Prove ultrasoniche – Modulo elastico	100
5.6	Lastre stese con cassero sperimentale.....	101

CAPITOLO 6

Analisi dei risultati 104

6.1	Risultati del calcestruzzo fresco.....	105
	Prova di abbassamento al cono di Abrams.....	105
	Prova di spandimento su tavola a scosse.....	106
	Indice di compattabilità.....	108
	Massa volumica.....	110
	Contenuto d'aria – metodo per pressione manometrico.....	110

	Determinazione del contenuto d'acqua	111
	Confronto tra calcestruzzo realizzato in laboratorio e steso con cassero sperimentale	111
	Calcestruzzo di prova	114
6.2	Risultati del calcestruzzo indurito	116
	Massa volumica	116
	Prova di resistenza a compressione	117
	Confronto resistenze a compressione cubi-carote	119
	Prove ultrasoniche – Modulo elastico	121
	Confronto moduli elastici misurati – teorici	122
6.3	Risultati delle boiacche	124
	Prova di viscosità	124
	Resistenza a compressione	126
	Resistenza a flessione	128
	Prove ultrasoniche - Modulo elastico	129
	Massa volumica	130
6.4	Risultati delle malte	131
	Prova di spandimento	131
	Resistenza a compressione	133
	Resistenza a flessione	134
	Prove ultrasoniche - Modulo elastico	136
	Massa volumica	137
6.5	Confronto sulle resistenze a compressione e sui moduli elastici	139
6.6	Risultati delle stese con cassero sperimentale	142
	Serie acqua/cemento – superfluidificante 0,9 %	142
	Serie superfluidificante – acqua/cemento 0,39	144
	Serie acqua/cemento – superfluidificante 1,1 %	145
6.7	Considerazioni finali	147

CAPITOLO 7

Conclusioni e sviluppi futuri	149
--------------------------------------------	------------

Appendice A

Schede tecniche dei materiali 152

Schede tecniche degli aggregati 153

Schede tecniche degli additivi..... 156

Scheda tecnica delle fibre..... 158

Appendice B

Programma prove 160

Appendice C

Calcestruzzo fresco..... 165

Prova di abbassamento al cono di Abrams..... 166

Prova di spandimento su tavola a scosse..... 168

Indice di compattabilità..... 170

Appendice D

Calcestruzzo indurito..... 173

Appendice E

Boiacche 177

Appendice F

Malte..... 182

Spandimento..... 183

Appendice G

Risultati cassero sperimentale..... 186

Valutazione prima stesa 187

Valutazione seconda stesa..... 188

Valutazione terza stesa 189
Metodo di valutazione e principali difetti 190
Reologia idonea per slip-form..... 193

Bibliografia..... 195

Elenco delle figure

Figura 2.1 Pavimentazioni rigide.	23
Figura 2.2 Giunto di contrazione.....	24
Figura 2.3 Giunto di costruzione longitudinale.....	25
Figura 2.4 Giunto di dilatazione.....	25
Figura 2.5 Giunti e barre di compartecipazione.....	26
Figura 2.6 Taglio del giunto.....	26
Figura 2.7 Getto di pavimentazione in cassaforma fissa compattata con rullo vibrante.....	28
Figura 2.8 Estrusione della lastra mediante slip-form.....	28
Figura 2.9 Treno di macchine operanti in successione per la stesa di pavimentazioni in calcestruzzo.....	29
Figura 2.10 Componenti tipici di una slip-form (ACPSA).	30
Figura 2.11 Foto dal sotto dei vibratori di una slip-form (ACPA).....	31
Figura 2.12 Tipica picchettatura per la stesa di una pavimentazione mediante slip-form (ACPA).	31
Figura 2.13 Tessitura realizzata mediante scopatura trasversale.	34
Figura 2.14 Spruzzatura del composto polimerico a protezione del getto.	34
Figura 2.15 Esempio di pavimentazione realizzata con slip-form nell'area cargo dell'aeroporto di Malpensa.	35
Figura 2.16 Prescrizione per la curva di percentuale di aggregato trattenuto (ETL 97-5).....	37
Figura 2.17 Curva granulometrica ben gradata ad "haystack" (ACPA).	37
Figura 2.18 Determinazione di una granulometria ben gradata attraverso coarseness factor e workability factor secondo ETL 97-5.....	38
Figura 2.19 Determinazione della curva granulometrica migliore in funzione delle tecniche di messa in opera.....	39
Figura 2.20 Prova Green test su calcestruzzo.	41
Figura 2.21 Effetto della vibrazione sul calcestruzzo.	43
Figura 2.22 Distanziamento dei vibratori interni suggerito dal manuale Wirtgen.....	46
Figura 2.23 Curva di carico e curva di sforzo della miscela di boiaccia.	49
Figura 2.24 Mini slip-form per lo studio del Self-Compacting Concrete – Application for slip-form paving.....	51
Figura 2.25 Prova di un calcestruzzo auto-compattante attraverso mini slip-form.....	51

Figura 3.1 Sabbia vagliata 0/2.....	54
Figura 3.2 Sabbia 0/8.	55
Figura 3.3 Ghiaietto 8/20.	56
Figura 3.4 Limiti ammissibili per il contenuto in polveri secondo UNI EN 8520-2	57
Figura 3.5 Limiti ammissibili per i costituenti chimici contenuti in UNI EN 8520-2	58
Figura 3.6 Posizionamento della curva cumulata nella workability box secondo ETL 97-5...	59
Figura 3.7 Effetto dell'additivo aerante sulla resistenza meccanica (R come Resistenza, Enco Journal, anno VI n. 16).	61
Figura 3.8 Cemento utilizzato nella sperimentazione	62
Figura 3.9 Additivo superfluidificante (a sinistra) e additivo aerante (a destra).....	64
Figura 3.10 Fibre in polipropilene fibrillato di 6 mm	64
Figura 3.11 Mix design e ricetta finale.....	66
Figura 4.1 Slip-form in dimensioni reali (a sinistra), mini slip-form da precedenti ricerche (a destra).	67
Figura 4.2 Il cassero sperimentale.....	68
Figura 4.3 Dimensioni del cassero sperimentale.....	69
Figura 4.4 Posizione del vibratore e profilo del giunto	69
Figura 4.5 Verricello per l'avanzamento del cassero sperimentale.....	70
Figura 4.6 Approvvigionamento di calcestruzzo alla slip-form in cantiere.	72
Figura 4.7 Approvvigionamento di calcestruzzo al cassero sperimentale da autobetoniera...	73
Figura 4.8 Vibrazione del calcestruzzo in fase di getto.	74
Figura 4.9 Finitura superficiale della lastra stesa con cassero sperimentale.	75
Figura 5.1 Essiccatore a raggi infrarossi	80
Figura 5.2 Prova di consistenza mediante abbassamento al cono di Abrams secondo UNI EN 12350-2.	84
Figura 5.3 Prova di spandimento su tavola a scosse secondo UNI EN 12350-5.	85
Figura 5.4 Prova di compattabilità secondo UNI EN 12350-4.	86
Figura 5.5 Apparecchiatura per la misura del contenuto d'aria	88
Figura 5.6 Determinazione del contenuto d'acqua mediante bruciatura secondo UNI 11201.	89
Figura 5.7 Prova di resistenza a compressione su cubi secondo UNI EN 12390-4.	90
Figura 5.8 Maturazione dei provini in acqua secondo UNI EN 12390-2.....	91
Figura 5.9 Apparecchiatura per le prove ultrasoniche.	93
Figura 5.10 Viscosimetro Brookfield con serie di spindle LV e tabella dei fattori di conversione.	95
Figura 5.11 Pressa configurata per la rottura a flessione (sinistra) e a compressione (destra).	98
Figura 5.12 Misura ultrasonica su travetti.....	98
Figura 5.13 Prova di spandimento delle malte secondo UNI EN 1015-3.	99
Figura 5.14 Slump verticale e slump orizzontale	102
Figura 5.15 Perdita di forma del giunto	102
Figura 5.16 Carotatura delle lastre di calcestruzzo	103
Figura 6.1 Prova di spandimento su tavola a scosse non classificabile.	107

Figura A.1 Scheda tecnica della sabbia 0/2.....	153
Figura A.2 Scheda tecnica della sabbia 0/8.....	154
Figura A.3 Scheda tecnica del ghiaietto 8/20.....	155
Figura A.4 Scheda tecnica dell'additivo superfluidificante.....	156
Figura A.5 Scheda tecnica dell'additivo aerante.....	157
Figura A.6 Scheda tecnica delle fibre polipropileniche pag. 1.....	158
Figura A.7 Scheda tecnica delle fibre polipropileniche pag. 2.....	159
Figura B.1 Programma prove sperimentali pag. 1.....	161
Figura B.2 Programma prove sperimentali pag. 2.....	162
Figura B.3 Programma prove sperimentali pag. 3.....	163
Figura B.4 Programma prove sperimentali pag. 4.....	164
Figura E.1 Spindle della serie LV del viscosimetro Brookfield (da LV1 a sinistra a LV4 a destra).....	181
Figura E.2 Fattori di conversione per il calcolo della viscosità in funzione del tipo di spindle e della sua velocità di rotazione nel viscosimetro Brookfield.....	181
Figura F.1 Risultati delle prove sulle malte.....	185
Figura G.1 Esclusione del primo tratto di stesa dalla valutazione.....	190
Figura G.2 Suddivisione della lastra per la valutazione.....	191
Figura G.3 Difetto di instabilità con finitura ondulata causata da miscela troppo fluida.....	191
Figura G.4 Cordolo ben realizzato (a sinistra) e cordolo richiuso (a destra).....	191
Figura G.5 Abbassamento del cordolo (a sinistra) e strappi nel cordolo (a destra).....	192
Figura G.6 Finitura superficiale della lastra elevata (a sinistra) e buona (a destra), entrambe valide per l'utilizzo in slip-form con apparati di finitura.....	192
Figura G.7 Finitura superficiale bassa della lastra (a sinistra) e finitura superficiale pessima (a destra).....	192
Figura G.8 Difetto di vibrazione intervenuto tra la prima e la seconda parte della lastra (a sinistra) e insufficienza di vibrazione per la finitura del cordolo a quella consistenza del calcestruzzo (a destra).....	193
Figura G.9 Prova di abbassamento al cono di Abrams con risultato 1,5 cm.....	193
Figura G.10 Prova di spandimento su tavola a scosse con risultato 27,5 cm.....	194
Figura G.11 Indice di compattabilità con risultato 1,23.....	194

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 Confronto tra slip-form e casseforme fisse secondo Innovative Pavement Research Foundation, 2003	27
Tabella 2.2 Descrizione dei vari tipi di tessitura per pavimentazioni in calcestruzzo (IMCP).	33
Tabella 2.3 Contenuto d'aria richiesto in funzione della dimensione massima dell'aggregato e della classe di esposizione (PCA).....	40
Tabella 2.4 Intervalli di caratteristiche dei vibratori interni secondo ACI 309R-96.....	45
Tabella 3.1 Richiesta di acqua in funzione del diametro massimo dell'aggregato e della classe di consistenza (Collepari, Il nuovo calcestruzzo)	65
Tabella 5.1 Impasti di boiacche e malte realizzati in laboratorio con le rispettive denominazioni.....	77
Tabella 5.2 Impasti di calcestruzzo stesi con il cassero sperimentale e realizzati in laboratorio.	77
Tabella 5.3 Classi di consistenza mediante abbassamento al cono di Abrams secondo UNI EN 206-1	85
Tabella 5.4 Classi di consistenza mediante spandimento su tavola a scosse secondo UNI EN 206-1.	85
Tabella 5.5 Classe di consistenza per compattezza secondo UNI EN 206-1.	86
Tabella 5.6 Velocità di funzionamento della mescolatrice automatica.....	96
Tabella 6.1 Valori di spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	107
Tabella 6.2 Valori di spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.....	107
Tabella 6.3 Confronto tra masse volumiche di progetto e reali dei calcestruzzi stesi con cassero sperimentale della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	110
Tabella 6.4 Contenuto d'aria dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	110
Tabella 6.5 Contenuti d'acqua richiesti ed effettivi per ciascuna stesa ricavati mediante prova di bruciatura.....	111

Tabella 6.6 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.....	112
Tabella 6.7 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.....	112
Tabella 6.8 Confronto tra compattabilità di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.....	113
Tabella 6.9 Confronto tra compattabilità di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.....	113
Tabella 6.10 Confronto tra spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.....	114
Tabella 6.11 Confronto tra spandimenti su tavola a scosse di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.....	114
Tabella 6.12 Masse volumiche e grado di compattazione di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	116
Tabella 6.13 Masse volumiche e grado di compattazione di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.....	117
Tabella 6.14 Massa volumica a fresco di alcune malte.....	137
Tabella 6.15 Confronto della reologia della stesa del calcestruzzo con acqua/cemento 0,33 realizzato in laboratorio e il calcestruzzo con acqua/cemento 0,39 steso con cassero sperimentale.....	148
Tabella C.1 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9%.....	166
Tabella C.2 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.....	166
Tabella C.3 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.....	167
Tabella C.4 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.....	168
Tabella C.5 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.....	168
Tabella C.6 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.....	169
Tabella C.7 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	170

Tabella C.8 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.....	170
Tabella C.9 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.	171
Tabella C.10 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	172
Tabella D.1 Risultati delle prove sui calcestruzzi.	174
Tabella D.2 Risultati delle carote di calcestruzzo della prima serie di lastre stese.	175
Tabella D.3 Risultati delle carote di calcestruzzo della seconda serie di lastre stese.	175
Tabella D.4 Risultati delle carote di calcestruzzo della terza serie di lastre stese.	176
Tabella E.1 Risultati delle prove sulle boiacche.	178
Tabella E.2 Viscosità delle boiacche.....	179
Tabella E.3 Viscosità nel tempo della boiaccia.....	180
Tabella G.1 Valutazione lastra 1A.	187
Tabella G.2 Valutazione lastra 1B.	187
Tabella G.3 Valutazione lastra 1C.	188
Tabella G.4 Valutazione lastra 2A.	188
Tabella G.5 Valutazione lastra 2B.	189
Tabella G.6 Valutazione lastra 3B.	189
Tabella G.7 Valutazione lastra 3C.	190

Elenco dei grafici

Grafico 2.1 Correlazione tra frequenza, ampiezza e raggio d'azione di un vibratore da 60 mm (ACI 309.1 R-93).....	44
Grafico 2.2 Il comportamento viscoso dei fluidi.....	47
Grafico 3.1 Curva granulometrica della sabbia vagliata 0/2.....	54
Grafico 3.2 Curva granulometrica della sabbia 0/8.....	55
Grafico 3.3 Curva granulometrica del ghiaietto 8/20.....	56
Grafico 3.4 Curva cumulata.....	60
Grafico 6.1 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi stesi con cassero sperimentale delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (in blu) e 1,1 % (in rosso).....	105
Grafico 6.2 Abbassamento al cono di Abrams di calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,36 (in blu) e 0,39 (in rosso).....	106
Grafico 6.3 Spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi realizzati in laboratorio per serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (in blu) e 0,39 (in rosso).	108
Grafico 6.4 Indice di compattabilità di calcestruzzi stesi con cassero sperimentale della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (in blu) e 1,1 % (in rosso).....	109
Grafico 6.5 Indice di compattabilità di calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (in blu) e 0,39 (in rosso).	109
Grafico 6.6 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.	112
Grafico 6.7 Confronto tra compattabilità di calcestruzzi realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.	113
Grafico 6.8 Resistenza a compressione dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).....	117
Grafico 6.9 Resistenza a compressione dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (a sinistra) e 0,39 (a destra).....	118
Grafico 6.10 Confronto tra resistenza cubica a compressione dei cubi e delle carote della prima stesa (serie acqua/cemento, superfluidificante 0,9 %).	119
Grafico 6.11 Confronto tra resistenza cubica a compressione dei cubi e delle carote della seconda stesa (serie superfluidificante, acqua/cemento 0,39).	119

Grafico 6.12 Confronto tra resistenza cubica a compressione dei cubi e delle carote della terza stesa (serie acqua/cemento, superfluidificante 1,1 %).	120
Grafico 6.13 Modulo elastico dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).	121
Grafico 6.14 Modulo elastico dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (a sinistra) e 0,39 (a destra).	122
Grafico 6.15 Confronto tra i moduli elastici misurati e teorici dei calcestruzzi delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).	122
Grafico 6.16 Confronto tra i moduli elastici misurati e teorici dei calcestruzzi delle serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (a sinistra) e 0,39 (a destra).	123
Grafico 6.17 Viscosità della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9% (a sinistra) e 1,1% (a destra).	124
Grafico 6.18 Viscosità della boiaccia della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,30 (a destra).	125
Grafico 6.19 Viscosità della boiaccia della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,39.	125
Grafico 6.20 Viscosità nel tempo per una boiaccia con (rosso) e senza (blu) superfluidificante.	126
Grafico 6.21 Resistenza a compressione di boiacce della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).	126
Grafico 6.22 Resistenza a compressione di boiacce della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).	127
Grafico 6.23 Resistenze a compressione di boiacce per serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	127
Grafico 6.24 Resistenza a flessione della boiaccia della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).	128
Grafico 6.25 Resistenza a flessione delle boiacce della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).	128
Grafico 6.26 Resistenza a compressione delle boiacce della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	129
Grafico 6.27 Modulo elastico delle boiacce delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).	129
Grafico 6.28 Modulo elastico delle boiacce delle serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).	130
Grafico 6.29 Modulo elastico delle boiacce della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	130
Grafico 6.30 Spandimento delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (in blu) e 1,1 % (in rosso).	131
Grafico 6.31 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 (in blu), 0,36 (in rosso) e 0,33 (in verde).	132

Grafico 6.32 Resistenza a compressione delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).....	133
Grafico 6.33 Resistenza a compressione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).....	133
Grafico 6.34 Resistenza a compressione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	134
Grafico 6.35 Resistenza a flessione delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).....	134
Grafico 6.36 Resistenza a flessione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).....	135
Grafico 6.37 Resistenza a flessione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	135
Grafico 6.38 Modulo elastico delle malte delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).....	136
Grafico 6.39 Modulo elastico delle malte delle serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).....	136
Grafico 6.40 Modulo elastico delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	137
Grafico 6.41 Resistenze a compressione di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,39 e superfluidificante 0,9 %.....	139
Grafico 6.42 Resistenze a compressione di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,36 e superfluidificante 1,1 %.....	139
Grafico 6.43 Modulo elastico di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,39 e superfluidificante 0,9 %.....	140
Grafico 6.44 Modulo elastico di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,36 e superfluidificante 1,1 %.....	141
Grafico C.1 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	166
Grafico C.2 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.....	167
Grafico C.3 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.....	167
Grafico C.4 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.....	168
Grafico C.5 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	169
Grafico C.6 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.	169
Grafico C.7 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.....	170

Grafico C.8 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.....	171
Grafico C.9 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.	171
Grafico C.10 Indice di compattabilità dei calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	172
Grafico F.1 Spandimento delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.	183
Grafico F.2 Spandimento delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.	183
Grafico F.3 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.	184
Grafico F.4 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.	184
Grafico F.5 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33.	184

CAPITOLO 1

Introduzione

Negli ultimi anni, nell'ambito della progettazione delle pavimentazioni stradali e aeroportuali, gli standard prestazionali richiesti sono sempre più elevati. Questa tendenza si riscontra maggiormente in ambito aeroportuale dove l'aumento del traffico e l'aumento delle dimensioni dei velivoli inducono sollecitazioni sempre maggiori nelle pavimentazioni; è questo il caso ad esempio delle aree di parcheggio dei velivoli, che devono essere in grado di sostenere i carichi degli aeromobili durante le manovre, la sosta ed il carico-scarico. Per questi motivi si preferisce generalmente utilizzare in queste aree pavimentazioni in calcestruzzo non armato che sono meno sensibili alle temperature, all'interazione con gli agenti chimici e all'azione di elevati carichi statici rispetto alle classiche pavimentazioni flessibili in conglomerato bituminoso.

Inoltre, dato l'incremento dei volumi di traffico nella maggior parte degli aeroporti italiani ed esteri, si è vista la necessità di ampliare i piazzali di sosta degli aeromobili sviluppando nuovi metodi di lavorazione e tecnologie d'avanguardia, che consentano una buona ottimizzazione delle risorse ed un'elevata velocità di esecuzione dei lavori, infatti l'interruzione del traffico per lunghi periodi comporterebbe forti disagi nonché costi elevati.

Per far fronte a queste necessità si è riscontrata una tendenza all'utilizzo di finitrici per calcestruzzo a cassero scorrevole (slip-form), macchinari innovativi che presentano i seguenti vantaggi rispetto ai metodi tradizionali per il getto di pavimentazioni rigide:

- elevata produttività;
- finitura superficiale in continuo con la stesa;
- utilizzo di miscele con un basso slump, con conseguente minore quantità d'acqua necessaria e migliori prestazioni meccaniche;
- elevata regolarità superficiale;
- compattazione tramite vibrazione più omogenea;
- riduzione della quantità di giunti di costruzione necessari;
- riduzione della manodopera necessaria.

È evidente che questi macchinari soddisfano tutte le esigenze descritte permettendo di velocizzare i tempi di stesa, di incrementare le resistenze grazie ai bassi quantitativi d'acqua richiesti per il confezionamento delle miscele e di ottenere una buona regolarità e omogeneità della pavimentazione, con un minor numero di giunti ed una buona finitura superficiale. Inoltre le modalità di stesa, con estrusione di una lastra praticamente finita dietro la macchina, consentono di ottenere vantaggi sulla riduzione dei tempi di stesa, di maturazione e di manodopera altrimenti necessaria.

Questa tecnologia innovativa è già ampiamente utilizzata per i suoi innumerevoli vantaggi in altri paesi come gli Stati Uniti o molte zone del Nord Europa anche in ambito stradale; in Italia invece si è sviluppata solo in ambito aeroportuale e solo nell'ultimo decennio. Alcuni esempi italiani di realizzazione di pavimentazioni rigide con slip-form sono l'aera Cargo e la testata 35R della pista 17L/35R dell'aeroporto di Malpensa, che verranno trattate in seguito, nonché un piazzale di sosta degli aeromobili presso l'aeroporto G. Marconi di Bologna.

Per questa ragione, non sono ancora presenti in Italia un numero di esperienze tali da poter individuare degli standard comuni a tutte le miscele di calcestruzzo per slip-form, né è presente alcun tipo di ricerca in questo settore.

L'obiettivo primario del presente elaborato è quindi quello di sanare almeno in parte questa lacuna determinando, tramite delle prove sul calcestruzzo fresco al momento della stesa, dei parametri che garantiscano un corretto comportamento della miscela utilizzata nel cassero scorrevole. Inoltre si vogliono ricercare e fornire delle indicazioni riguardo la corretta progettazione delle suddette miscele, in termini di composizione e di parametri relativi a prove su malte e boiacche, correlando i risultati ottenuti in laboratorio con quelli al momento della stesa.

In questo modo è possibile unificare la procedura di progettazione del conglomerato cementizio in modo da essere certi che questo abbia una reologia idonea alla stesa con slip-form a prescindere dal tipo di materiale utilizzato, ottimizzando i tempi delle lavorazioni e garantendo risultati sempre conformi ai capitolati tecnici.

Uno degli aspetti innovativi del presente studio riguarda l'impiego del cassero sperimentale come strumento di verifica delle esperienze di laboratorio. In tal senso, lo studio ha consentito un duplice risultato: definire i requisiti ottimali relativi al calcestruzzo idoneo all'impiego con slip-form e allo stesso tempo individuare i punti di forza e le differenze del cassero sperimentale nei confronti dell'applicazione con slip-form su scala reale.

Infine, considerando gli elevati livelli prestazionali oggi richiesti, in particolare per le pavimentazioni aeroportuali, si è effettuata anche una caratterizzazione meccanica dei materiali utilizzati, analizzandone le caratteristiche di resistenza a compressione e modulo elastico, nonché l'influenza che la presenza e la dimensione degli aggregati può avere su questi parametri.

Ci si propone quindi di individuare delle prime linee guida da seguire nella progettazione e nella stesa di calcestruzzi estrusi con slip-form.

CAPITOLO 2

Analisi bibliografica

2.1 Pavimentazioni rigide in calcestruzzo

L'odierna tecnologia di sviluppo delle pavimentazioni stradali sfrutta numerosi materiali, diversi tra loro per caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche, che vanno a costituire una successione di strati, scelti a seconda della funzione che devono assolvere all'interno della struttura e a seconda del tipo di sollecitazione cui sono sottoposti.

Al variare dei materiali impiegati nei vari strati, dell'ordine in cui essi sono presenti all'interno della struttura e delle tecniche costruttive, le pavimentazioni possono essere classificate in flessibili, semirigide, rigide, composite, modulari o in terra.

Nel presente elaborato vengono prese in considerazione le pavimentazioni rigide con utilizzo in ambito aeroportuale. Infatti, a differenza di molti paesi del nord Europa o degli Stati Uniti, in Italia questo tipo di tecnologia non trova grande sviluppo nel settore stradale, mentre risulta necessario il suo utilizzo in campo aeroportuale in quanto le pavimentazioni in conglomerato bituminoso presentano incompatibilità con solventi e combustibili nonché risultano inadatte a sopportare elevati carichi statici per lunghi tempi (aeromobili in sosta nei piazzali). Più in generale le pavimentazioni rigide, nonostante costi elevati di costruzioni e problemi di sostenibilità ambientale, presentano notevoli vantaggi:

- Elevata resistenza ai carichi
- Bassa suscettività termica
- Elevata durabilità
- Ridotta manutenzione
- Maggiore sicurezza

Si possono distinguere quattro tipi di pavimentazioni rigide:

- Pavimentazione non armata: frequente presenza di giunti trasversali con o senza barre di compartecipazione.

- Pavimentazione armata: leggera armatura in senso longitudinale e trasversale nella porzione superiore dello spessore della lastra per tenere chiuse le lesioni generate dalle variazioni termiche.
- Pavimentazione ad armatura continua: pesante armatura longitudinale disposta nella parte superiore che ha il compito di arginare le lesioni generate da fenomeni igrometrici. Assenza di giunti trasversali ad eccezione di quelli di costruzione.
- Pavimentazione precompressa: la precompressione è assicurata con martinetti piatti oppure con barre o cavi post-tesi.

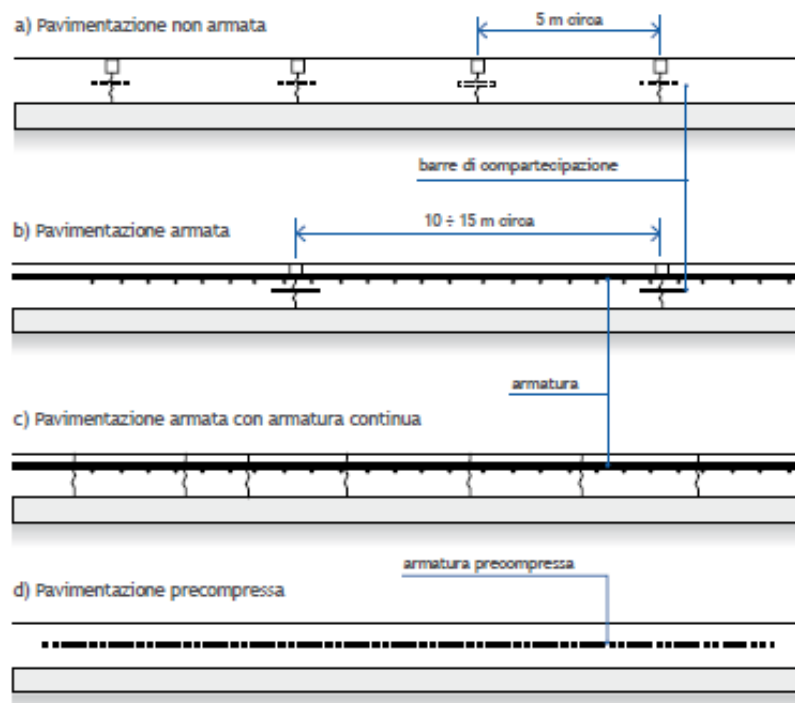


Figura 2.1 Pavimentazioni rigide.

I giunti

Esigenze di carattere costruttivo, unitamente alla necessità di controllo della fessurazione del calcestruzzo, rendono necessaria la realizzazione, nell'ambito della pavimentazione rigida, di giunti di vario tipo. Questi possono essere classificati come longitudinali o trasversali, generalmente ortogonali tra loro, a seconda della loro disposizione rispetto al senso di marcia. A loro volta possono essere suddivisi in base alla loro funzione in:

- **Giunti di contrazione:** possono essere trasversali o longitudinali e costituiscono delle discontinuità nella parte superiore delle lastre di calcestruzzo. Hanno la funzione di permettere il ritiro e la contrazione termica, con relativa dilatazione fino al valore iniziale della lastra di calcestruzzo nonché di controllarne la fessurazione. Questi sono i giunti più frequenti: infatti, poiché la resistenza a trazione del calcestruzzo è nettamente inferiore di quella a compressione, i fenomeni di variazione dimensionale, se non controllati, provocano appunto l'innescò di fessurazioni. Questi giunti hanno

una profondità di circa $1/3 - 1/4$ dello spessore della lastra e un'ampiezza dai 2 ai 4 mm e costituiscono perciò delle zone di debolezza strutturale della pavimentazione. Il completamento del giunto lungo il restante spessore si produce in seguito alle lesioni dovute alle contrazioni della lastra, le quali si localizzano in queste zone di minima resistenza. La compartecipazione può essere assicurata mediante incastro degli aggregati delle superfici delle lastre a contatto oppure attraverso barre di compartecipazione lisce. I giunti di contrazione trasversali possono essere indotti oppure realizzati mediante taglio in calcestruzzi posati con casseforme fisse mentre possono soltanto essere tagliati per calcestruzzi stesi con slip-form. Il taglio del giunto può avvenire per fresatura del conglomerato appena indurito oppure tramite coltelli vibranti quando è ancora fresco e deve essere realizzato tra le 6 e le 24 ore dall'inizio della stesa in funzione delle condizioni meteorologiche presenti. Immediatamente dopo la realizzazione del taglio, il giunto deve essere lavato e riempito con materiale plastico in modo da impedire l'ingresso di materiale esterno. I giunti di contrazione trasversali indotti, vengono invece realizzati inducendo un piano di debolezza nel calcestruzzo plastico mediante il posizionamento di un induttore di fessura durante la stesa e il successivo inserimento di un sigillante.

In senso longitudinale i giunti di contrazione servono a prevenire gli effetti di possibili cedimenti differenziali e hanno quindi la prevalente funzione di giunti di rotazione, in quanto permettono la rotazione relativa delle lastre adiacenti. Vengono realizzati segnando il calcestruzzo indurito parecchie ore dopo il taglio dei giunti trasversali.

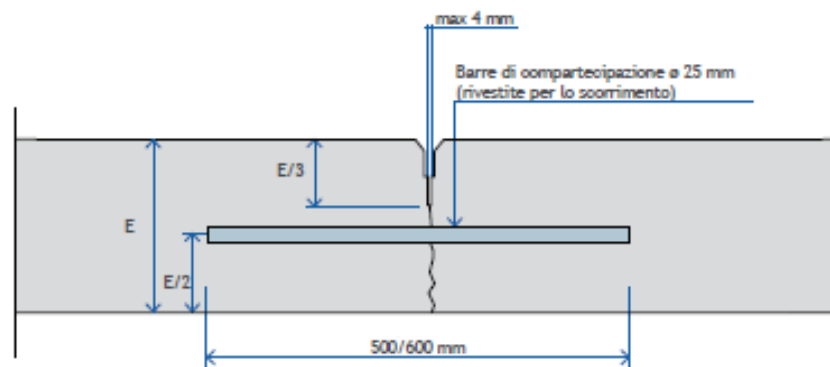


Figura 2.2 Giunto di contrazione.

- Giunti di costruzione: possono essere trasversali, longitudinali e ortogonali alla superficie di rotolamento e sono necessari ogni volta che il getto della pavimentazione viene interrotto per un periodo superiore a 30-40 minuti. Quelli trasversali vengono realizzati al termine della giornata di lavoro. La conformazione dei giunti longitudinali dipende dallo spessore della lastra: per spessori maggiori di 20 cm si realizzano profili ad incastro, mentre per spessori minori si richiede l'esecuzione di un profilo dritto. Dove i profili ad incastro non sono previsti, si inseriscono barre di compartecipazione

ad aderenza migliorata per evitare l'allontanamento e il cedimento differenziale delle lastre.



Figura 2.3 Giunto di costruzione longitudinale.

- Giunti di dilatazione: consentono l'espansione delle lastre nei periodi più caldi e fungono anche da giunti di contrazione. Interessano tutto lo spessore della pavimentazione e vengono realizzati in corrispondenza di opere d'arte o intersezioni. Vista la loro ampiezza sono sempre dotati di barre di compartecipazione.

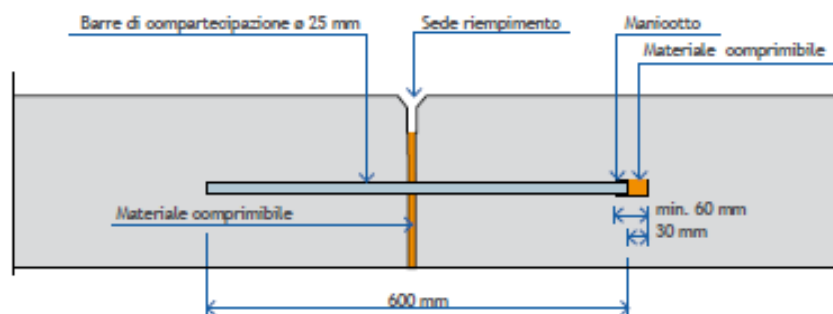


Figura 2.4 Giunto di dilatazione.

- Giunti di movimento: realizzati per pavimentazioni in prossimità di bordi o strutture (es. cordoli dei marciapiedi). Strutturalmente simili ai giunti di dilatazione ma privi di vincoli e armature.



Figura 2.5 Giunti e barre di compartecipazione.

I giunti vengono realizzati tramite due tagli: il primo per effettuare il taglio della lastra vero e proprio (Figura 2.6) e il secondo per rifinire la camera di contenimento del sigillante e la smussatura. Il taglio deve avvenire a calcestruzzo sufficientemente indurito, per evitare rotture locali, ma prima che inizi il processo di fessurazione. Si passa quindi alla pulizia e asciugatura del giunto per poter poi realizzare la sigillatura che garantisce la durabilità del calcestruzzo, impedendo le infiltrazioni di acqua; aumenta inoltre il comfort di marcia degli utenti, riducendo il rumore di rotolamento degli pneumatici. La tipologia del materiale sigillante viene scelta in funzione delle caratteristiche climatiche e di esercizio, nonché della previsione temporale degli interventi di manutenzione.



Figura 2.6 Taglio del giunto.

Le tecniche di costruzione

In primo luogo è necessario che il piano di posa di un pavimentazione rigida sia a capacità portante uniforme poiché la presenza di zone a portanza ridotta o eccessiva causa la rottura del calcestruzzo. Le tecniche base di posa delle pavimentazioni in calcestruzzo si dividono in due categorie: a casseforme fisse o a casseforme mobili. La scelta di uno dei due metodi dipende dalle esigenze di cantiere e di progetto, nonché dalle dimensioni dell'opera e da considerazioni economiche.

Casseforme fisse	Slip-form
Raggiunta sulle casseforme o su passerelle semoventi	Semovente con due o quattro guide
Curvatura e altezza dati dal cassero	Curvatura e altezza dati dalla picchettatura
Nessun limite di larghezza	Larghezza della pavimentazione fino a 15 m in funzione della macchina e della dotazione
Peso circa 1500 kg/m di larghezza	Peso circa 3000 kg per metro di larghezza
Coclea a vite sospesa per la distribuzione del calcestruzzo davanti alla staggia o al rullo	Coclea per la distribuzione continua del calcestruzzo alla testa della macchina
Uno o due vibratori che si muovono trasversalmente di fronte alla staggia e/o vibratori fissi sui casseri laterali	Contiene vibratori interni con frequenza di vibrazione regolabile
Fornisce un'energia di costipazione per pavimentazioni di massimo 250 mm	Fornisce energia di costipazione sufficiente anche a pavimentazioni di 375 mm
	Consente diversi strumenti di finitura

Tabella 2.1 Confronto tra slip-form e casseforme fisse secondo Innovative Pavement Research Foundation, 2003

Le casseforme fisse sono costituite di acciaio o di legno e sagomate per seguire la curvatura della piattaforma; il loro posizionamento è preceduto dal posizionamento di picchetti che ne consentono la corretta disposizione. Il calcestruzzo viene quindi gettato tra le pareti del cassero e posizionato in maniera uniforme, avendo cura che la faccia superiore sia verticale e normale alla direzione di getto e che l'altezza di caduta non sia eccessiva per evitare eventuali segregazioni. Sono inoltre da evitare interruzioni di getto ed è opportuno che la finitura sia realizzata immediatamente dopo la posa.



Figura 2.7 Getto di pavimentazione in cassaforma fissa compattata con rullo vibrante.

Le casseforme devono rimanere in opera almeno 12 ore dopo il getto del calcestruzzo. La compattazione e la finitura possono essere effettuate usando aghi e/o stagge vibranti (laser screed o roller screed). Le operazioni di finitura comprendono la finitura trasversale e longitudinale nonché la tessitura superficiale, che devono essere realizzate in questo ordine immediatamente dopo il getto del calcestruzzo. Inoltre è opportuno che, dopo la posa, il calcestruzzo venga protetto per la fase di maturazione.

L'utilizzo di casseforme scorrevoli, o slip-form, è subordinato alla presenza di un piano di avanzamento sufficientemente regolare, portante e scorrevole. La qualità delle pavimentazioni posate con questo metodo è migliore, fattore che ne promuove l'utilizzo insieme alla elevata produttività: ogni giorno possono essere infatti stesi, ad esempio, 600 m³ su larghezze di pavimentazione di 7,5 m.



Figura 2.8 Estrusione della lastra mediante slip-form.

2.2 Slip-form

Le macchine pavidmentatrici a casseformi scorrevoli, in inglese slip-form pavers, sono utilizzate per la realizzazione di pavimentazioni stradali ed aeroportuali, marciapiedi, cordoli, barriere spartitraffico ed altre applicazioni. Queste macchine permettono di consolidare e dare forma al calcestruzzo allo stato plastico attraverso la sua estrusione. Il sistema permette di ottenere la forma desiderata confinando il calcestruzzo nella cassaforma. La spinta per l'estrusione viene fornita dall'avanzamento della slip-form e dall'energia fornita al calcestruzzo dai vibratori. Il confinamento garantisce la compattazione e quindi la massima uniformità delle stese e un rapido avanzamento. Per questo motivo la slip-form viene adoperata in cantieri che richiedono produzioni elevate. La realizzazione del getto avviene mediante un treno di macchine che realizzano in successione le fasi necessarie:

- Autocarro a cassone ribaltabile con escavatore gommato o nastro trasportatore distributore per il rifornimento del materiale.
- Macchina a cassaforma scorrevole per la compattazione e l'estrusione (slip-form paver).
- Macchina per la finitura superficiale (spesso unita alla precedente).
- Carrello per la spruzzatura del composto polimerico (curing compound).



Figura 2.9 Treno di macchine operanti in successione per la stesa di pavimentazioni in calcestruzzo.

Una serie di strumenti montati sulla slip-form permette l'estrusione di una lastra uniforme. Questi strumenti sono una coclea o una lama di distribuzione, una livella, i vibratori, la barra costipatrice e un pannello per la finitura superficiale ed i casseri per la creazione del profilo (Figura 2.10). Il confinamento e la forma sono quindi garantiti dal pannello, dai casseri laterali e dal piano di appoggio.

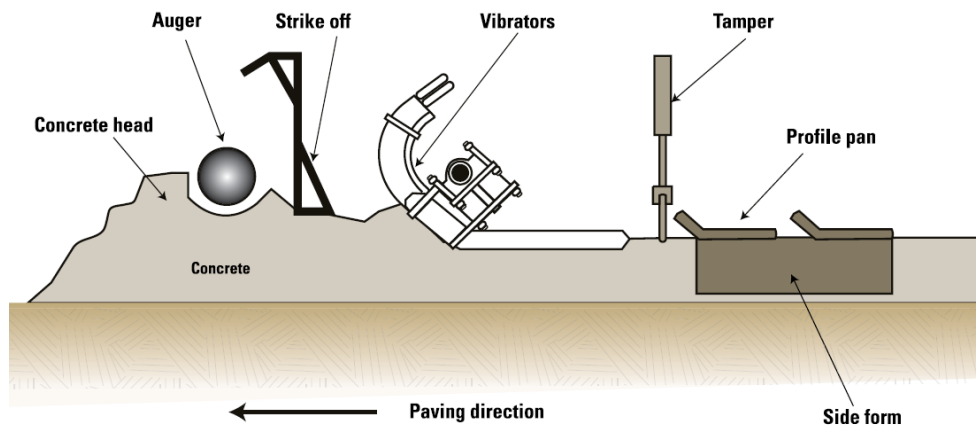


Figura 2.10 Componenti tipici di una slip-form (ACPSA).

Durante la stesa il cassero della macchina è forzato a scorrere su un volume di calcestruzzo che rimane invece fermo al suolo. I vibratori aiutano l'operazione fluidificando il calcestruzzo mentre la cassaforma scorre su di essa permettendone il confinamento. I fattori che influenzano la pressione richiesta per l'estrusione sono:

- Il peso della macchina.
- La rastremazione dei casseri laterali per la formazione dei giunti.
- L'angolo del pannello di finitura della superficie della pavimentazione.
- La potenza e la frequenza dei vibratori.
- La velocità di avanzamento della slip-form.
- La lavorabilità del calcestruzzo.

Le principali regolazioni che l'operatore di macchina può effettuare sono la velocità di avanzamento e la frequenza dei vibratori interni. Questa possibilità serve a migliorare la messa in opera del calcestruzzo che viene approvvigionato non sempre nelle stesse identiche condizioni di consistenza. Inoltre la slip-form deve distribuire e compattare il calcestruzzo mentre avanza. Se viene fatta fermare spesso oppure se deve spingere e distribuire una grande quantità di calcestruzzo alla testa della macchina non può garantire un buon risultato finale.

La compattazione

La vibrazione è necessaria per consolidare il calcestruzzo. Nelle slip-form una serie di vibratori fluidificano il calcestruzzo e rimuovono l'aria intrappolata (Figura 2.11).

I vibratori sono tipicamente impostati a frequenza costante che può essere monitorata e regolata dall'operatore. L'aumento della frequenza di vibrazione può essere utile, ma non può essere utilizzata per superare problemi di equipaggiamento, di mancato allineamento o di scarsa qualità del calcestruzzo. Un eccesso di vibrazione può causare effetti indesiderati come la segregazione di miscele non ben proporzionate o l'espulsione totale di aria inglobata per la resistenza ai cicli di gelo-disgelo.

L'Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement (IMCP) suggerisce come la frequenza dei vibratori, se impostata a 12000 vibrazioni per minuto, è bene venga abbassata nell'intervallo tra 5000 e 8000 vibrazioni per minuto nel caso di

velocità di avanzamento della slip-form inferiori a 0,9 m al minuto o di segregazione del calcestruzzo. Dei sensori collegati ai vibratori permettono di conoscere la frequenza di vibrazione in tempo reale e ne consentono la regolazione all'operatore.



Figura 2.11 Foto dal sotto dei vibratori di una slip-form (ACPA).

Il sistema di guida

Il pannello del cassero che definisce la superficie della pavimentazione è regolato da sensori che seguono i fili dei picchetti laterali. I picchetti con il filo sono il principale sistema di guida della slip-form. Due linee di picchetti uniti da corde poste ai lati del getto della pavimentazione vengono percepiti dai palpatori della slip-form che ne regolano non solo l'andamento della macchina, ma anche l'allineamento dei casseri in particolare quello di superficie.

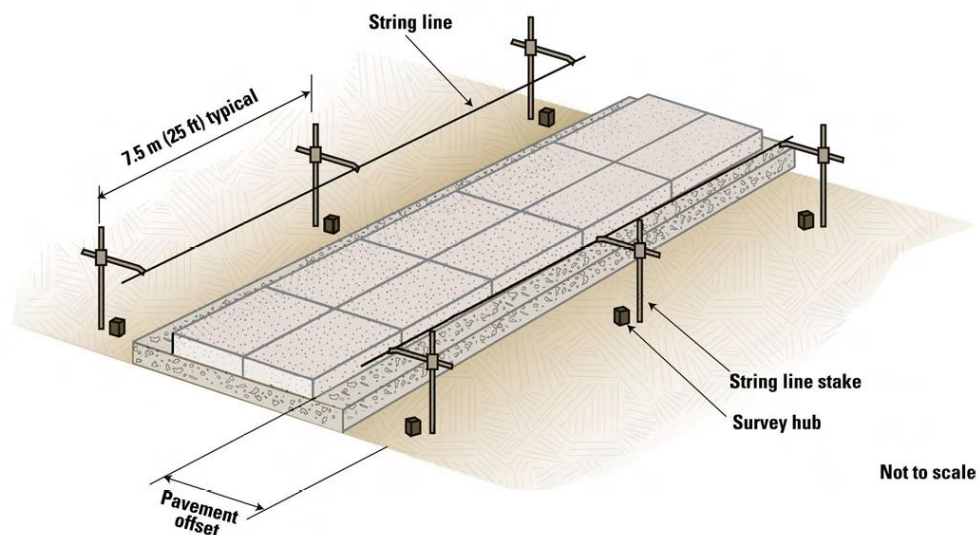


Figura 2.12 Tipica picchettatura per la stesa di una pavimentazione mediante slip-form (ACPA).

Questo sistema garantisce la corretta inclinazione della superficie della pavimentazione secondo quanto progettato per lo smaltimento delle acque. La picchettatura stabilisce un andamento globale della slip-form ma è insensibile a repentine e notevoli variazioni di profilo. Queste irregolarità si ripercuoterebbero sulla superficie della pavimentazione generando dossi o avvallamenti indesiderati. È quindi indispensabile disporre i picchetti e la corda con la massima cura; inoltre è necessario che gli operatori prestino la massima attenzione durante le operazioni di getto per evitare urti e spostamenti. La fase di finitura superficiale, spesso realizzata dalla stessa slip-form in coda all'estrusione, risente anch'essa delle distorsioni della linea di riferimento. Per questi motivi la corda legata ai picchetti deve essere posta tra 450 e 750 mm dal suolo per consentirne le regolazioni e i picchetti posti alla massima distanza di 7,5 m per assicurare una buona stabilità. La distanza dovrà essere ridotta in concomitanza di curve orizzontali o verticali. Il posizionamento dei picchetti dovrà considerare la larghezza della slip-form e lo spazio di lavoro per gli operatori e spesso può essere utilizzata anche per altre operazioni come il livellamento e la stabilizzazione del sottofondo e la costruzione dello strato di base. Essendo il sistema di guida fondamentale per il risultato finale si richiede, in fase di cantiere, più di un controllo della sua corretta messa in opera. Recentemente è stato sviluppato un nuovo sistema di guida basato sul sistema GPS, necessario quando le condizioni di cantiere non permettono l'utilizzo del sistema tradizionale.

Le barre d'armatura

Le barre di compartecipazione lisce servono a trasferire il carico da una lastra alla successiva prevenendo l'apertura dei giunti trasversali. Le barre ad aderenza migliorata servono nei giunti longitudinali a prevenire allontanamenti delle lastre e cedimenti differenziali

Le barre lisce vengono disposte per il getto attraverso dei castelli di armatura a perdere infissa nel sottofondo. Il loro ancoraggio deve essere solido per prevenire uno spostamento nella fase di getto. La presenza delle barre può influire sulla compattazione del calcestruzzo al passaggio della slip-form. Esistono anche attrezzi appositi per l'inserimento delle barre di compartecipazione da effettuarsi dopo l'estrusione della lastra tuttavia esse alterano la finitura superficiale della lastra specialmente con calcestruzzi non ben proporzionati.

Le barre ad aderenza migliorata vengono inserite nelle facce laterali delle pavimentazioni estruse dopo il passaggio della slip-form. L'inserimento può avvenire manualmente o attraverso appositi macchinari.

La finitura superficiale

Dopo l'estrusione della lastra e l'eventuale inserzione automatizzata delle barre lisce di compartecipazione una trave oscillante e un pannello di lisciatura concludono la finitura della lastra. Alcuni operatori eventualmente correggono eventuali imperfezioni e vuoti tralasciati dalla macchina.

A questo punto, a calcestruzzo ancora in stato plastico, viene realizzata la tessitura superficiale, che serve per fornire un attrito adeguato e una resistenza allo scivolamento.

Esistono diverse tecniche mostrate in Tabella 2.2 per ottenere una buona tessitura superficiale operando quando il calcestruzzo è ancora fresco.

Metodi di tessitura	Descrizione
Trascinamento di un telo di iuta	La tessitura viene prodotta dal trascinamento di una tela grossolana inumidita ad una velocità definita attraverso una passerella. Produce striature profonde da 1,5 a 3 mm.
Trascinamento di un tappeto di erba sintetica	La tessitura viene prodotta dal trascinamento di un tappeto di erba sintetica ad una velocità definita attraverso una passerella. Produce striature profonde da 1,5 a 3 mm con un tappeto di 77500 fili/m ² .
Scopatura trasversale	La tessitura è ottenuta utilizzando una scopa mano o un dispositivo meccanico che trascina leggermente le setole rigide su tutta la superficie. Produce striature profonde da 1,5 a 3 mm.
Scopatura longitudinale	Come la scopatura trasversale, tranne che la scopa è trascinata in direzione longitudinale.
Rastrellatura casuale	La tessitura è creata da un rastrello metallico che si muove trasversalmente alla pavimentazione o in direzione obliqua.
Rastrellatura longitudinale	Come la rastrellatura casuale, tranne che il rastrello si muove in direzione longitudinale.
Esposizione degli aggregati	Si ottiene applicando un additivo ritardante sulla superficie della pavimentazione e coprendo con un telo di plastica. Successivamente viene lavata e spazzolata la superficie in modo tale da esporre gli aggregati. Un'altra tecnica prevede l'applicazione di aggregati alla superficie del calcestruzzo fresco e la successiva abrasione meccanica della pasta cementizia.
Molatura con punte diamantate	La tessitura è data da striature a coste create da lame diamantate. La testa di tagli produce circa 165 striature al metro profonde da 3 a 20 mm.

Tabella 2.2 Descrizione dei vari tipi di tessitura per pavimentazioni in calcestruzzo (IMCP).

Qualsiasi tecnica venga adottata è importante applicare la tessitura nel modo più uniforme possibile per ottenere, sulle pavimentazioni, un valore di attrito e rumorosità uniformi.

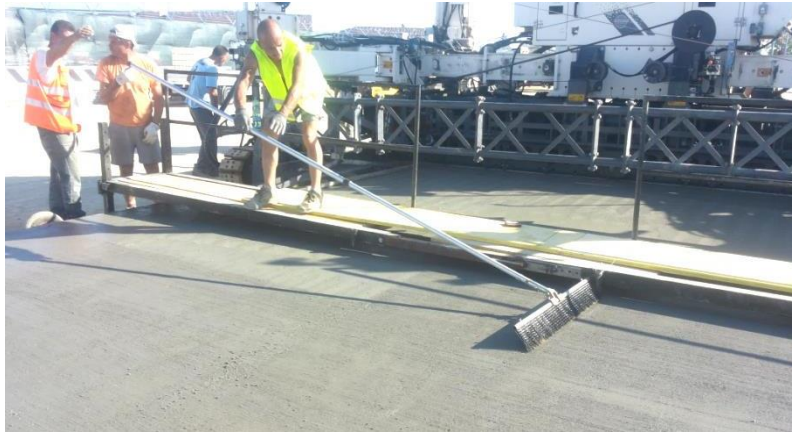


Figura 2.13 Tessitura realizzata mediante scopatura trasversale.

La protezione del getto

La protezione del getto serve a mantenere il livello di umidità e di temperatura costanti nel calcestruzzo fresco per consentirne una corretta maturazione. La protezione del getto serve sia a garantire la qualità dello strato superficiale, quello che poi sarà maggiormente esposto ai carichi e alle condizioni ambientali, sia ad evitare una eccessiva e rapida evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo fresco (ritiro plastico e ritiro igrometrico). È possibile utilizzare diversi metodi per la protezione del getto: vaporizzazione di acqua, applicazione di teli inumiditi, fogli di plastica, coperte isolanti oppure liquidi che formano delle pellicole anti-evaporanti (curing compound).

Questi ultimi sono quelli più diffusi e ritenuti più adatti alle fasi da cantiere. Il curing compound è un composto polimerico che viene spruzzato sul getto e forma un film che riveste il calcestruzzo. Questo strato riduce l'evaporazione e previene fessurazioni da ritiro e mancata maturazione della superficie, in particolare in climi caldi e ventosi.

Per climi freddi e umidi si è soliti proteggere il getto con teli in plastica che ne impediscano il dilavamento a causa della pioggia e che lo proteggano dalle basse temperature. In quest'ultimo caso è raccomandato l'impiego di appositi teli o materassini coibenti.

È importante che le operazioni di protezione avvengano immediatamente dopo la finitura della lastra.



Figura 2.14 Spruzzatura del composto polimerico a protezione del getto.

Esempio di utilizzo in Italia

Un esempio di applicazione italiana in ambito aeroportuale è la nuova area cargo dell'aeroporto di Malpensa realizzata, tra Giugno 2011 e Settembre 2013, in parte in pavimentazione flessibile e in parte in pavimentazione rigida stesa con slip-form. Il calcestruzzo per la pavimentazione rigida era soggetto alle seguenti prescrizioni progettuali:

- CEM IV/A (32.5R) in quantità pari a circa 400 kg/m³
- Rck 45
- classe di esposizione XF4
- classe di consistenza S1
- $a/c = 0.39$
- fibre polimeriche strutturali

La pavimentazione è stata realizzata in lastre non armate 6,00 x 6,00 m con i seguenti tipi di giunti:

- Costruzione: longitudinale a coda di rondine non armato
- Contrazione: trasversale ogni 6 m taglio fresco. Formazione controllata di fessure da ritiro
- Dilatazione: su tutto il perimetro e ogni 150 m di avanzamento longitudinale con barre di compartecipazione.

Un altro intervento realizzato in parte con questo tipo di macchinario è stata la riqualifica della pista 17L/35R dell'aeroporto di Malpensa tra Settembre 2012 e Giugno 2013; in particolare la slip-form è stata utilizzata per il rifacimento della pavimentazione rigida della testata 35R di superficie 5500 mq, che ha richiesto un quantitativo di calcestruzzo di circa 2200 mc. Il lastronato è delle dimensioni di 15 m di larghezza e 258 m di lunghezza con giunti di contrazione ogni 5m. Al calcestruzzo utilizzato è stata richiesta una resistenza a compressione a 7 giorni di 55 MPa. Le finiture superficiali sono state realizzate tramite spazzolatura in senso trasversale ed è stato effettuato un trattamento con prodotto filmogeno con funzione anti-evaporante.



Figura 2.15 Esempio di pavimentazione realizzata con slip-form nell'area cargo dell'aeroporto di Malpensa.

2.3 Influenza della curva granulometrica

La curva granulometrica delle miscele di calcestruzzo per slip-form è stata oggetto di studio negli ultimi anni. Curve granulometriche non adatte hanno portato, su pavimentazioni appena realizzate, a scheggiature dei giunti e scagliature delle superfici. Dopo aver compreso l'influenza della curva granulometrica sulla reologia della miscela, come per il self-compacting concrete, è stato possibile migliorare il comportamento del calcestruzzo in fase di messa in opera.

La ricerca per il mix design del calcestruzzo per pavimentazioni aeroportuali è stata condotta negli Stati Uniti dalla Air Force Civil Engineer Support Agency (AFCESA) ora Air Force Civil Engineer Center (AFCEC) e ha prodotto l'Engineer Technical Letter (ETL) 97-5. Tale documento tecnico fornisce un metodo per individuare una curva granulometrica adatta per la costruzione di pavimentazioni rigide aeroportuali. Vengono definite tre classi di esposizione delle pavimentazioni: mite, quando il calcestruzzo è soggetto raramente al gelo; moderata, quando il calcestruzzo non è soggetto continuamente a fenomeni di gelo e all'uso di sali disgelanti; severa, quando il calcestruzzo è saturo ed esposto a cicli di gelo-disgelo e all'uso di sali disgelanti. La classe di esposizione e la dimensione massima dell'aggregato definiscono un quantitativo minimo di aria contenuta in forma di micro bolle per la resistenza ai cicli termici. Inoltre la dimensione massima dell'aggregato viene indicata pari a 19 mm se la pavimentazione è realizzata in zone geografiche dove è frequente la fessurazione termica delle lastre (D-cracking). L'aggregato fine, invece, deve avere modulo di finezza (FM) superiore a 2,35 in accordo anche con le prescrizioni USAF, mentre non è applicabile il limite superiore di 3,1 da normativa ASTM C 33. Un modulo di finezza basso indica una elevata quantità di aggregato più fine, mentre un modulo di finezza più elevato indica una maggiore quantità di aggregato fine di granulometria grossa. Il modulo di finezza viene calcolato come la somma diviso cento del trattenuto cumulato percentuale ai setacci 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm.

È opportuno che le percentuali di aggregato grosso e fino siano proporzionate in modo da garantire i requisiti di lavorabilità, resistenze, finitura e capacità di auto-sostenersi della miscela. Dalle fonti bibliografiche analizzate in merito, come ETL 97-5, *Minnesota Concrete Flatwork Specifications* e *Concrete Pavement Mixture Design and Analysis*, emerge che le miscele ben gradate (well-graded) siano la combinazione ideale per applicazioni con slip-form. Infatti una composizione degli aggregati di tipo "well-graded" tende a ridurre la quantità d'acqua necessaria nella miscela, riduce i potenziali fenomeni di ritiro, migliora la lavorabilità, facilita la finitura superficiale, evita fenomeni di segregazione ed incrementa la resistenza e la vita utile della pavimentazione. Si forniscono in seguito i metodi per il proporzionamento degli aggregati nelle miscele per slip-form.

Percentuale combinata di aggregato trattenuto

Questo metodo fornisce delle indicazioni per costruire una curva granulometrica uniforme: una volta scelta la curva cumulata, in funzione delle pezzature disponibili, dovrà essere

verificata costruendo un grafico dove si riportano in ascissa le dimensioni del setaccio ed in ordinata la percentuale di trattenuto corrispondente.

Una regola generale suggerita dall'USACE (U.S. Army Corps of Engineers) per la costruzione di pavimentazioni rigide aeroportuali mediante slip-form è di contenere il materiale trattenuto ad ogni setaccio tra l'8 ed il 18%, da cui derivano le linee tratteggiate che delimitano la zona "satisfactory" in Figura 2.16.

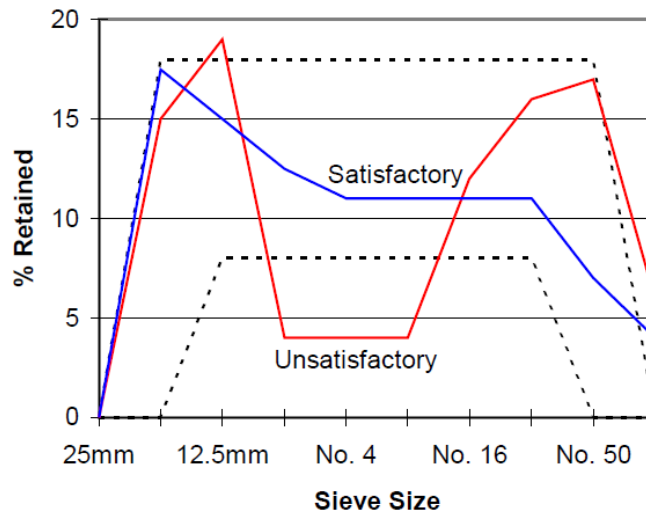


Figura 2.16 Prescrizione per la curva di percentuale di aggregato trattenuto (ETL 97-5).

La linea spezzata risultante dalla curva granulometrica ipotizzata dovrebbe rappresentare una transizione graduale dall'aggregato grosso a quello fino ed essere contenuta nei limiti della zona identificata come "satisfactory". Inoltre non ci dovrebbero essere "picchi" e "valli" troppo accentuati tra il setaccio a 9.5 mm e quello più piccolo (n°50 - n°100 ASTM; 0.3-0.15 mm). La linea blu in Figura 2.16 mostra l'esempio di una curva ben graduata (well-graded), quella rossa di una non idonea (gap-graded). La soluzione ottimale per ottenere una curva granulometrica ben gradata è la cosiddetta forma a "haystack" Figura 2.17, come raccomandato dall'American Concrete Pavement Association (ACPA).

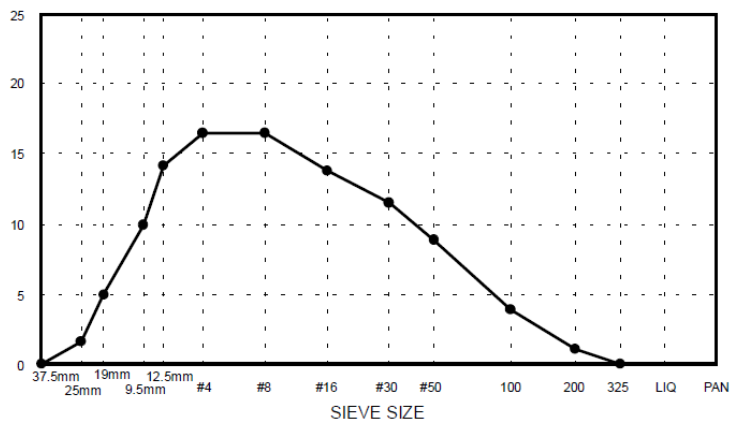


Figura 2.17 Curva granulometrica ben gradata ad "haystack" (ACPA).

Naturalmente, con le granulometrie disponibili, è difficile ottenere una curva di questo tipo; si raccomanda di seguire quanto più possibile queste indicazioni, cercando di ottenere un graduale incremento di trattenuto su ogni setaccio consecutivo dal più grande fino a 9,5 mm, per poi continuare con una diminuzione uniforme senza ulteriori picchi o valli.

Coarseness Factor e Workability Factor

Dopo aver individuato una curva granulometrica “well-graded”, l’ETL 97-5 prescrive il calcolo di due parametri, *coarseness factor* e *workability factor* con lo scopo di verificare, nel grafico di riferimento (Figura 2.18), di trovarsi nella zona che identifica una granulometria ben proporzionata. Il *coarseness factor* viene calcolato come il rapporto tra la percentuale di trattenuto al setaccio 9,5 mm e la percentuale di trattenuto al setaccio 2,36 mm, moltiplicato poi per cento. Un valore di CF pari a 100 indica una granulometria nella quale non sono presenti aggregati di pezzatura intermedia, mentre un valore uguale a 0 implica che non siano presenti aggregati grossi. In ogni caso CF deve essere compreso tra 30 e 80. Il *workability factor* è la percentuale di passante al setaccio 2,36 mm e deve essere incrementato del 2,5% ogni 56 kg/m³ di cemento che si aggiungono alla quantità minima di 335 kg/m³.

Il *workability factor* fornisce indicazioni sulla quantità complessiva di aggregato fino, utile per stimare il grado di “mobilità” della miscela durante la fase di posa in opera. Inoltre, mantenere WF nei limiti raccomandati incrementa la sicurezza che la miscela definitiva sia stata ottimizzata per garantire lavorabilità, durabilità e resistenza.

$$coarseness\ factor = \frac{\% \text{ trattenuto setaccio } 9,5\ mm}{\% \text{ trattenuto setaccio } 2,36\ mm} \cdot 100$$

$$workability\ factor = \% \text{ passante setaccio } 2,36\ mm$$

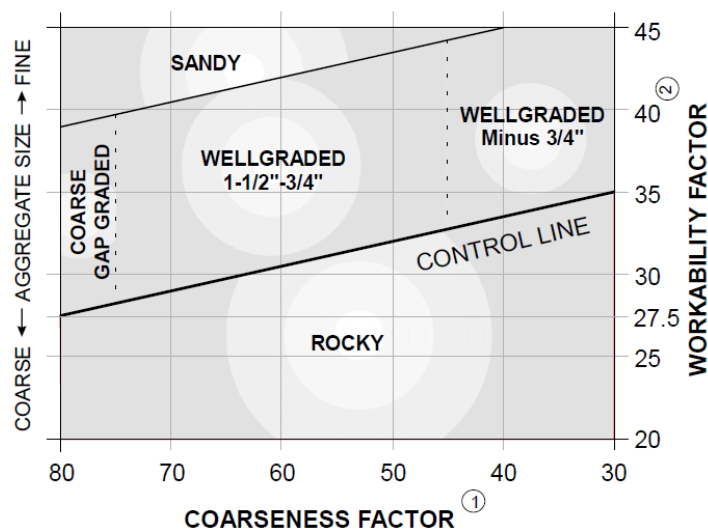


Figura 2.18 Determinazione di una granulometria ben gradata attraverso coarseness factor e workability factor secondo ETL 97-5.

Una volta riscontrato che tali parametri risultino all'interno della zona centrale del grafico, è utile perfezionare la curva granulometrica in modo da ottenere dei nuovi valori localizzati nella zona più adatta in base al metodo di messa in opera della pavimentazione. In particolare, la curva granulometrica più adatta per la messa in opera mediante slip-form si ottiene nella zona in basso a sinistra di Figura 2.16 (zona A).

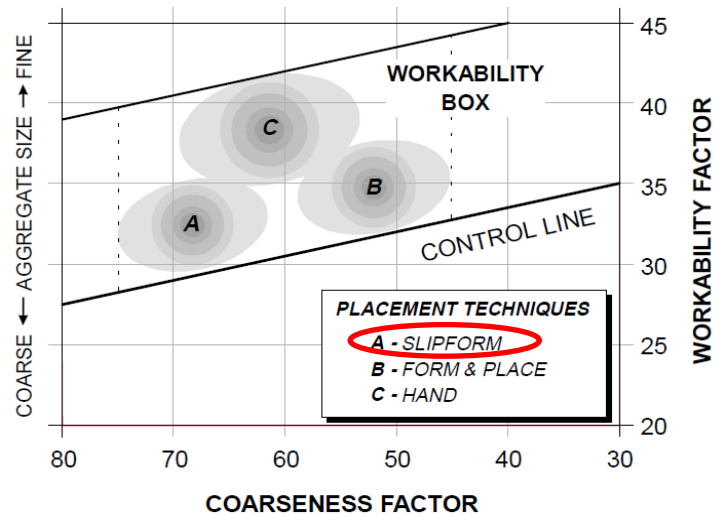


Figura 2.19 Determinazione della curva granulometrica migliore in funzione delle tecniche di messa in opera.

Tale guida per il proporzionamento degli aggregati non considera altri fattori che influenzano la lavorabilità quali il contenuto d'aria e l'aggiunta di additivi chimici. Sono inoltre da considerare anche le variazioni giornaliere nell'estrazione degli aggregati che possono modificare anche notevolmente la posizione della curva risultante all'interno del grafico precedente.

2.4 Calcestruzzi per slip-form secondo ETL 97-5

In seguito si forniscono alcune indicazioni valide per il proporzionamento di calcestruzzi per pavimentazioni da realizzarsi tramite slip-form, ricavate dall'ETL 97-5.

Per la descrizione della procedura di mix design si rimanda al Capitolo 3 e al Capitolo 5.

- **Aggregati:**

Per quanto concerne la determinazione della curva granulometrica e più in generale tutte le specifiche riguardanti gli aggregati si rimanda al precedente paragrafo.

- **Stima della lavorabilità:**

Il metodo più comunemente utilizzato per la stima della lavorabilità, perché facilmente riproducibile in cantiere, è la misura dello slump, come stabilito nell'ASTM C 143 "Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete".

La lavorabilità della miscela deve essere prescritta a seconda del tipo di applicazione cui è destinata: viene fissato a priori uno slump massimo di 25 mm per stesa mediante slip-form.

- **Contenuto di cemento:**

Il contenuto minimo di cemento per questo tipo di applicazioni non deve mai essere inferiore a 335 kg/m^3 di calcestruzzo o, qualora vengano aggiunte ceneri volanti alla miscela, non inferiore a 307 kg/m^3 di calcestruzzo.

- **Rapporto acqua/cemento:**

Il rapporto acqua/cemento dipende dalla lavorabilità richiesta e ne viene stabilito un valore massimo pari a 0,45. Il "Minnesota Concrete Flatwork Specification" impone invece un limite più restrittivo pari a 0,42.

- **Contenuto d'aria:**

La quantità d'aria, in percentuale sul volume della miscela, deve essere compresa tra quelle riportate nella seguente tabella secondo quanto indicato dalla Portland Cement Association (PCA) per pavimentazioni rigide aeroportuali. Il contenuto varia in funzione della classe di esposizione climatica del sito e della dimensione massima dell'aggregato utilizzato nella miscela. Sono ammessi scostamenti dalla percentuale ottima di -1/+2 punti percentuali.

Max. dimensione nominale aggregato [mm]	Esposizione "Severe"	Esposizione "Moderate"	Esposizione "Mild"
37.5	5.5	4.5	2.5
25	6	4.5	3
19	6	5	3.5

Tabella 2.3 Contenuto d'aria richiesto in funzione della dimensione massima dell'aggregato e della classe di esposizione (PCA).

Si elencano in seguito una serie di test di laboratorio utilizzati per la caratterizzazione di calcestruzzi particolari, come quelli utilizzati per le stese tramite slip-form. La lavorabilità e la

capacità di auto-sostenersi possono essere studiate mediante test su tavola a scosse, prove di viscosità, slump test o green test.

- Tavola a scosse

Il metodo della tavola a scosse, di cui si parlerà in seguito, può essere utilizzato per valutare la lavorabilità e la consistenza di boiacche e malte cementizie e/o del calcestruzzo. Alcuni studi identificano come idonea una miscela per slip-form se l'allargamento su tavola a scosse raggiunge il valore di 9.5 ± 0.2 in. tra le 16 e le 18 cadute della tavola.

- Viscosità

Per quanto riguarda gli studi effettuati sulla viscosità si rimanda al 2.6 Teoria della viscosità

- Green Strength Test

Questo test misura lo sforzo di compressione che una miscela di calcestruzzo fresco è in grado di sopportare prima di collassare. Maggiore sarà la resistenza e migliore sarà la capacità del calcestruzzo di auto-sostenersi. Un valore basso di questo test implica una scarsa capacità della miscela di mantenere la propria forma con evidenti deformazioni una volta estrusa.



Figura 2.20 Prova Green test su calcestruzzo.

2.5 Teoria della vibrazione

La corretta compattazione è presupposto essenziale per l'ottenimento delle prestazioni di progetto della miscela di calcestruzzo. La messa in opera richiede infatti che esso venga costipato adeguatamente nella forma che dovrà poi assumere una volta indurito. Infatti un calcestruzzo appena gettato nella cassaforma è ricco di aria intrappolata e se lasciato indurire in tale condizione presenterà porosità (macro-vuoti), minore resistenza, poca uniformità e armature non bene avvolte. Il costipamento degli aggregati e della pasta del calcestruzzo con l'eliminazione dell'aria intrappolata viene realizzato mediante azioni meccaniche manuali o automatiche. Con i mezzi attualmente disponibili il metodo di compattazione più diffuso risulta essere la vibrazione, sia interna che esterna. Una serie di fattori influenzano il risultato finale della compattazione, come per esempio la lavorabilità/fluidità, la dimensione massima degli aggregati, la curva granulometrica, il tipo di vibrazione e la sua durata. Sostanzialmente il risultato finale della compattazione dipende dalla reologia della miscela e dall'effetto della vibrazione. Non pochi studiosi si sono dedicati alla comprensione scientifica dei fenomeni in gioco, tuttavia nella pratica di cantiere tale argomento risulta ancora oggi poco conosciuto dai più e lasciato alla valutazione empirica.

La necessità di classificare la lavorabilità delle miscele di calcestruzzo mediante prove di consistenza ha portato alla messa a punto di prove come il cono di Abrams, il Vebe test, la tavola a scosse, il Powers remolding test, il Kelly ball e altri discussi da Neville (1981), Vollick (1966) e Popovics (1982). L'evidenza dimostra che una maggiore lavorabilità del conglomerato richiede un minore sforzo per la compattazione fino ad arrivare all'invenzione, realizzata in Giappone negli anni 90, di un calcestruzzo auto-compattante (SCC), la cui consistenza combinata con altre proprietà permette di ottenere la giusta compattazione evitando la vibrazione. Sorgono tuttavia due considerazioni al riguardo: non tutte le lavorazioni consentono l'utilizzo di un calcestruzzo auto-compattante, inoltre la consistenza non può essere l'unico parametro descrittivo della reologia del calcestruzzo che interagisce nel processo di compattazione. Per esempio, miscele con slump elevato tendono maggiormente a segregare. Gli studi condotti da Ritchie (1968) hanno individuato tre parametri per descrivere la reologia del calcestruzzo fresco: la stabilità, che considera i fenomeni di segregazione e di bleeding; la compattabilità che è funzione della densità relativa e la mobilità che dipende dall'angolo interno di attrito, dalla coesione e dalla viscosità.

Focalizzando l'attenzione su miscele in classe di consistenza molto bassa, idonee per stesa di pavimentazioni mediante slip-form, viene descritto l'effetto della vibrazione sui parametri indicativi della reologia. Questo tipo di miscela è caratterizzato da un rapporto acqua/cemento molto basso: in questi casi la stabilità può essere messa in crisi dalla vibrazione a causa del fenomeno della "segregazione secca", con perdita di coesione per distacco degli aggregati grossi dalla pasta cementizia. La rapida perdita di lavorabilità dovuta a diversi fattori come il tipo di cemento, l'uso di additivi, le caratteristiche degli aggregati, ecc. riduce la compattabilità della miscela intaccando la qualità finale del prodotto. In particolare la dimensione massima dell'aggregato e la sua forma, tondeggianti o frantumata, influenzano non solo il proporzionamento del mix design, ma possono anche essere correlate al fattore di

compattabilità (Hughes 1966; Kaplan 1958; Lees 1964; Murdock 1968). Anche la curva granulometrica adottata, se non ben proporzionata, può causare la riduzione di coesione e l'insorgenza di fenomeni di bleeding. La presenza di additivi chimici come superfluidificanti, aeranti, viscosizzanti, ritardanti o acceleranti e di aggiunte pozzolaniche o di fly ash producono, in genere, un beneficio sulle proprietà del calcestruzzo a vantaggio della vibrazione.

Si tratta ora di comprendere il meccanismo della vibrazione ed i suoi effetti in funzione della reologia della miscela. Un vibratore trasmette al calcestruzzo un rapido movimento oscillatorio che può essere descritto in termini di frequenza (f) e ampiezza (s):

$$x = s \cdot \sin(2\pi ft)$$

$$\dot{x} = 2\pi fs \cdot \cos(2\pi ft)$$

$$\ddot{x} = 4\pi^2 f^2 s \cdot \sin(2\pi ft)$$

L'accelerazione massima impressa al calcestruzzo fresco dal moto armonico risulta quindi essere:

$$a = 4\pi^2 f^2 s$$

L'energia quindi trasmessa alla massa di calcestruzzo venne calcolata da Kirkham (1962) attraverso questa formula:

$$w = cms^2 f^3 t$$

dove c è una costante che dipenda dalla lavorabilità del calcestruzzo, m è la massa volumica del calcestruzzo e t il tempo.

L'ampiezza di vibrazione decresce con la distanza x (Dessoff, 1937):

$$s_x = s_0 \cdot e^{-(\Omega/2) \cdot x}$$

con smorzamento Ω di un calcestruzzo da fluido ad asciutto compreso tra 0,04 e 0,08.

Durante la vibrazione il processo di compattazione avviene in due fasi: nella prima si ha uno scorrimento del calcestruzzo mentre nella seconda avviene la fuoriuscita delle bolle d'aria intrappolate (Kolek 1963). L'effetto finale è un materiale formato da aggregati grossi sospesi in un matrice cementizia, come desiderato.



Figura 2.21 Effetto della vibrazione sul calcestruzzo.

Nella realizzazione di pavimentazioni rigide, la compattazione del calcestruzzo avviene mediante l'utilizzo di vibratori interni inseriti manualmente o in batteria su macchine tipo slip-form oppure mediante vibrazione superficiale con vibratory screed, vibratory pan o vibratory roller screed. L'ACI 309R-96 suggerisce l'utilizzo di vibratori interni quando lo spessore della pavimentazione è maggiore di 20 cm e l'assenza di armatura o la sua disposizione lo consentono.

Uno studio effettuato da Bergstrom e Forssblad ha misurato l'area di influenza dei vibratori a vari intervalli di tempo con una semplice foto della superficie del calcestruzzo. La relazione tra la frequenza, l'ampiezza e il raggio d'azione per un vibratore interno da 60 mm dopo 10 e 30 secondi di vibrazione è mostrata in Grafico 2.1. Il maggiore raggio d'azione si ottiene alla vibrazione ottimale di 200 Hz (12000 vpm). Un incremento dell'ampiezza di vibrazione genera un incremento del raggio d'azione, per qualsiasi frequenza. Studi successivi hanno confermato la frequenza ottimale pari a 12000 vibrazioni al minuto e hanno evidenziato che, tra tutti i parametri di indagine (classe di consistenza, dimensione massima dell'aggregato, dimensione e forma del cassero, acciaio d'armatura, ecc.), la dimensione massima dell'aggregato riveste un ruolo importante sull'efficacia della vibrazione.

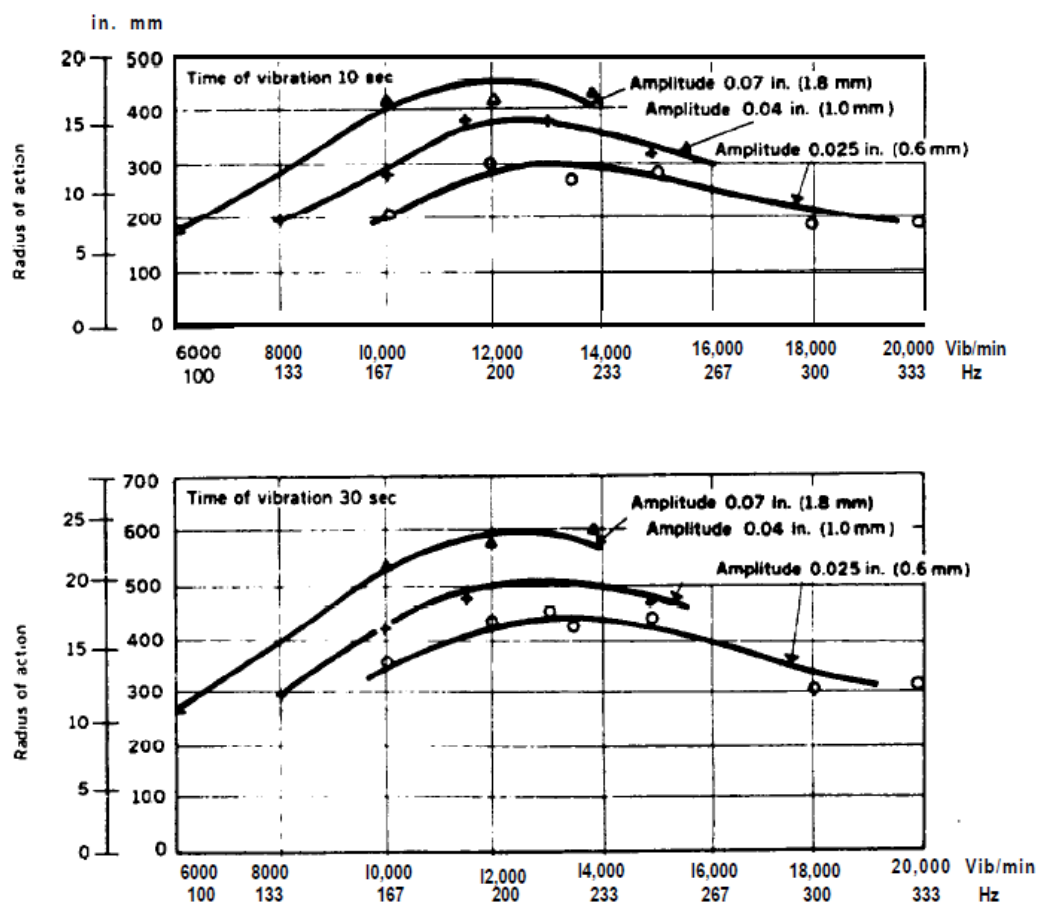


Grafico 2.1 Correlazione tra frequenza, ampiezza e raggio d'azione di un vibratore da 60 mm (ACI 309.1 R-93).

La disposizione dei vibratorii interni nella slip-form richiede di determinare il raggio d'azione del vibratore ai fini di compattare l'intera sezione della lastra estrusa. Inoltre questi macchinari garantiscono una finitura superficiale della lastra, determinata da una buona intensità di vibrazione ai bordi a contatto con la cassaforma scorrevole tale da richiamare boiaccia e richiudere ogni imperfezione. La Tabella 2.4 dell'ACI 309R-96 classifica i vibratorii e ne descrive le caratteristiche, compreso il raggio d'azione.

Column 1	2	3	4		5	6	7		8	9
Group	Diameter of head, in. (mm)	Recommended frequency, vibrations per min (Hz)	Suggested values of			Approximate values of		Rate of concrete placement, yd	Application	
			Eccentric moment, in. lb mm-kg(10 ⁻³)	Average amplitude, in. (mm)	Centrifugal force, lb (kg)	Radius of action, in. (mm)				
1	3/4-1 1/2 (2-4) (20-40)	9000-15,000 (150-200)	0.03-0.10 (0.035-0.12) (3.5-12)	0.015-0.03 (0.04-0.08) (0.4-0.8)	100-400 (45-180)	3-6 (8-15) (80-150)	1-5 (0.8-4)	Plastic and flowing concrete in very thin members and confined places. May be used to supplement larger vibrators, especially in prestressed work where cables and ducts cause congestion in forms. Also used for fabricating laboratory test specimens.		
2	1 1/4-2 1/2 (3-6) (30-60)	8500-12,500 (140-210)	0.08-0.25 (0.09-0.29) (9-29)	0.02-0.04 (0.05-0.10) (0.5-1.0)	300-900 (140-400)	5-10 (13-25) (130-250)	3-10 (2.3-8)	Plastic concrete in thin walls, columns, beams, precast piles, thin slabs, and along construction joints. May be used to supplement larger vibrators in confined areas.		
3	2-3 1/2 (5-9) (50-90)	8000-12,000 (130-200)	0.20-0.70 (0.23-0.81) (23-81)	0.025-0.05 (0.06-0.13) (0.6-1.3)	700-2000 (320-900)	7-14 (18-36) (180-360)	6-20 (4.6-15)	Stiff plastic concrete (less than 3-in. [80-mm] slump) in general construction such as walls, columns, beams, prestressed piles, and heavy slabs. Auxiliary vibration adjacent to forms of mass concrete and pavements. May be gang mounted to provide full-width internal vibration of pavement slabs.		
4	3-6 (8-15) (80-150)	7000-10,500 (120-180)	0.70-2.5 (0.81-2.9) (81-290)	0.03-0.06 (0.08-0.15) (0.8-1.5)	1500-4000 (680-1800)	12-20 (30-51) (300-510)	(15-40) (11-31)	Mass and structural concrete of 0 to 2-in. (50 mm) slump deposited in quantities up to 4 yd ³ (3m ³) in relatively open forms of heavy construction (powerhouses, heavy bridge piers, and foundations). Also auxiliary vibration in dam construction near forms and around embedded items and reinforcing steel.		
5	5-7 (13-18) (130-150)	5500-8500 (90-140)	2.25-3.50 (2.6-4.0) (260-400)	0.04-0.08 (0.10-0.20) (1.0-2.0)	2500-6000 (1100-2700)	16-24 (40-61) (400-610)	25-50 (19-38)	Mass concrete in gravity dams, large piers, massive walls, etc. Two or more vibrators will be required to operate simultaneously to mix and consolidate quantities of concrete of 4 yd ³ (3 m ³) or more deposited at one time in the form.		

Column 3—While vibrator is operating in concrete.
 Column 4—Computed by formula in Fig. A.2 in Appendix A.
 Column 5—Computed or measured as described in Section 15.3.2. This is peak amplitude (half the peak-to-peak value), operating in air.
 Column 6—Computed by formula in Fig. A.2 in Appendix, using frequency of vibrator while operating in concrete.
 Column 7—Distance over which concrete is fully consolidated.
 Column 8—Assumes the insertion spacing is 1 1/2 times the radius of action, and that vibrator operates two-thirds of time concrete is being placed.
 Columns 7 and 8—These ranges reflect not only the capability of the vibrator but also differences in workability of the mix, degree of deaeration desired, and other conditions experienced in construction.
 *Generally, extremely dry or very stiff concrete (Table 2.1) does not respond well to internal vibrators.

Tabella 2.4 Intervalli di caratteristiche dei vibratorii interni secondo ACI 309R-96.

Inoltre la sovrapposizione delle aree di azione quando più vibratorii sono utilizzati contemporaneamente incrementa l'effetto di costipazione (ACI 309.1 R-93).

Il Manuale per il getto in opera del calcestruzzo con finitrici a casseforme scorrevoli della Wirtgen indica come area di azione di un vibratore interno quella relativa all'incirca a dieci volte il diametro del vibratore. Nonostante ciò il testo suggerisce per i vibratorii in adozione a macchine Wirtgen una distanza tra loro di 36-38 cm, circa pari alla metà dell'area di azione, e di 12,5 cm dal bordo della cassaforma. Pertanto si verifica una sovrapposizione delle aree di influenza che permette una migliore compattazione e finitura superficiale.

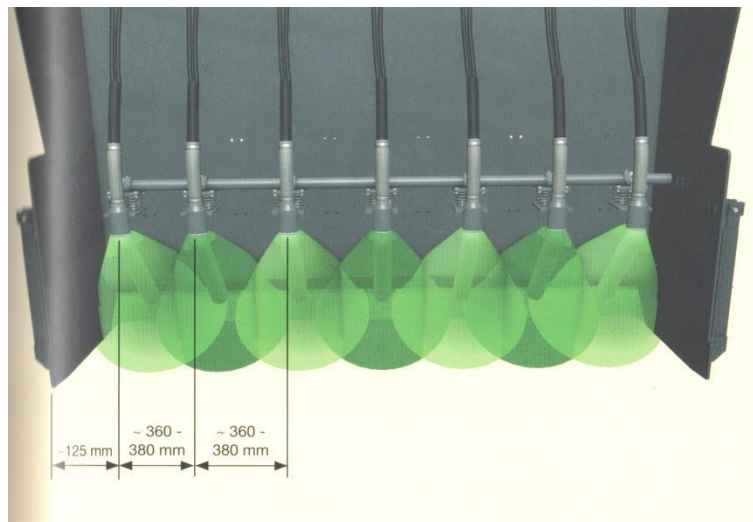


Figura 2.22 Distanziamento dei vibratori interni suggerito dal manuale Wirtgen.

Per tenere conto delle variabili di cantiere come la temperatura di stesa, la consistenza della miscela, la velocità della slip-form, ecc. i vibratori vengono dotati di regolatori di frequenza così da adeguare la vibrazione alle condizioni in essere.

2.6 Teoria della viscosità

La viscosità è una proprietà fisica dei fluidi che ne caratterizza il comportamento nei confronti delle resistenze che si oppongono al moto e può essere definita come “grandezza fisica che quantifica la resistenza dei fluidi allo scorrimento, quindi la coesione interna del fluido”. Essa può essere pensata come la forza che sarebbe necessario applicare a uno strato di fluido appartenente ad un piano fisso perché raggiunga la velocità di un altro strato posto a distanza y ed è definita attraverso la formula:

$$\mu = \frac{F\delta y}{S\delta v} = \tau \cdot \frac{\delta y}{\delta v}$$

- F Forza applicata ai piani di misurazione
- δy Distanza tra i due strati
- δv Differenza di velocità tra i due strati
- S superficie dei due strati

Lo sforzo di taglio contenuto nella precedente relazione, nota anche come legge di Newton, può essere espresso in funzione della velocità di deformazione angolare:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\delta \gamma}{\delta t} = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

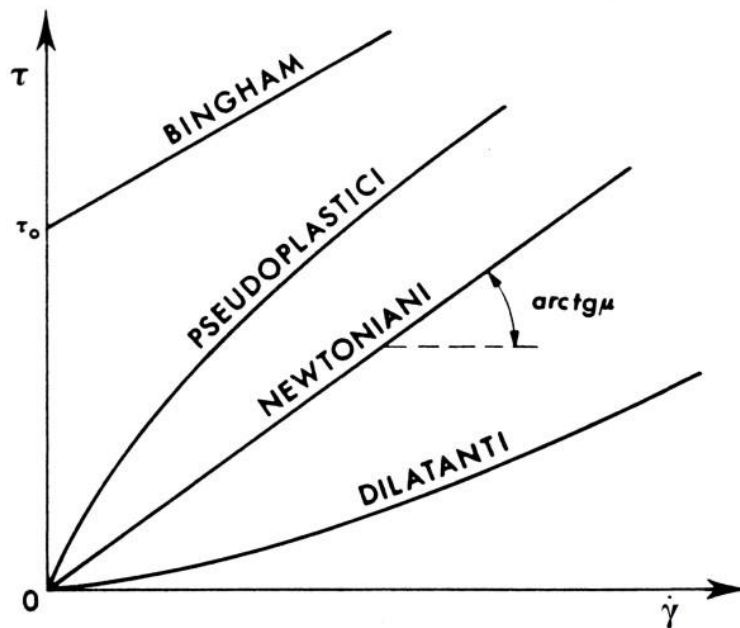


Grafico 2.2 Il comportamento viscoso dei fluidi.

I fluidi possono essere divisi in newtoniani e non newtoniani a seconda che abbiano o meno un comportamento viscoso ideale, ovvero che la viscosità presenti un valore praticamente costante per date condizioni di temperatura, o più precisamente sia indipendente dallo sforzo di taglio e dal gradiente del flusso di scorrimento (fluidi Newtoniani). A loro volta i fluidi non newtoniani possono essere distinti in tre classi:

- Fluidi con caratteristiche reologiche indipendenti dal tempo

A loro volta questi fluidi possono essere suddivisi in tre categorie:

- Fluidi plastici alla Bingham: caratterizzati da una curva reologica rettilinea non passante per l'origine, che taglia l'asse degli sforzi tangenziali in un punto di ordinata τ_0 . Ciò sta a significare che questi fluidi hanno un comportamento simile a quelli newtoniani ma che necessitano di uno sforzo che funga da innesco al movimento; infatti in queste sostanze la velocità di deformazione è nulla finché la sollecitazione iniziale si mantiene inferiore al valore di τ_0 . Questo comportamento dipende dalla struttura interna tridimensionale, analoga a quella dei solidi, e tipica per questo tipo di fluidi, che per sollecitazioni superiori a τ_0 si disintegra completamente facendo assumere al sistema caratteristiche tipiche dei fluidi newtoniani. Un comportamento di questo tipo è caratteristico delle boiacche di cemento.
 - Fluidi pseudoplastici: caratterizzati da una curva reologica passante per l'origine e concava verso il basso che indica che questi fluidi variano il loro comportamento in funzione della velocità di deformazione; queste sostanze presentano una forte resistenza al moto per piccole velocità, che diminuisce man mano che il movimento diventa più veloce. Questa diminuzione di viscosità può essere spiegata con il successivo orientamento delle particelle secondo la direzione del moto.
 - Fluidi dilatanti: caratterizzati da una curva reologica passante per l'origine con concavità verso l'alto. Anche questi fluidi variano il comportamento in funzione della velocità di deformazione ma, al contrario di quelli pseudoplastici, presentano viscosità inizialmente modesta, crescente con la velocità di deformazione.
- Fluidi in cui il legame sforzi-deformazioni dipende dalla durata dello sforzo o dalla storia precedente.

Questi fluidi presentano viscosità dipendenti dalla durata del movimento e sono a loro volta suddivisi in due classi:

- Fluidi tixotropici: modificano il loro stato a seconda delle sollecitazioni di taglio cui sono sottoposti o nel caso siano sottoposti a lunghi periodi di quiete. Lo sforzo tangenziale diminuisce gradualmente nel tempo, tendendo a un valore limite in corrispondenza del quale il fluido assume un comportamento di tipo newtoniano. Questo può essere spiegato con l'ipotesi che all'interno di questi fluidi, in condizioni di quiete prolungata, si formino dei legami strutturali, che vengono progressivamente rotti durante il moto. Le boiacche di cemento, opportunamente additivate, possono presentare caratteristiche di questo tipo.

- Fluidi reopectici: presentano un aumento di viscosità nel tempo quando sottoposti a una forza di taglio. Lo stato di moto favorirebbe quindi la formazione di legami strutturali.
- Fluidi che possiedono alcune caratteristiche dei solidi
 Questi fluidi, detti anche elastoviscosi, presentano accanto alle proprietà viscosse tipiche dei fluidi alcune proprietà elastiche dei solidi. In questo tipo di materiali al cessare del moto, gli sforzi all'interno del fluido non cessano ma si estinguono gradualmente nel tempo.

I calcestruzzi e le malte sono materiali compositi, i cui principali componenti sono acqua, cemento e aggregati. La pasta di cemento (boiaccia) a sua volta non è un fluido omogeneo, ma è anch'esso composto da particelle (grani di cemento) sospese in un liquido (acqua). Dal momento che questo composto si comporta come un liquido, se vi si applica una forza di taglio, si induce un gradiente di velocità ed è quindi possibile misurarne la viscosità come il fattore di proporzionalità tra la forza e il gradiente.

Nel campo dello studio delle viscosità di calcestruzzi per applicazioni con slip-form è stato realizzato uno studio dall'Iowa State University intitolato "Self-Consolidating Concrete – Applications for Slip-Form Paving" (Nov 2005) nel quale ci si proponeva di studiare il comportamento e le proprietà reologiche di miscele per calcestruzzi auto-compattanti per slip-form, attraverso viscosimetro Brookfield.

In questo studio sono stati analizzati i parametri reologici di viscosità (η), yield stress (τ_0) e tixotropia al fine di correlarli con la lavorabilità, la consolidazione e la capacità di mantenere la forma del calcestruzzo. Per far ciò la miscela viene sottoposta a un ciclo di carico-scarico realizzato tramite un aumento della velocità di rotazione da 0 a 100 s^{-1} in 60 secondi e successivamente un decremento della stessa da 100 a 0 s^{-1} in 60 secondi: questa storia di carico determina due curve dello sforzo di taglio, una superiore e una inferiore (Figura 2.23). La viscosità viene individuata come la pendenza dalla curva inferiore mentre la tixotropia corrisponde all'area tra la curva superiore e quella inferiore.

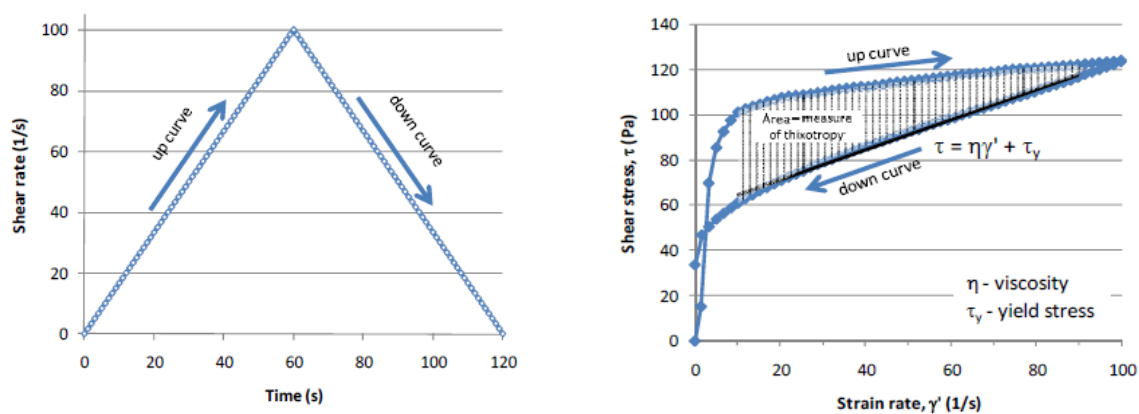


Figura 2.23 Curva di carico e curva di sforzo della miscela di boiaccia.

Le misurazioni vengono ripetute dopo 15 minuti dal primo esperimento. Si evidenzia così come la tixotropia aumenti significativamente con il tempo mentre la viscosità e lo yield stress ne risentano in maniera minore.

Anche nell'ASTM D2196-10: "Standard Test Method for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer" si trovano indicazioni su come svolgere la prova in questione. In questo documento si prescrive di preparare il provino mescolandolo per 10 minuti e lasciandolo riposare almeno un minuto prima di iniziare la prova a una temperatura di 25 °C o comunque ad una temperatura il più possibile costante. La prova consiste nel testare il campione a differenti velocità di rotazione, dalla più bassa alla più alta, ed effettuare poi un ciclo di ritorno diminuendo la velocità di rotazione stessa. Ogni misura deve essere effettuata dopo almeno 10 giri di spindle. La formula per calcolare la viscosità è:

$$V = f \cdot s$$

V viscosità in mPa*s

f fattore di scala fornito dallo strumento, dipendente dal tipo di spindle utilizzato, funzione della consistenza dell'impasto

s valore letto sul viscosimetro in corrispondenza di ciascuna velocità

2.7 Sperimentazioni con mini slip-form

Una ricerca promossa dal U.S. Department of Transportation e dall'Iowa Department of Transportation nel 2005 aveva come obiettivo lo studio del calcestruzzo auto-compattante applicato a pavimentazioni stese con slip-form. La possibilità di avere un calcestruzzo auto-compattante che mantenga la forma dopo l'estrusione permetterebbe di evitare la vibrazione con una notevole riduzione in termini di attenzioni e problemi necessari per questa operazione.



Figura 2.24 Mini slip-form per lo studio del Self-Compacting Concrete – Application for slip-form paving

Lo studio, lungo e complesso, è stato suddiviso in fasi successive. Nella prima fase, dopo lo sviluppo di miscele idonee, si è avviato un set di prove attraverso una mini slip-form con lo scopo di testare l'adeguatezza della miscela di calcestruzzo sia in termini di compattazione che di mantenimento della forma estrusa. Questo prototipo è stato concepito come una scatola a L con un piano superiore per il deposito del materiale; è largo 470 mm, lungo 610 mm, alto 470 mm con uno spessore della lastra da 76 a 152 mm. Per iniziare il getto, il materiale è stato accumulato nel piano superiore e successivamente spinto al di sotto lungo la parete verticale. Il calcestruzzo stesso dava stabilità alla mini slip-form e pressione per la compattazione. L'avanzamento avveniva a velocità di circa 1 metro al minuto.



Figura 2.25 Prova di un calcestruzzo auto-compattante attraverso mini slip-form.

La prima fase della sperimentazione ha dimostrato la possibilità di sviluppo di miscele di calcestruzzo auto-compattante per applicazione con slip-form, aventi grado di compattazione pari a 1,0, slump di circa 20 cm e spandimento su tavola a scosse di circa 30 cm. I risultati delle prove hanno dimostrato come l'aumento di filler e di additivo fluidificante aumentino la classe di consistenza. Le miscele evidenziano una grande stabilità nel mantenimento della forma, influenzata anche dall'aggiunta di loppa all'impasto.

Nella seconda fase invece si è dimostrato che un buon progetto di una miscela di calcestruzzo auto-compattante per slip-form richiede uno spandimento iniziale della malta corrispondente del 10 % e uno spandimento finale dopo 16-18 colpi di $24 \pm 0,5$ cm; il contenuto di aggregati grossi deve consentire uno slump di $18 \pm 2,5$ cm, uno spandimento su tavola a scosse di $30 \pm 2,5$ cm e un grado di compattazione superiore al 95 %. I test effettuati su mini slip-form hanno mostrato un buon grado di finitura, l'effettiva stabilità del profilo e la resistenza prevista. Infine si è riscontrato un incremento consistente della viscosità con l'aumento del filler.

Viene quindi dimostrato come l'utilizzo di calcestruzzo auto-compattante, realizzabile senza particolari accorgimenti in un normale impianto di betonaggio, possa facilitare la stesa delle pavimentazioni ed avere un minor impatto ambientale. I costi più ingenti di queste miscele, però, sono dovuti al maggiore uso di materiali cementizi, additivi e aggiunte pozzolaniche.

Simili indicazioni e prescrizioni vengono riproposte anche in *Guidelines for Design, testing, production and construction of semi-flowable SCC for slip-form paving*.

CAPITOLO 3

I materiali

3.1 Aggregati

Gli aggregati sono sostanze minerali con particelle di forma e dimensione adatte alla produzione del calcestruzzo. Possono essere naturali, artificiali o riciclati e costituiscono una frazione rilevante del calcestruzzo; tra i principali vantaggi del loro impiego va annoverato il risparmio economico dovuto ad un minor utilizzo di leganti cui conseguono vantaggi tecnologici quali: minor sviluppo del calore di idratazione, minor ritiro della pasta cementizia e minori deformazioni viscosse. Gli aggregati, inoltre, hanno un ruolo determinante sul comportamento del calcestruzzo fresco e su molte proprietà del calcestruzzo indurito.

Oltre alla classificazione legata all'origine (naturali/non naturali), si ha un'ulteriore classificazione determinante tra aggregati naturali arrotondati (tipicamente di origine alluvionale) e aggregati naturali frantumati, cioè provenienti dalla frantumazione della roccia. Gli aggregati devono inoltre essere certificati dal produttore in base all'indice di appiattimento (UNI EN 933-3) oppure all'indice di forma (UNI EN 933-4). Infatti aggregati di forma arrotondata o spigolosa oppure particolarmente allungati e piatti influenzano notevolmente la lavorabilità dell'impasto e la resistenza finale. Anche la tessitura superficiale dell'aggregato condiziona tali caratteristiche, infatti la rugosità influisce sull'aderenza tra matrice e aggregati. Generalmente la scelta della cava di provenienza dell'aggregato naturale è dettata prevalentemente da ragioni economiche legate alla prossimità territoriale della cava di approvvigionamento; in casi particolari possono essere selezionati e prescritti aggregati la cui provenienza non sia economicamente la più vantaggiosa, ma le cui caratteristiche siano le più idonee in funzione dei requisiti finali del conglomerato cementizio quali: elevate resistenze meccaniche, resistenza all'usura, specifici requisiti estetici, ecc.

Vista l'abbondante disponibilità nel nord Italia di aggregato tondeggianti di origine alluvionale, si è scelta tale tipologia per le prove sperimentali.

La dimensione di un aggregato viene specificata entro un intervallo d/D , dove d è la dimensione minima e D quella massima. Sono definiti aggregati fini o sabbie gli aggregati

con dimensione $D \leq 4$ mm e aggregati grossi quelli con dimensione $D \geq 4$ mm (UNI EN 12620:2013 parti 3.7, 3.8, 3.9). Si è approvvigionato l'aggregato nelle tre frazioni granulometriche: sabbia vagliata 0/2, sabbia 0/8 e ghiaietto 8/20 di cui si riportano le relative curve granulometriche.

SABBIA VAGLIATA 0/2	
setaccio	% passante
63	100,0
31,5	100,0
25	100,0
22,4	100,0
20	100,0
16	100,0
14	100,0
12,5	100,0
10	100,0
8	100,0
6,3	100,0
4	100,0
2	99,0
1	95,0
0,500	67,0
0,250	15,0
0,125	2,0
0,063	1,6

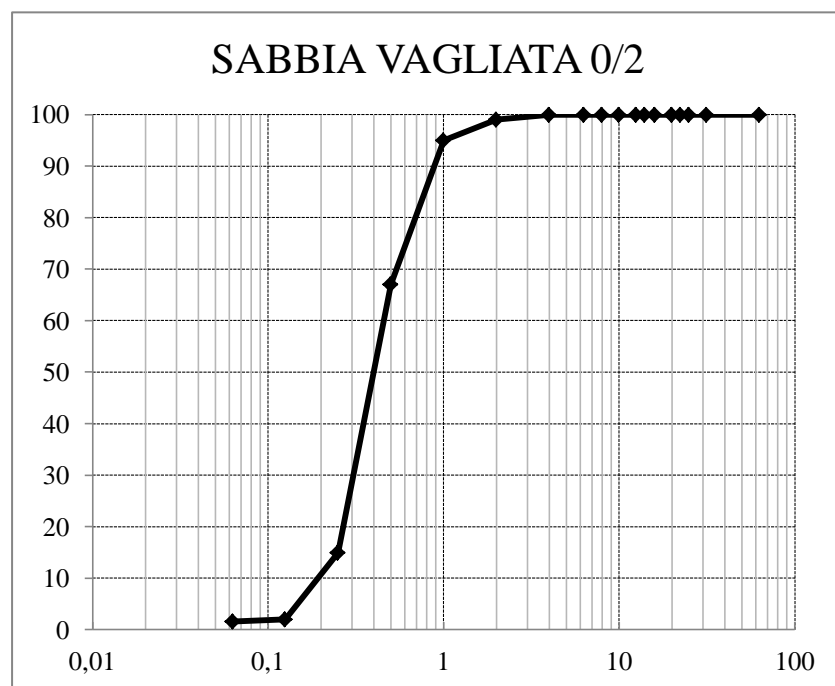


Grafico 3.1 Curva granulometrica della sabbia vagliata 0/2.



Figura 3.1 Sabbia vagliata 0/2

SABBIA 0/8	
setaccio	% passante
63	100,0
31,5	100,0
25	100,0
22,4	100,0
20	100,0
16	100,0
14	100,0
12,5	100,0
10	100,0
8	97,0
6,3	92,0
4	78,0
2	58,0
1	40,0
0,500	26,0
0,250	13,0
0,125	7,0
0,063	3,6

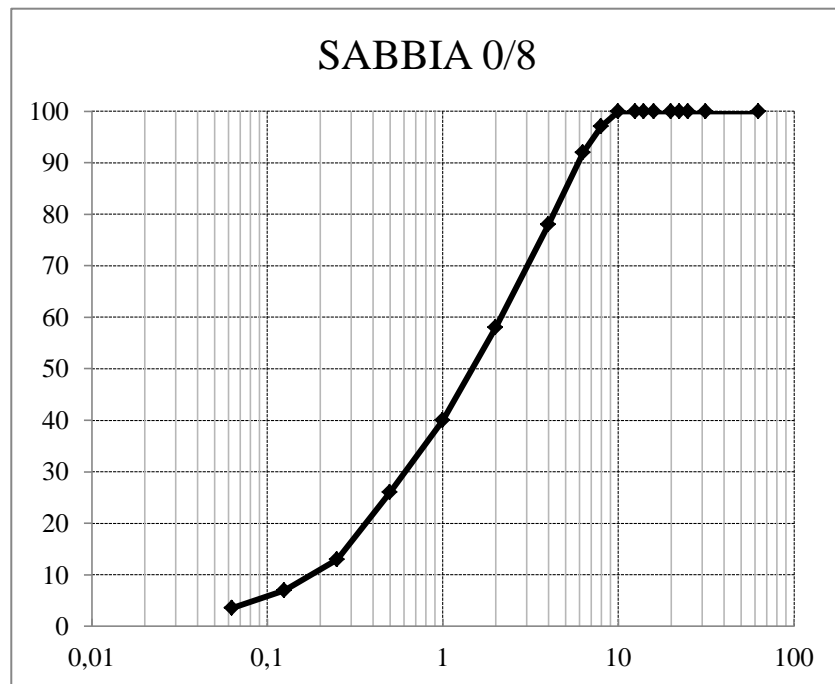


Grafico 3.2 Curva granulometrica della sabbia 0/8.



Figura 3.2 Sabbia 0/8.

GHIAIETTO 8/20	
setaccio	% passante
63	100,0
31,5	100,0
25	100,0
22,4	100,0
20	100,0
16	81,0
14	62,0
12,5	44,0
10	16,0
8	4,0
6,3	2,0
4	0,9
2	0,7
1	0,6
0,500	0,5
0,250	0,5
0,125	0,5
0,063	0,4

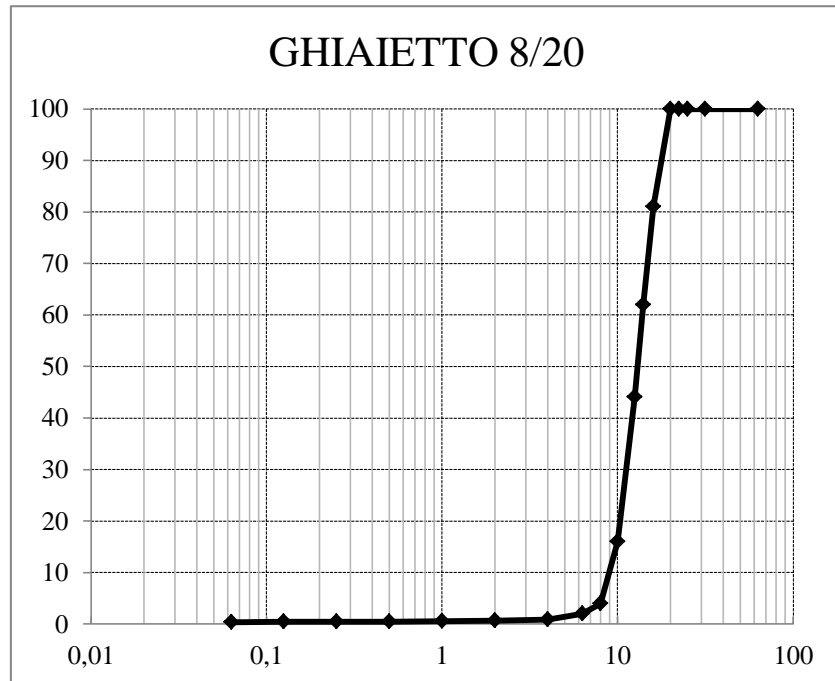


Grafico 3.3 Curva granulometrica del ghiaietto 8/20.



Figura 3.3 Ghiaietto 8/20.

La dimensione massima dell'aggregato, pari a 20 mm, è conforme alle prescrizioni dell'ETL 97-5 che suggerisce pari a 19 mm la dimensione massima dell'aggregato in caso di condizioni meteorologiche "severe" ovvero quando il calcestruzzo è ripetutamente soggetto a cicli di gelo/disgelo ed alla azione di agenti chimici disgelanti in condizione di saturazione, quali quelle a cui può essere sottoposta la pavimentazione di un piazzale aeroportuale del nord Italia nel periodo invernale.

Per la valutazione del contenuto di fini, la normativa UNI EN 8520-2:2005 prescrive il limite della percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm in funzione del tipo di aggregato.

Limiti ammissibili per il contenuto in polveri

Tipo di aggregato		Categoria
Aggregato grosso	Non frantumato o frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_{1,5}$
	Frantumato da roccia	$\leq f_{4,0}$
Aggregato fine (sabbia)	Non frantumato	$\leq f_{3,0}$
	Frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_{10}$
	Frantumato da roccia	$\leq f_{16}$
Misto naturale 0/8		$\leq f_{3,0}$
Aggregato in frazione unica (misto) 0/D	Non frantumato o frantumato da depositi alluvionali	$\leq f_{3,0}$
	Frantumato da roccia	$\leq f_{11}$

Figura 3.4 Limiti ammissibili per il contenuto in polveri secondo UNI EN 8520-2

Nei casi in cui il contenuto di polveri superi i limiti ammissibili, la norma specifica ulteriori prove volte a verificarne l'accettabilità per l'impiego nei calcestruzzi: per aggregati non frantumati il valore di equivalente in sabbia SE, determinato secondo la UNI EN 933-8, deve essere maggiore o uguale a 80 oppure il valore del blu di metilene, secondo la UNI EN 933-9, deve essere minore o uguale a 1,2 g/kg.

Tra gli aggregati fini utilizzati per le prove sperimentali, la sabbia vagliata 0/2 appartiene alla classe f_3 , la sabbia 0/8 alla classe f_{10} ma con equivalente in sabbia di 83, infine il ghiaietto 8/20 alla classe $f_{1,5}$.

Nella medesima norma si prescrivono i requisiti chimici degli aggregati per calcestruzzi da verificarsi con le certificazioni CE rilasciate dalla cava.

Gli aggregati delle tre frazioni granulometriche adottati per le prove sperimentali sono dichiarati dal cavatore in categoria di contenuto di solfati solubili in acido $AS_{0,2}$; contenuto di zolfo totale < 0,001 %; contenuto di cloruri solubili in acqua di 0,015 %; non pervenuti costituenti che alterano la presa e l'indurimento del calcestruzzo.

Limiti ammissibili per i costituenti chimici

Caratteristica	Limite ammissibile		Metodo di prova
Contenuto di solfati solubili in acido	Per contenuto di solfati solubili in acido $\leq 0,2\%$: nessuna limitazione (categoria $AS_{0,2}$) Per contenuto di solfati solubili in acido $\leq 0,8\%$: accettabile solo per gli aggregati fini (categoria $AS_{0,8}$)		UNI EN 1744-1, punto 12
Contenuto di zolfo totale	Il contenuto totale di zolfo deve essere $\leq 1\%$ in massa per gli aggregati naturali, nel caso di loppe d'altoforno deve essere $\leq 2\%$. Nel caso di presenza di solfuri ossidabili il limite per il tenore in zolfo totale è $0,1\%$.		UNI EN 1744-1, punto 11
Contenuto di cloruri solubili in acqua	Il contenuto totale dei cloruri solubili nel calcestruzzo deve soddisfare i requisiti indicati nella UNI EN 206-1, prospetto 10. Indicativamente il contenuto di cloruri nelle singole frazioni di aggregato deve essere minore di $0,03\%$.		UNI EN 1744-1, punto 7
Costituenti che alterano la presa e l'indurimento del calcestruzzo	Il contenuto di tali materiali deve soddisfare i requisiti del punto 6.4.1 della UNI EN 12620.		UNI EN 1744-1, punto 15.1; 15.2; 15.3
Contenuto di contaminati leggeri	Per calcestruzzi ordinari	aggregati fini $\leq 0,5\%$ aggregati grossi $\leq 0,1\%$	UNI EN 1744-1, punto 14.2.2
	Per calcestruzzi a vista con valenza estetica e pavimentazioni	aggregati fini $\leq 0,25\%$ aggregati grossi $\leq 0,05\%$	

Figura 3.5 Limiti ammissibili per i costituenti chimici contenuti in UNI EN 8520-2

Tra le proprietà fisiche degli aggregati grossi per classe di resistenza $C50/60$, si richiede resistenza alla frammentazione di coefficiente Los Angeles inferiore a LA_{30} (UNI EN 8520-2). Si è scelto di adottare tale classe di resistenza alla frammentazione indipendentemente dalla classe di resistenza del calcestruzzo ai fini di garantire migliori resistenze alla compressione e all'attrito superficiale della pavimentazione. Il ghiaietto utilizzato per le prove sperimentali è dichiarato in classe di resistenza alla frammentazione LA_{25} .

Essendo la superficie della pavimentazione esposta a condizioni metereologiche severe, si richiede un'ottima resistenza al gelo/disgelo degli aggregati grossi, ovvero in classe F_7 secondo UNI EN 12620 determinata mediante norma di prova UNI EN 1367-1. Inoltre secondo UNI EN 12620 si possono considerare gli aggregati resistenti al gelo/disgelo se la classe di assorbimento d'acqua non è superiore a $WA_{24} I$, misurata mediante norma di prova UNI EN 1097-6.

Il ghiaietto utilizzato per le prove sperimentali è dichiarato in classe di resistenza al gelo/disgelo F_7 e in classe di assorbimento $WA_{24} I$ con assorbimento pari a $0,97\%$.

Per il dosaggio delle tre frazioni granulometriche si è optato di rispettare le prescrizioni contenute nelle fonti bibliografiche analizzate nel Capitolo 2 per aggregati destinati a pavimentazioni rigide messe in opera mediante slip-form.

La costruzione della curva granulometrica complessiva degli aggregati, come indicato in ETL 97-5, deriva dall'avvicinamento di *coarseness factor* e *workability factor* alla zona dichiarata ideale per la composizione di materiale steso con slip-form.

$$cf = \frac{48,1}{67,7} \cdot 100 = 71$$

$$wf = 32,8$$

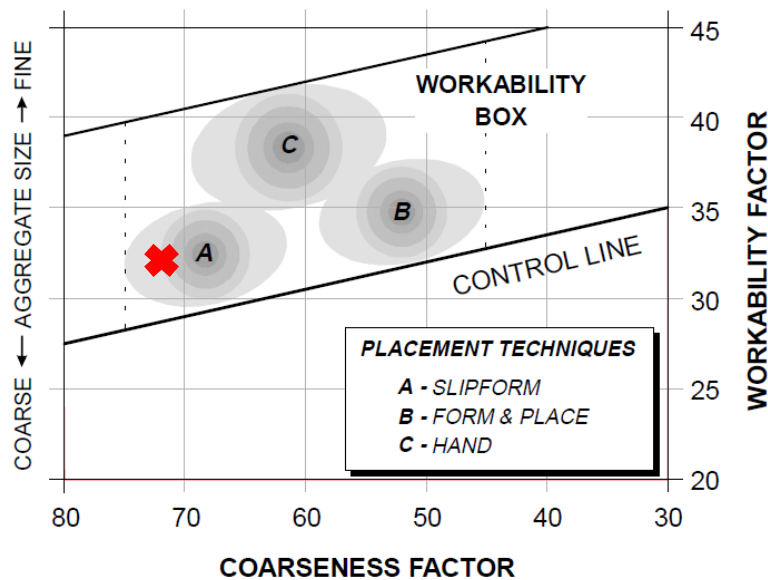


Figura 3.6 Posizionamento della curva cumulata nella workability box secondo ETL 97-5

Si sono raggiunti tali valori di *coarseness factor* e *workability factor* dosando 11 % di sabbia vagliata 0/2, 34 % di sabbia 0/8 e 55 % di ghiaietto 8/20. In questa composizione si ottiene la curva cumulata riportata sotto in figura.

Attraverso le percentuali combinate di aggregato trattenuto si è avuto prova che la curva fosse ben gradata, in particolare non vi sono picchi o valli tra il setaccio 9,5 mm e il setaccio successivo. Tuttavia si rileva come, per garantire la zona A per calcestruzzo lavorabile con slip-form con gli aggregati a disposizione, il quantitativo maggiore di trattenuto sia al setaccio 12,5 mm e che il suo valore superi il 18 % suggerito dall'USACE.

Si è verificato l'ampio rispetto del valore minimo del modulo di finezza per le prescrizioni USAF ($FM \geq 2,35$), calcolato sia con la serie di setacci ASTM che con la serie di setacci UNI come indicato in UNI EN 12620 annesso B.

$$FM_{ASTM} = \frac{48,1 + 60,2 + 67,7 + 74,9 + 81,9 + 91,6 + 96,4}{100} = 5,2$$

$$FM_{UNI} = \frac{62 + 69 + 75,6 + 83,5 + 93,7 + 97,1}{100} = 4,8$$

Le schede tecniche di tutti gli aggregati si trovano in Appendice A.

CURVA CUMULATA	
setaccio	% passante
63	100
31,5	100
25	100
22,4	100
20	100
16	89,55
14	79,1
12,5	69,2
10	53,8
8	46,18
6,3	43,38
4	38,015
2	30,995
1	24,38
0,500	16,485
0,250	6,345
0,125	2,875
0,063	1,62

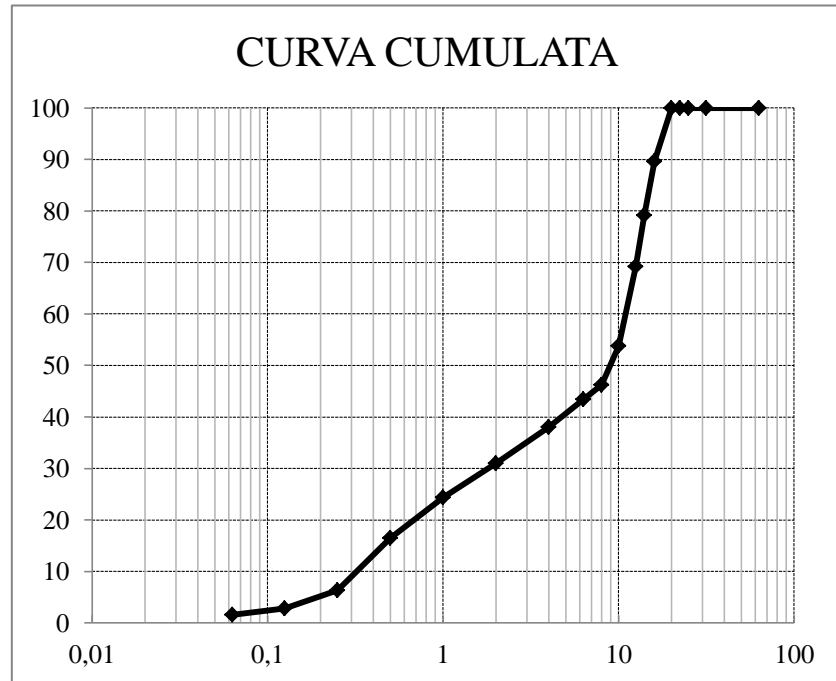


Grafico 3.4 Curva cumulata.

3.2 Cemento

Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che fa presa e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua (UNI EN 197-1). Si definisce “idraulico” perché il processo di indurimento può avvenire anche sotto acqua.

Sempre secondo la medesima normativa europea vengono definiti 27 tipi di cemento diversi in base alla composizione, i quali hanno ciascuno 3 classi di resistenza normalizzata: 32,5, 42,5, 52,5 e due classi di resistenza iniziale: normale (N) e rapida (R).

La scelta del cemento da impiegare è complessa e dipende da molti fattori più o meno importanti. Innanzitutto si valutano le proprietà che il calcestruzzo, una volta indurito, dovrà possedere in termini di resistenze meccaniche e di resistenze all'ambiente di esposizione. Il tipo di cemento influenza inoltre il comportamento del calcestruzzo fresco e nella fase di maturazione. Inoltre, non tutti i 27 tipi di cemento sono disponibili in tutte le zone dell'Europa, così come anche il costo può variare notevolmente tra un cemento e l'altro.

La classe di resistenza a compressione del calcestruzzo adottata è stata *C35/45*, basandosi su esperienze pregresse e sapendo comunque che la dipendenza tra spessore della pavimentazione e classe di resistenza del materiale consente di ritenere valide più soluzioni progettuali.

Come prescritto dall'ETL 97-5 il contenuto minimo di cemento per applicazioni tramite slipform è di 335 kg/m^3 . Si considera poi una generica pavimentazione esposta all'acqua e soggetta a cicli di gelo/disgelo e all'impiego di sali disgelanti, quindi in classe di esposizione *XF4*. Per resistere ai cicli di gelo/disgelo si prescrive, per tale classe di esposizione, un quantitativo minimo di cemento di 340 kg/m^3 e l'impiego di additivo aerante per ottenere un contenuto d'aria del 4% (UNI EN 206) o di 360 kg/m^3 di cemento e l'impiego di additivo aerante per ottenere un contenuto d'aria del 3% (UNI 11104).

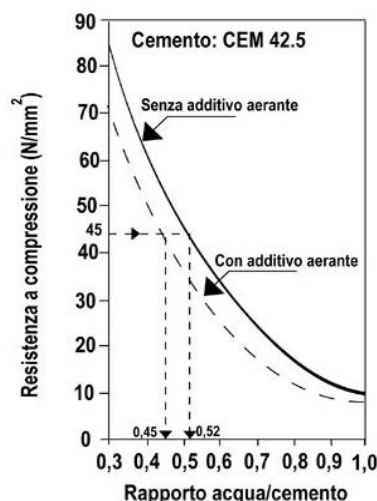


Figura 3.7 Effetto dell'additivo aerante sulla resistenza meccanica (R come Resistenza, Enco Journal, anno VI n. 16).

Valutando la classe di resistenza richiesta, il massimo rapporto acqua/cemento richiesto dalla classe di esposizione *XF4* e la penalizzazione sulle resistenze dovuta all'additivo aerante, si è optato per un cemento in classe di resistenza 42,5 in quantità di 390 kg/m^3 .

È stato poi considerato il metodo di stesa mediante slip-form che, estrudendo lastre già dotate di tutte le finiture (finite), consente tempi rapidi di esecuzione delle opere e la conseguente apertura al traffico in tempi brevi. Dovendo inoltre sfruttare la resistenza della lastra per il taglio dei giunti di dilatazione il giorno stesso della stesa e per la posa della lastra adiacente, si preferisce optare per una classe di resistenza rapida (R) in modo da evitare fessurazioni non controllate ancora in fase di cantiere. Per tutto il set di prove sperimentali si è adottato quindi il cemento CEM II/A-LL 42,5 R, ritenuto idoneo a soddisfare i requisiti di resistenza imposti. (Figura 3.8).



Figura 3.8 Cemento utilizzato nella sperimentazione

3.3 *Gli additivi e le fibre*

Gli additivi chimici aggiunti durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo servono per migliorare le proprietà della miscela nello stato fresco e/o indurito. Il loro dosaggio si esprime solitamente come percentuale rispetto alla massa di cemento ed è limitato, salvo alcuni casi, a quantità relativamente piccole ($\leq 5\%$ sul cemento).

Gli additivi chimici che si possono utilizzare nelle miscele di calcestruzzi da stendere con slip-form sono: aeranti, ritardanti di presa, acceleranti, fluidificanti e super-fluidificanti.

Nel caso in esame si sono utilizzati solamente un additivo superfluidificante ed uno aerante, necessario in quanto si è definita una classe climatica di esposizione “severa”. Non si è ritenuto necessario l’utilizzo di ritardanti, utilizzati per condizioni di stesa particolarmente calde o per lunghe distanze di trasporto, né di acceleranti, che garantiscono un rapido sviluppo delle resistenze nel breve periodo.

Ai fini dell’ottenimento di una adeguata lavorabilità, nonostante il basso rapporto acqua/cemento è stato utilizzato un additivo superfluidificante con funzione disperdente-viscosizzante. L’additivo riduttore d’acqua previene il fenomeno di flocculazione dei granuli di cemento e consente una migliore dispersione del cemento in acqua perché viene adsorbito dalle particelle di cemento, che risultano quindi frapposte da sostanze organiche in grado anche di generare una repulsione elettrostatica. Tra le varie famiglie dei riduttori d’acqua è stato utilizzato un superfluidificante a base di polimeri policarbossilici.

Il superfluidificante impiegato per tutte le prove sperimentali possedeva anche la funzione di anti-ritiro (Shrinkage-Reducing Admixture) e di ritenzione di acqua, funzionalità valida sia ai fini del contenimento del ritiro che del mantenimento di lavorabilità. Gli additivi SRA consentono di ridurre l’effetto del ritiro igrometrico del calcestruzzo provocato dalla perdita d’acqua in fase di stagionatura. Le tensioni di trazione, così evitate, causerebbero infatti microfessurazioni dannose per la durabilità del getto in condizioni di esercizio.

Per la resistenza ai cicli di gelo/disgelo del calcestruzzo si è impiegato l’additivo aerante, che favorisce la formazione di microbolle d’aria del diametro compreso tra 50 e 400 μm opportunamente distanziate. L’aria inglobata evita l’insorgenza di pressioni troppo elevate fornendo micro-cavità di espansione per i cristalli di ghiaccio. Questo additivo tensioattivo a base di acidi resinici saponificati stabilizza il contenuto d’aria ed equidistanza le microbolle impedendo la loro coalescenza. La presenza di questo additivo favorisce la lavorabilità dell’impasto e riduce effetti di segregazione e di bleeding; tuttavia penalizza le resistenze meccaniche e ciò deve essere considerato in fase di mix design. Per la valutazione del quantitativo di additivo si è fatto riferimento alle norme italiane UNI EN 206 e UNI 11104, che prescrivono di garantire un contenuto d’aria compreso tra il 3% e il 4%, nonostante le ricerche americane (ETL 97-5) indicassero valori superiori in corrispondenza della stessa classe di esposizione e della stessa dimensione massima dell’aggregato.



Figura 3.9 Additivo superfluidificante (a sinistra) e additivo aerante (a destra)

L'aggiunta di fibre all'impasto consente il miglioramento delle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito. Si sono utilizzate micro-fibre in polipropilene fibrillato di 6 mm (Figura 3.10) che incrementano la tixotropia della miscela garantendo la stabilità dei profili estrusi mediante slip-form e riducono le fessurazioni allo stato plastico. Inoltre, a calcestruzzo indurito, la fibra aumenta la resilienza all'impatto, ovvero la capacità del materiale di assorbire energia di deformazione elastica, e la resistenza all'abrasione, caratteristiche importanti per l'impiego su superfici aperte al traffico di veicoli e/o aeromobili.

Le schede tecniche delle fibre e degli additivi si trovano in Appendice A.



Figura 3.10 Fibre in polipropilene fibrillato di 6 mm

3.4 Mix design del calcestruzzo

Il mix design o “progetto della miscela” è il procedimento scientifico che consente il calcolo della composizione del calcestruzzo in funzione delle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e delle caratteristiche delle materie prime disponibili.

Ai mix design delle miscele da utilizzare con casseforme scorrevoli sono richieste le seguenti caratteristiche:

- Lavorabilità adeguata
- Istantanea capacità del calcestruzzo di auto-sostenersi a seguito l’estrusione
- Finitura superficiale idonea
- Soddisfacimento delle resistenze richieste

Il mix design si basa su alcune relazioni sperimentali che permettono di giungere alla composizione finale teorica con i dosaggi espressi in kg/m^3 , necessari appunto per il proporzionamento di 1000 litri di calcestruzzo.

La regola di Lyse consente di formulare un quantitativo d’acqua al m^3 in funzione della dimensione massima dell’aggregato alluvionale o di frantumazione e della classe di consistenza ricavata dal cono di Abrams.

Diametro massimo (mm)	Richiesta d’acqua (kg/m^3) per classe di consistenza				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Nota: I valori di acqua di impasto vanno ridotti di 10 kg/m^3 per inerti alluvionali tondeggianti ed aumentati di 10 kg/m^3 per inerti di frantumazione.

Tabella 3.1 Richiesta di acqua in funzione del diametro massimo dell’aggregato e della classe di consistenza (Collepari, Il nuovo calcestruzzo)

Dal rapporto acqua/cemento, scelto per ottenere una determinata resistenza meccanica e per la classe di esposizione, si ricava il dosaggio di cemento.

Noti il contenuto d'acqua e di cemento al metro cubo, compresi i volumi degli eventuali additivi, si ricava per differenza la quantità degli aggregati necessaria a completare il volume di progetto di 1000 litri. Conoscendo le masse volumiche degli aggregati, dosati anche in più frazioni granulometriche, si ricava la loro massa. È importante però conoscere la percentuale di assorbimento e le condizioni di umidità dell'inerte: nel mix design esso viene generalmente considerato nella condizione di saturo a superficie asciutta (s.s.a.); nelle condizioni operative di un impianto di betonaggio l'aggregato possiede generalmente umidità in eccesso che sarà quindi necessario scontare dal dosaggio dell'acqua efficace. Sarà poi necessario compensare la massa totale di aggregato in funzione della quantità di acqua aggiunta.

Si dovrà infine calcolare la massa volumica teorica del calcestruzzo progettato avendo cura di considerare la percentuale di aria che rimane intrappolata nella mescolazione e nella fase di getto e dell'aria inglobata per effetto dell'additivo aerante.

CARATTERISTICHE DELLA MISCELA										SELEZIONE PARAMETRI											
Classe di Resistenza	Consistenza	D _{max} inerte	Classi Esposizione		Cloruri	Acqua	A/C	Cem	A/C ₀₀₃	H ₂ O AD	A/L										
C35/45	S1	20	XF4		...	152	0,39	AUTO	0,390	NO	0,390										
CARATTERISTICHE E DOSAGGI DEI COMPONENTI																					
AD01	Superfluidificante				Dos.	0,50%	in peso	M. V.	1,060	kg/lt	T. S.	Dos m ³	1,95	lt	kg H ₂ O						
AD02					Dos.	0,00%	in peso	M. V.	0,000	kg/lt	T. S.	Dos m ³	0,00	0,00	0,00						
AD03	Fibre Strutturali				Dos.	0,0	kg/mc	M. V.	1,300	kg/lt	T. S.	Dos m ³	0,00	0,00	0,00						
AD04	Fibre PPE				Dos.	1,0	kg/mc	M. V.	0,310	kg/lt	T. S.	Dos m ³	1,00	1,10	0,00						
AD05	Aerante			Aria Inc	2,5%	Dos.	0,12%	in peso	M. V.	1,030	kg/lt	T. S.	Dos m ³	0,47	0,45	0,00					
AP01*					Dos.	0	kg/mc	M. V.	0,000	kg/lt		Dos m ³	0	0,0	kg A/C						
AP02					Dos.	0	kg/mc	M. V.	0,000	kg/lt		Dos m ³	0	0,0	kg A/C						
CE01	Cemento	CEM III/A-LL	42,5R	ITALCEMENTI	Dos.	390	kg/mc	M. V.	3,10	kg/lt		Dos m ³	390	126	-						
Volume disponibile Aggregati		684	litri	Aria Occlusa	1,0%	Dmax:	20	%P1	AG SSA	UR%	H ₂ O ec	AG non SSA	Massa AG ssa	1825							
AG01	Sabbia 0/2	Cava F.lli Testa		M. V.	2,67	Ass. %	1,2%	11%	201	4,0%	5,6	206	AG+CE+AP	2215							
AG02	Sabbia 0/8	Cava F.lli Testa		M. V.	2,67	Ass. %	1,2%	34%	621	4,9%	22,7	643	AG	17,6%	0,0%						
AG03	Gh.tto 8/20	Cava F.lli Testa		M. V.	2,67	Ass. %	1,0%	55%	1004	0,0%	-9,9	994	6	17,6%	0,0%						
AG04		Cava		M. V.	0,00	Ass. %	0,0%	0%	0	0,0%	0,0	0	Fini ≤ 0,125mm	Rapp.							
AG05		Cava		M. V.	0,00	Ass. %	0,0%	0%	0	0,0%	0,0	0	kg/mc	%	AG/CE						
AG06		Cava		M. V.	0,00	Ass. %	0,0%	0%	0	0,0%	0,0	0	442	20,0	4,68						
CURVE GRANULOMETRICHE										RICETTA SPERIMENTALE											
										1,0 m ³ A/C = 0,39											
Aggreg	AG01	AG02	AG03	AG04	AG05	AG06	Realità	Riferim.	Realità	Bolton	Cubica	AGGREGATI S.S.A.		NON S.S.A.							
%P1	11%	34%	55%	0%	0%	0%						Massa kg	Volume lt	Massa kg							
%P2	9%	28%	45%	0%	0%	0%						Acqua efficace A ₀	152	152	134						
												H ₂ O Ass% aggregati	-	-	19,7						
												H ₂ O da UR aggregati	-	-	18,3						
63	100,0	100,0	100,0				100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	CEM III/A-LL 42,5R ITALCE	390	126	390						
31,5	100,0	100,0	100,0				100,0	98,6	100,0	100,0	100,0	AG01 Sabbia 0/2	201	75	206						
25	100,0	100,0	100,0				100,0		100,0	100,0	100,0	AG02 Sabbia 0/8	621	232	643						
22,4	100,0	100,0	100,0				100,0		100,0	100,0	100,0	AG03 Gh.tto 8/20	1004	376	994						
20	100,0	100,0	100,0				100,0		100,0	100,0	100,0	AG04	0	0	0						
16	100,0	100,0	81,0				89,6	66,9	91,4	90,1	92,8	AG05	0	0	0						
14	100,0	100,0	62,0				79,1		82,8	84,6	88,8	AG06	0	0	0						
12,5	100,0	100,0	44,0				69,2		74,6	80,3	85,5		0	0	0						
10	100,0	100,0	16,0				53,8		61,9	72,5	79,4		1,95	1,84	1,95						
8	100,0	97,0	4,0				46,2	43,1	55,7	65,5	73,7		0	0	0						
6,3	100,0	92,0	2,0				43,4		53,3	58,8	68,0		0	0	0						
4	100,0	78,0	0,9				38,0	28,3	48,9	48,0	58,5		1,00	1,10	1,00						
2	99,0	58,0	0,7				31,0	21,4	43,1	35,7	46,4		0,47	0,45	0,47						
1	95,0	40,0	0,6				24,4	17,4	37,7	27,0	36,8		0	0	0						
0,500	67,0	26,0	0,5				16,5	14,4	31,2	20,9	29,2		0	0	0						
0,250	15,0	13,0	0,5				6,3	7,3	22,8	16,5	23,2	Aria Occlusa	-	10	-						
0,125	2,0	7,0	0,5				2,9	2,7	20,0	13,4	18,4	Aria Inglobata	-	25	-						
0,063	1,6	3,6	0,4				1,6	1,5	18,9	11,3	14,7	TOTALI	2371	1000	2371						

Figura 3.11 Mix design e ricetta finale

CAPITOLO 4

Cassero sperimentale

4.1 Sperimentazione

Per condurre la sperimentazione di miscele di calcestruzzo adatte alla stesa di pavimentazioni mediante slip-form si è scelto di costruire una macchina sperimentale che potesse simulare una slip-form ma con dimensioni ridotte. Si è pertanto progettato e costruito una cassaforma scorrevole a cui ci si riferirà, da qui in poi, con il termine di “cassero sperimentale”.

Le ragioni primarie per cui si è giunti a questa scelta sono di natura economica e ambientale. Si è ritenuto infatti necessario ridurre gli oneri di una lunga sperimentazione su slip-form in dimensioni reali. Non solo i costi del materiale e della manodopera, ma anche lo spazio e lo smaltimento di molto materiale avrebbero reso la ricerca insostenibile. Tuttavia, sarebbe necessaria la messa in opera delle miscele di calcestruzzo testate in laboratorio con slip-form reale in modo da avere conferma della effettiva affidabilità dei risultati ottenuti. Il compromesso consiste nella riduzione delle dimensioni (test in scala) e nella semplificazione della macchina così da produrre risultati che nessuna altra prova avrebbe permesso.



Figura 4.1 Slip-form in dimensioni reali (a sinistra), mini slip-form da precedenti ricerche (a destra).

Come introdotto nel Capitolo 2, una sperimentazione realizzata nel 2005 e promossa dal Dipartimento dei Trasporti (USDOT) degli Stati Uniti e dall'Università dello Stato dell'Iowa sul calcestruzzo auto-compattante per slip-form aveva già utilizzato una mini slip-form in legno per la validazione dei risultati ottenuti. Oltre questo prototipo, di piccole dimensioni, sono poche le altre ricerche nel mondo che abbiano utilizzato uno strumento simile per sperimentazioni sistematiche volte a delineare tutti i fattori in gioco e a definire dei parametri di progetto per la miscela.

Un set di prove completo condotte con il cassero sperimentale può fornire importanti informazioni circa la reologia del calcestruzzo in fase di estrusione. Innanzitutto può facilitare la comprensione di quali siano i parametri che influiscano maggiormente sulla reologia della miscela. In secondo luogo può indicare un intervallo ottimale di lavorabilità del calcestruzzo per la stesa. Tuttavia, trattandosi di un prototipo sperimentale, i test iniziali possono mostrare risultati non affidabili e vi è necessità di verificare in quale modo siano correlabili con la slip-form vera e propria.



Figura 4.2 Il cassero sperimentale.

4.2 Descrizione

Il cassero sperimentale è un macchinario che intende simulare il comportamento della slip-form con dimensioni ridotte e meccanismi di funzionamento molto più semplici, adatti alla sperimentazione. Il cassero è in acciaio verniciato e, oltre alla cassaforma vera e propria comprende anche quattro supporti laterali dotati di ruote che permettono l'avanzamento durante la stesa. Il macchinario, fuori tutto, è largo 175 cm, lungo 205 cm e alto 105 cm.



Figura 4.3 Dimensioni del cassero sperimentale

Il cassero, come la mini slip-form americana già citata, ha una forma a L. Nella parte alta le pareti si allargano notevolmente formando una tramoggia per l'accumulo del materiale. La tramoggia ha il duplice compito di permettere l'accumulo del materiale e di dare stabilità al cassero contrastando la spinta verticale del calcestruzzo sulla cassaforma. La cassaforma, comprensiva di tramoggia, è invece larga 92 cm, lunga 161 cm e alta 104 cm per un volume complessivo di $0,63 \text{ m}^3$. L'altezza della cassaforma può essere ridotta ad 83 cm per un volume complessivo di $0,51 \text{ m}^3$. Nella parte orizzontale il cassero è lungo 100 cm; questa parte fornisce la finitura superficiale alla lastra estrusa. In questa zona sono stati praticati due tagli nella cassaforma per evitare che fenomeni di vuoto possano generare strappi e difficoltà nell'estrusione.

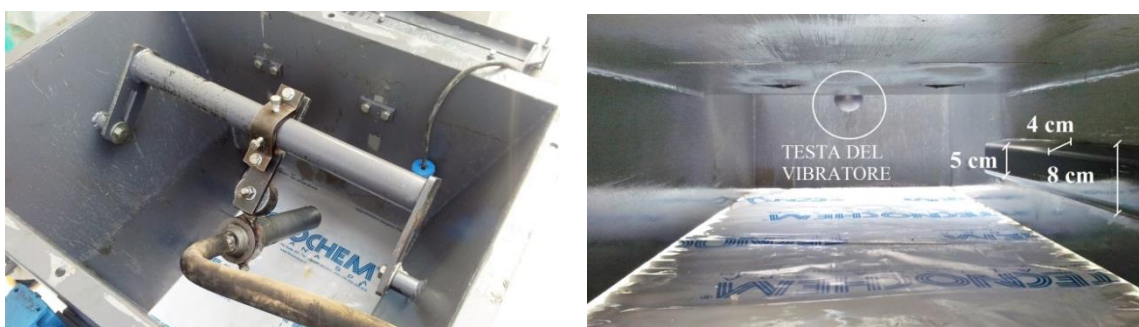


Figura 4.4 Posizione del vibratore e profilo del giunto

La sezione della lastra estrusa è larga 60 cm e alta 25 cm. In uno dei due lati il cassero è sagomato per la formazione del giunto, di dimensioni maggiori della media dei giunti reali. Questa conformazione ha lo scopo di mostrare se la miscela possa essere adatta o meno alla formazione e alla tenuta del giunto in confronto a lati senza giunti. Il profilo del giunto ha altezza da 50 a 80 mm e profondità di 37 mm.

Alla testa della macchina è posto un verricello che tira in avanzamento il cassero e permette la regolazione della velocità di estrusione. La velocità media di avanzamento di una slip-form è di circa 1 m/min; tale valore è stato mantenuto costante durante la sperimentazione.

Infine all'interno della tramoggia è stato agganciato un vibratore di diametro 66 mm e 12000 vpm (200 Hz). Il vibratore, in posizione inclinata di circa 30° sull'orizzontale, sporge al di sotto del bordo superiore della lastra di estrusione di poco più di 3/4 del diametro della testa. Questa posizione è stata suggerita dai tecnici specializzati che hanno prodotto il cassero sperimentale. Anche in questo caso si è ritenuto di avviare questa prima fase di sperimentazione senza variare tale posizione.



Figura 4.5 Verricello per l'avanzamento del cassero sperimentale.

4.3 Fattore di scala

La dimensione del prototipo rispetto alla slip-form reale è parso fin da subito un aspetto cruciale per l'obiettivo delle sperimentazioni. Il problema del fattore di scala non riguardava infatti solo le dimensioni di realizzazione della macchina, ma anche il rapporto tra le dimensioni della macchina e quella degli altri oggetti. Per esempio, per mantenere le proporzioni, il vibratore non può essere utilizzato nelle dimensioni originali e la sua frequenza e ampiezza di vibrazione non possono essere le stesse se il cassero sperimentale è molto piccolo e la pavimentazione è riprodotta in miniatura. Anche lo stesso calcestruzzo potrebbe essere influenzato dalle dimensioni massime dell'aggregato in funzione delle dimensioni della lastra, del vibratore o della macchina. Insomma il fattore di scala potrebbe influenzare i risultati della sperimentazione al punto da non rendere compatibili i risultati ottenuti con l'applicazione in scala reale su slip-form.

La scelta è stata quella di ridurre le dimensioni del cassero sperimentale al punto tale da minimizzare le dimensioni della macchina e semplificarne la struttura e l'utilizzo, ma non al punto da variare il fattore di scala. In pratica il cassero sperimentale realizza una sezione di una pavimentazione reale di spessore minimo, ma plausibile. La macchina rappresenta la realtà riproducendo un solo "modulo" di quelli che, affiancati l'uno all'altro, andranno a costituire la larghezza desiderata della pavimentazione. Nella sua struttura il cassero sperimentale riproduce, in dimensione quasi reale, tutti gli elementi contenuti nella slip-form. Anche le dimensioni, la frequenza e l'ampiezza di vibrazione risultano quindi essere in scala reale. Questa riduzione permette una semplificazione per cui il motore diventa un verricello manuale e una batteria di 22 o più vibratori si riduce ad un solo vibratore.

Se invece si fosse introdotto un fattore di scala sarebbe stato necessario ricavarne il valore validando il modello con slip-form reale e adeguare tutte le dimensioni in gioco. Questo passaggio avrebbe potuto inficiare alcuni risultati e rendere ancora più lunga e complessa la fase di sperimentazione.

Nonostante, a livello teorico, la lastra rappresenti in scala reale la sezione di una classica pavimentazione stesa con slip-form, non si può escludere che la distanza di soli 60 cm delle pareti laterali del cassero sperimentale possa indurre effetti di bordo impreveduti. Per essere certi di poter escludere tali effetti sarebbe necessario, anche in questo caso, un confronto tra la messa in opera con cassero sperimentale e con slip-form.

4.4 Approvvigionamento del materiale e funzionamento

Nella pratica di cantiere la slip-form viene approvvigionata con calcestruzzo mediante autocarro a cassone ribaltabile proveniente dalla centrale di betonaggio. Il calcestruzzo viene scaricato in testa alla slip-form ed eventualmente distribuito con escavatore gommato. Nel cassero sperimentale, invece, il materiale viene direttamente versato nella tramoggia. Essendo il cassero sperimentale una “sezione” di una lastra in dimensione reale sorge il problema di dover garantire l’approvvigionamento di una certa quantità di calcestruzzo.



Figura 4.6 Approvvigionamento di calcestruzzo alla slip-form in cantiere.

Per valutare la qualità della stesa su una lunghezza di almeno 2 metri lineari è necessario gettare circa 6 metri lineari, considerando che il primo metro e l’ultimo risentano dell’avvio delle operazioni di getto e della fine delle operazioni di getto. Per ogni getto quindi, tenuto conto di una sezione di 60 cm x 25 cm e di una lunghezza di 6 metri, sono necessari circa 0,9 m³ di calcestruzzo.

La quantità necessaria è eccessiva per una betoniera a bicchiere da laboratorio, ma troppo poca per il carico di una autobetoniera dall’impianto di betonaggio. Si è quindi pensato di effettuare più stese con una betoniera a mezzo carico variando opportunamente la miscela attraverso delle aggiunte tra una stesa e la successiva.

Posizionato il cassero sperimentale e agganciato il cavo metallico del verricello, si deve controllare l'altezza della cassaforma rispetto al suolo. I supporti metallici con le ruote infatti posseggono un meccanismo di regolazione dell'altezza della cassaforma che deve essere sollevata in tutti i punti di alcuni millimetri dal suolo in modo tale da scorrere senza lasciar fuoriuscire il calcestruzzo. La messa a terra di una bindella o la disegnatrice al suolo di traguardi a distanza regolare permettono all'operatore addetto al verricello di mantenere una velocità costante.

Durante la stesa il cassero sperimentale e l'autobetoniera procedono sfalsati in modo da tenere allineati la tramoggia del cassero sperimentale con lo scivolo di scarico del calcestruzzo. L'operatore dell'autobetoniera deve scaricare il materiale in modo da tenere costantemente piena la tramoggia durante l'avanzamento del cassero.

L'avvio del cassero tramite il verricello deve avvenire solo quando la tramoggia è riempita di calcestruzzo e proseguire a velocità costante di 1 m/min fino all'esaurimento del materiale. Nella fase iniziale, nonostante la tramoggia sia riempita di calcestruzzo, ancora non vi è riempimento di materiale nella parte orizzontale del cassero. Questo tratto di circa 1 metro non può essere valutato. Il tratto finale della stesa, che si realizza da quando si interrompe il rifornimento di materiale a quando esso si esaurisce, è da considerarsi non valutabile per l'assenza delle condizioni ottimali di stesa. Anche questo tratto è lungo circa 1 metro.

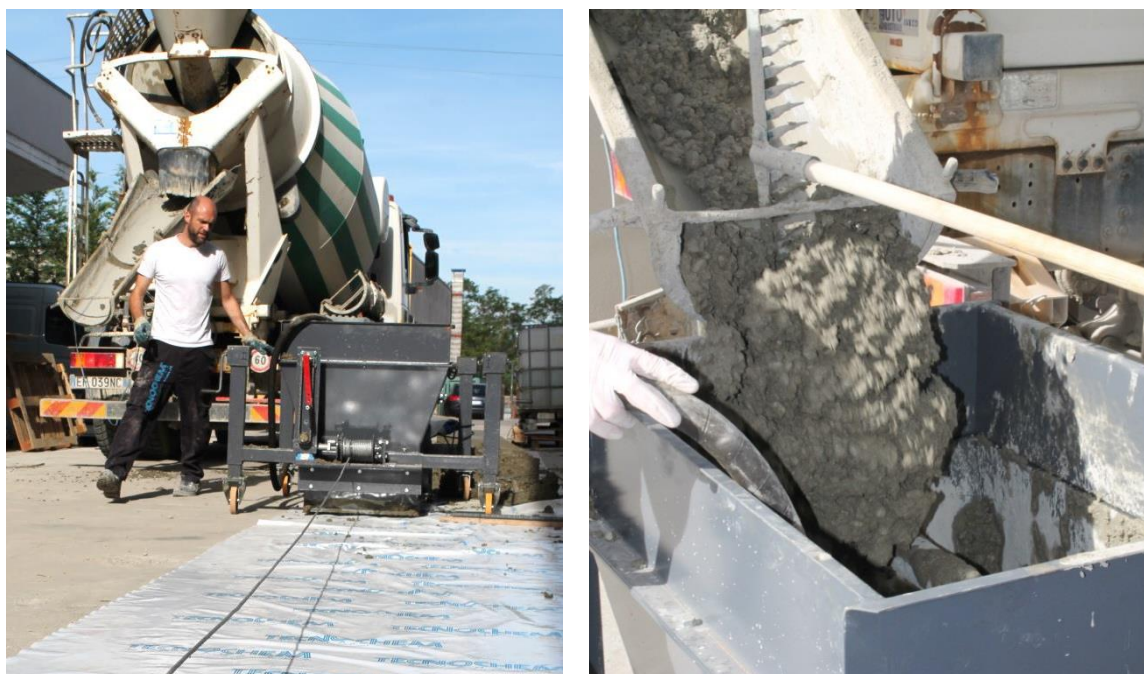


Figura 4.7 Approvvigionamento di calcestruzzo al cassero sperimentale da autobetoniera.

4.5 Vibrazione

La vibrazione del calcestruzzo è un aspetto che per il cassero sperimentale non può essere tralasciato. Come già spiegato il cassero sperimentale rappresenta una porzione della realtà per cui l'intensità della vibrazione deve essere uguale a quella fornita al calcestruzzo dalla slip-form. L'energia fornita dalla vibrazione al calcestruzzo deve essere tale da esprimersi anche nel cassero sperimentale con la costipazione e la finitura della lastra indotta dalla pressione sulle pareti della cassaforma. Avendo il profilo della lastra un giunto molto pronunciato, esso permetterà di verificare non solo la qualità della miscela di calcestruzzo, ma anche l'effetto della vibrazione sulla finitura e la stabilità del profilo.

In questa fase iniziale è stato inserito un solo vibratore di diametro 66 mm e frequenza 12000 vpm (200 Hz). L'area di influenza è circa dieci volte il diametro del vibratore cioè 66 cm oppure manuale ACI (Tabella 2.4) di 72 cm. L'area di influenza è quindi teoricamente sufficiente a coprire la sezione del cassero, tuttavia l'intensità di vibrazione a bordo cassero risulta nettamente inferiore rispetto alla zona centrale. Come riportato nel Capito 2, l'accelerazione di vibrazione decresce esponenzialmente con la distanza dal vibratore, pertanto potrebbe non essere sufficiente a garantire la costipazione e/o la finitura dei profili laterali. Infatti, per ottenere una sovrapposizione delle aree di influenza come indicato nel manuale Wirtgen, dovrebbero essere utilizzati, per le dimensioni cassero sperimentale, due vibratori. Nonostante ciò, si è deciso in questa prima fase di testare un solo vibratore senza variarne le caratteristiche tecniche, in modo da osservare la sua efficacia sulla compattazione e la finitura.



Figura 4.8 Vibrazione del calcestruzzo in fase di getto.

4.6 Finitura della lastra

La finitura della lastra estrusa è garantita dalle sole pareti del cassero lunghe circa 1 metro nella parte orizzontale e si realizza per mezzo della pressione di costipamento del calcestruzzo nel cassero data dal vibratore e dall'avanzamento stesso del macchinario, che permette uno scorrimento relativo tra le pareti e la lastra lisciandone la superficie. Non è quindi possibile escludere che calcestruzzi stesi con cassero sperimentale aventi finitura discreta non possano risultare comunque idonei alla stesa con slip-form. Questa macchina, infatti, come spiegato nel Capitolo 2, perfeziona la finitura attraverso una trave oscillante ed un pannello di lisciatura. Quando il calcestruzzo è ancora allo stato plastico, si procede ad imprimere una tessitura sulla superficie. Questo procedimento consente di garantire un risultato finale comunque soddisfacente, anche a fronte delle piccole variazioni reologiche del calcestruzzo che possono verificarsi in cantiere. Il cassero sperimentale, non dotato di tutto questo apparato di finitura, consente solo di rilevare l'effettiva qualità della miscela di calcestruzzo in termini di chiusura dei vuoti superficiali.



Figura 4.9 Finitura superficiale della lastra stesa con cassero sperimentale.

CAPITOLO 5

Piano sperimentale

Il piano sperimentale elaborato consiste nello studio di diversi parametri relativi a differenti impasti di boiacche, malte, calcestruzzi freschi e induriti e calcestruzzi stesi con cassero sperimentale al fine di individuare una miscela corrispondente all'ottimo per l'utilizzo in questo tipo di lavorazioni. Il programma delle prove è riportato in Appendice B.

5.1 Parametri di indagine

Si sono individuati dei parametri di indagine che influiscono sulla reologia del calcestruzzo. Essi sono il rapporto acqua/cemento e la quantità di additivo superfluidificante. Per i calcestruzzi, si è mantenuto costante il contenuto di cemento, pari a 390 kg/m^3 . Si sono progettate le miscele in modo da costituire una matrice in funzione dei parametri variati in ciascun impasto. Si sono realizzate quindi delle serie "acqua/cemento" in cui il quantitativo di superfluidificante è rimasto invariato (rispettivamente 0,9 % e 1,1 %) e sono stati invece via via incrementati di 3 punti percentuali i rapporti acqua/cemento a partire da 0,30 fino a 0,42. Sono state inoltre testate tre serie "superfluidificante" nelle quali si è mantenuto invariato il rapporto acqua/cemento, rispettivamente 0,33, 0,36, 0,39, e sono stati incrementati di due punti percentuali i quantitativi di superfluidificante a partire da 0,5% fino all'1,1%. L'intervallo di variazione del valore dei rapporti acqua/cemento è stato scelto tenendo conto che: per valori di a/c inferiori a 0,30 (a parità di contenuto di cemento), il calcestruzzo presenta caratteristiche tali da non permettere un adeguato grado di coesione e compattazione; la normativa UNI EN 206 prescrive un rapporto non superiore a 0,45 per calcestruzzi in classe di esposizione XF; è comunque consigliato da ETL 97-5 un rapporto inferiore a 0,45 se la messa in opera avviene mediante slip-form. L'intervallo di variazione dell'additivo è stato scelto basandosi su indicazioni del produttore suscettibili di variazione, avendo cura di effettuare dei test iniziali sia su impasti di laboratorio che con il cassero sperimentale così da verificarne l'idoneità. Infatti la reattività di ciascun additivo è diversa a seconda degli altri componenti della miscela, ad esempio del tipo di cemento utilizzato. In ciascuna serie

rimangono costanti il quantitativo di additivo aerante pari allo 0,12%, valutato mediante impasti di prova come il quantitativo idoneo allo sviluppo del 3% di aria come consigliato da UNI 11104 per classe di esposizione XF, e i quantitativi di fibre, aggregati e cemento.

Prima di gettare in opera il calcestruzzo con il cassero sperimentale in laboratorio sono state testate diverse miscele sia per individuare in quali intervalli fosse più opportuno variare i parametri della ricerca, sia per verificare le indicazioni del produttore riguardo gli additivi. Ai fini della sperimentazione non si ritiene significativo riportare i dati e i risultati riferiti a questi impasti utilizzati per calibrare i valori da assegnare al rapporto acqua/cemento e al dosaggio di additivo, se non quelli relativi al calcestruzzo avente rapporto acqua/cemento pari a 0,33 e additivo superfluidificante pari allo 0,9% (Calcestruzzo di prova).

In funzione alla maggiore o minore quantità di acqua di impasto, si riscontra una minima variazione del contenuto totale degli aggregati (il proporzionamento del mix design è sempre impostato su un volume totale di 1000 litri).

		SUPERFLUIDIFICANTE			
		0,5 %	0,7 %	0,9 %	1,1 %
A/C	0,30	-	-	Impasto 3	-
	0,33	Impasto10	Impasto11	Impasto 8	Impasto12
	0,36	Impasto 4	Impasto 5	Impasto 1	Impasto 6
	0,39	Impasto13	Impasto14	Impasto 2	Impasto15
	0,42	-	-	Impasto 9	Impasto16

Tabella 5.1 Impasti di boiacche e malte realizzati in laboratorio con le rispettive denominazioni.

		SUPERFLUIDIFICANTE			
		0,5 %	0,7 %	0,9 %	1,1 %
A/C	0,36	18	17	1A/19	3A/20
	0,39	16	2A/21	1B/22	3B/23
	0,42	-	-	1C	3C

Tabella 5.2 Impasti di calcestruzzo stesi con il cassero sperimentale e realizzati in laboratorio.

Percorrendo la Tabella 5.1. per righe è possibile individuare le serie “superfluidificante” mentre muovendosi per colonne quelle “acqua/cemento”; è stato inoltre attribuito un codice numerico ad ogni impasto con quantitativi specifici e differenti di additivo superfluidificante e rapporto acqua/cemento. La ricetta di ciascun impasto è riportata in Appendice D. Osservando la Tabella 5.1 e la Tabella 5.2 si nota che alcuni impasti di calcestruzzo non sono stati realizzati. Infatti quelli con rapporti acqua/cemento più bassi presentano una reologia del calcestruzzo tale da non permetterne nemmeno l’impiego con il cassero sperimentale. Invece tra gli impasti con rapporto acqua/cemento pari a 0,42, poichè possiedono reologia opposta ai precedenti e scarsa possibilità di raggiungere a maturazione la classe di resistenza richiesta, sono stati realizzati soltanto quelli utili al completamento delle serie di stese col cassero

sperimentale, ai fini di ricerca. Per valutare il comportamento di un calcestruzzo così asciutto, sono state realizzate sia prove in laboratorio (serie superfluidificante) che in sito, dopo il trasporto dalla centrale di betonaggio, prima della stesa con il cassero sperimentale (serie acqua/cemento). Confrontando i risultati ottenuti sarà possibile riscontrare l'eventuale differenza di comportamento e tenerne conto nelle considerazioni successive. Si riportano a titolo esemplificativo i procedimenti di mix design di una boiaccia, una malta e un calcestruzzo.

Mix design del calcestruzzo

Si prende in esame la miscela numero 22 e si sceglie il rapporto acqua/cemento di 0,39, che teoricamente soddisfa la classe di resistenza C35/45.

Come già esposto nel Capitolo 3, il primo passaggio nel mix design del calcestruzzo è la valutazione del quantitativo d'acqua necessario fornito dalla regola di Lyse, noti la dimensione massima dell'aggregato e la classe di consistenza. In questo caso, con una dimensione massima dell'inerte di 20 mm e una classe di consistenza S1, il valore corrisponde a 180 litri. Con questo quantitativo di acqua servirebbero 462 kg/m^3 di cemento.

Per ridurre il quantitativo di cemento necessario a 390 kg/m^3 e quindi 152 litri di acqua si introduce un additivo superfluidificante (SF) con dosaggio allo 0,9 % sulla massa di cemento.

Dal quantitativo di cemento viene calcolata la quantità di additivo in kg/m^3 :

$$SF = 0,9 \% \cdot 390 \text{ kg/m}^3 = 3,51 \text{ kg/m}^3$$

Nota la massa volumica del superfluidificante pari a 1,06 kg/l si ricava il volume di additivo in l/m^3 :

$$SF = \frac{3,51 \text{ kg/m}^3}{1,06 \text{ kg/l}} = 3,31 \text{ l/m}^3$$

Allo stesso modo per l'additivo aerante (AE) si calcola la quantità in kg/m^3 :

$$AE = 0,12 \% \cdot 390 \text{ kg/m}^3 = 0,47 \text{ kg/m}^3$$

Nota la massa volumica dell'aerante di 1,03 kg/l si ricava il volume di additivo in l/m^3 :

$$AE = \frac{0,47 \text{ kg/m}^3}{1,03 \text{ kg/l}} = 0,45 \text{ l/m}^3$$

Il dosaggio di fibre anti-ritiro in polipropilene viene determinato direttamente in massa ed è stato posto pari a 1 kg/m^3 . Conoscendo la massa volumica di 0,910 kg/l si ricava il volume:

$$V_{FIBRE} = \frac{1 \text{ kg/m}^3}{0,910 \text{ kg/l}} = 1,1 \text{ l/m}^3$$

È inoltre necessario calcolare il volume di cemento al metro cubo conoscendo la sua massa volumica di 3,1 kg/l:

$$V_{cemento} = \frac{390 \text{ kg/m}^3}{3,1 \text{ kg/l}} = 126 \text{ l/m}^3$$

È possibile a questo punto calcolare il volume disponibile per gli aggregati sottraendo a un metro cubo il volume già occupato da acqua, cemento, additivi e fibre avendo cura di includere nel calcolo sia l'aria inglobata grazie all'additivo aerante, considerata pari al 2,5%, che quella occlusa, stimata pari all'1%.

$$V_{aggregati} = 1000 - 152 - 126 - 3,31 - 0,45 - 1,1 - 1000 \cdot 2,5\% - 1000 \cdot 1\% = 682 \text{ l}$$

Si procede quindi alla costruzione della curva granulometrica degli aggregati secondo le prescrizioni contenute nell'ETL 97-5, come già riportato precedentemente. Ne consegue, in funzione di due parametri, coarseness factor e workability factor, la seguente combinazione delle curve granulometriche disponibili:

- Sabbia vagliata 0/2 → 11%
- Sabbia 0/8 → 34%
- Ghiaietto 8/20 → 55%

Calcolando alcuni valori tramite interpolazione lineare, essendo i setacci UNI e ASTM non sempre coincidenti, il coarseness factor e il workability factor risultano pertanto:

- CF = 71
- WF = 32,8

Noti quindi i valori di massa volumica per aggregato saturo a superficie asciutta, si procede al calcolo della quantità di ciascuna frazione granulometrica come segue:

$$\text{Sabbia } 0/2 = 682 \text{ l} \cdot 11 \% \cdot 2,67 \text{ kg/l} = 200 \text{ kg}$$

$$\text{Sabbia } 0/8 = 682 \text{ l} \cdot 34 \% \cdot 2,67 \text{ kg/l} = 619 \text{ kg}$$

$$\text{Ghiaietto } 8/20 = 682 \text{ l} \cdot 55 \% \cdot 2,67 \text{ kg/l} = 1002 \text{ kg}$$

A questo punto risulta necessario conoscere l'umidità relativa di ciascuna frazione di aggregato. Per far ciò, si utilizza un essiccatore a raggi infrarossi, che misura l'umidità in base alla perdita di peso di un campione essiccato mediante riscaldamento per irraggiamento diretto, utilizzando radiazioni termiche nell'infrarosso di lunghezza d'onda da 2 μm a 3,5 μm, dove con irraggiamento di calore si intende la parte dell'infrarosso compresa nell'intervallo

delle onde medie e corte. Questa radiazione penetra nel materiale e lo riscalda alla base; la quota parte che viene assorbita è quella che non viene né trasmessa né riflessa. La temperatura regolata sull'apparecchio è di 105 °C. La temperatura del campione varia a seconda delle sue caratteristiche (superficie, conducibilità termica e colore) e può essere uguale o diversa da quella di regolazione. Il principio di funzionamento si basa sul fatto che alla lunghezza d'onda di funzionamento del macchinario, le molecole d' acqua presentano un assorbimento molto pronunciato, per cui si riscaldano ed evaporano. Il peso umido, corrispondente alla massa iniziale, viene posto uguale al 100% e si calcola il tasso di umidità come sua percentuale attraverso la formula:

$$U = \frac{\text{peso umidità}}{\text{peso a umido}} \cdot 100\%$$

Anche le modalità di preparazione del campione risultano importanti ai fini del corretto svolgimento della prova; questo deve infatti essere regolarmente e uniformemente distribuito sulla vaschetta, altrimenti una parte della radiazione incidente infrarossa viene riflessa dal fondo lucido della vaschetta e il campione, avendo una ridotta superficie di esposizione, assorbe poca energia termica, causando un essiccamento stentato o incompleto. Il principale vantaggio nell'utilizzo di questo metodo rispetto al tradizionale essiccamento in stufa è un grande risparmio di tempo nell'ottenimento dei risultati.



Figura 5.1 Essiccatore a raggi infrarossi

Nota l'umidità relativa di ciascuna frazione, e conoscendone l'assorbimento, è possibile risalire al dosaggio di aggregato non saturo a superficie asciutta con la seguente formula:

$$AG_{nonSSA} = AG_{SSA} \cdot \frac{100 + UR \cdot 100}{100 + ass \cdot 100}$$

e al quantitativo di acqua in eccesso come differenza dei dosaggi di aggregati non SSA e SSA

Si ha quindi:

Frazione	M.V. SSA [kg/lt]	Dosaggio %	Agg. SSA [kg]	Assorbimento %	Umidità Relativa %	AG non SSA [kg]	H ₂ O ecc [kg]
Sabbia 0/2	2,67	11 %	200	1,2 %	4,0 %	206	6
sabbia 0/8	2,67	34 %	619	1,2 %	4,9 %	642	23
Ghiaietto 8/20	2,67	55 %	1002	1,0 %	0,0 %	992	-10

Successivamente si calcola l'acqua efficace, ovvero quella da introdurre nell'impasto, tenendo in considerazione l'acqua assorbita dagli aggregati e quella derivante dalla loro umidità in eccesso:

$$A_{efficace} = 152 - (6 + 23 - 10) = 133 \text{ kg}$$

Infine è utile calcolare la massa volumica teorica dell'impasto di calcestruzzo per poter controllare, durante la realizzazione della miscela, l'effettiva correttezza sia del mix design che dell'impasto effettivamente realizzato.

$$M.V._{CLS} = 133 + 390 + 206 + 642 + 992 + 3,51 + 1 + 0,47 = 2369 \text{ kg/m}^3$$

Tutte le quantità considerate in questo procedimento sono riferite al metro cubo di impasto. Per realizzare quantità diverse è sufficiente moltiplicare ciascun dosaggio per il rapporto desiderato.

Mix design della boiaccia

La boiaccia è un impasto fluido contenente cemento, acqua e additivi, quali, nel caso in esame, superfluidificante e aerante. Partendo dal volume di boiaccia che si vuole realizzare, noto il rapporto acqua/cemento e la massa volumica del cemento di 3,10 kg/l, si procede attraverso i seguenti passaggi:

$$V = \frac{\text{cemento}}{m.v._{\text{cemento}}} + \frac{\text{cemento} \cdot \text{acqua/cemento}}{m.v._{\text{acqua}}}$$

da cui, con la formula inversa, si ricava il quantitativo di cemento necessario:

$$cemento = \frac{V}{\frac{1}{m.v.cemento} + \frac{acqua/cemento}{m.v.acqua}}$$

$$acqua = cemento \cdot \frac{acqua}{cemento}$$

Stabiliti la quantità di cemento e i dosaggi di additivi si calcolano anche le quantità di additivi:

$$superfluidificante = dosaggio\ superfluidificante\ \% \cdot cemento$$

$$aerante = dosaggio\ aerante\ \% \cdot cemento$$

Mix design della malta

La malta è un conglomerato cementizio formato da cemento, acqua, additivi liquidi e aggregati fini 0/4.

Per ciascun rapporto acqua/cemento e dosaggio di additivo superfluidificante è stata realizzata una malta con lo stesso rapporto tra cemento e sabbia dei calcestruzzi. Sommando la massa di sabbia 0/2 e di sabbia 0/8 nella percentuale (78 %) inferiore a 4 mm e dividendo per la massa del cemento si è trovato un rapporto di circa $1,8 \pm 0,02$. Si è scelto di approssimare fissando il rapporto a 1,8 per tutti i mix.

Partendo dal volume di malta che si vuole realizzare, noti il rapporto acqua/cemento, la massa volumica del cemento di 3,10 kg/l, il rapporto aggregati/cemento e la massa volumica degli aggregati, si procede attraverso i seguenti passaggi:

$$V = \frac{cemento}{m.v.cemento} + \frac{cemento \cdot \frac{acqua}{cemento}}{m.v.acqua} + \frac{cemento \cdot \frac{aggregati}{cemento}}{m.v.aggregati}$$

da cui, con la formula inversa, si ricava il quantitativo di cemento necessario:

$$cemento = \frac{V}{\frac{1}{m.v.cemento} + \frac{acqua/cemento}{m.v.acqua} + \frac{aggregati/cemento}{m.v.aggregati}}$$

$$acqua = cemento \cdot \frac{acqua}{cemento}$$

$$aggregati_1 = cemento \cdot \frac{aggregati}{cemento}$$

Fino a questo punto però gli aggregati sono stati considerati saturi a superficie asciutta, ovvero nella condizione per cui tutta l'acqua che sarà aggiunta andrà ad idratare il cemento. Per poter operare meglio la setacciatura della sabbia 0/8 al setaccio 4 mm gli aggregati sono stati essiccati completamente. Per compensare l'acqua che imbibirà gli aggregati anziché idratare il cemento il dosaggio dell'acqua prima calcolato è stato incrementato nel modo seguente:

$$acqua = acqua + aggregati_1 \cdot \% \text{ assorbimento}$$

Per mantenere costante il volume e quindi corretto il mix design si è ridotta la quantità di aggregati di un volume corrispondente alla massa d'acqua aggiunta:

$$aggregati_2 = aggregati_1 - \frac{aggregati_1 \cdot \% \text{ assorbimento}}{m.v._{acqua}} \cdot m.v._{aggregati}$$

Stabiliti la quantità di cemento e i dosaggi di additivi si calcolano anche le quantità di additivi:

$$superfluidificante = dosaggio \text{ superfluidificante } \% \cdot cemento$$

$$aerante = dosaggio \text{ aerante } \% \cdot cemento$$

5.2 Prove sul calcestruzzo fresco

Comprendere le proprietà reologiche del calcestruzzo fresco è fondamentale per individuare i parametri che possano garantire l'ottimale messa in opera mediante slip-form. Per verificare l'adeguatezza dell'impasto per questo tipo di applicazioni vengono eseguite tre prove di consistenza oltre alla misura della massa volumica, del contenuto d'aria e del contenuto d'acqua.

Prova di abbassamento al cono di Abrams

Il cono di Abrams serve a determinare la consistenza del calcestruzzo fresco, confezionato con aggregati di dimensione massima non maggiore di 40 mm, attraverso la misurazione dell'abbassamento al cono con valori compresi tra 10 mm e 210 mm.

Il principio di funzionamento della prova è di grande semplicità e rapidità; il calcestruzzo fresco viene compattato in uno stampo a forma di tronco di cono e, quando questo viene sfilato verso l'alto, si misura l'abbassamento del campione rispetto all'altezza del cono; a seconda del valore di abbassamento viene individuata la classe di consistenza del calcestruzzo. La procedura di prova è descritta nella norma UNI EN 12350-2.



Figura 5.2 Prova di consistenza mediante abbassamento al cono di Abrams secondo UNI EN 12350-2.

La norma UNI EN 206-1 raggruppa gli abbassamenti al cono in cinque classi di consistenza riportate in seguito:

Classe di consistenza	Abbassamento al cono (mm)
S1	da 10 a 40
S2	da 50 a 90
S3	da 100 a 150
S4	da 160 a 210
S5	≥ 200

Tabella 5.3 Classi di consistenza mediante abbassamento al cono di Abrams secondo UNI EN 206-1

La prova del cono può essere utilizzata per verificare che la consistenza sia conforme a quanto specificato dal progettista o dall'impresa oppure per confrontare impasti successivi di composizione simile usati per uno stesso progetto.

Prova di spandimento su tavola a scosse

La prova su tavola a scosse determina lo spandimento del calcestruzzo fresco misurando la deformazione che subisce una data forma di calcestruzzo soggetta a sollecitazione meccanica e fornisce un'indicazione sulle classi di consistenza e sulla tendenza alla segregazione degli impasti. La procedura di prove è descritta nella norma UNI EN 12350-5.



Figura 5.3 Prova di spandimento su tavola a scosse secondo UNI EN 12350-5.

La norma UNI EN 206-1 determina sei classi di consistenza relative ai valori di spandimento:

Classe di consistenza	Diametro spandimento in mm
F1	≤ 340
F2	da 350 a 410
F3	da 420 a 480
F4	da 490 a 550
F5	da 560 a 620
F6	≥ 630

Tabella 5.4 Classi di consistenza mediante spandimento su tavola a scosse secondo UNI EN 206-1.

Indice di compattabilità

La prova di compattabilità è un metodo atto a determinare la consistenza del calcestruzzo fresco misurando il grado di compattazione a seguito dell'applicazione di una vibrazione. Essa viene effettuata riempiendo interamente un contenitore e compattandone il contenuto

fino ad assestamento; il valore medio della distanza tra il bordo superiore del contenitore e la superficie dell'impasto consente di valutare l'indice di compattabilità come segue:

$$c = \frac{h - s}{h}$$

h altezza interna del contenitore

s valor medio della distanza tra il bordo superiore del contenitore e la superficie dell'impasto

La procedura di prova è descritta nella norma UNI EN 12350-4.



Figura 5.4 Prova di compattabilità secondo UNI EN 12350-4.

Mediante la misura della compattabilità, la UNI EN 206-1 definisce quattro classi di consistenza, riportate in tabella:

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

Tabella 5.5 Classe di consistenza per compattabilità secondo UNI EN 206-1.

Massa volumica del calcestruzzo fresco

La prova consente di determinare sia in laboratorio che in cantiere la massa volumica del calcestruzzo fresco compattato e può essere utilizzata come controllo di conformità a quanto previsto dal progetto. Essa si effettua determinando la massa di calcestruzzo costipato in un contenitore di volume noto. È possibile raggiungere la compattazione del calcestruzzo attraverso l'utilizzo dei seguenti dispositivi vibranti:

- Ago vibrante: è necessario evitare eccessive vibrazioni che potrebbero provocare la perdita di aria inglobata. Si inserisce l'ago verticalmente in modo da non toccare il fondo e i lati del contenitore.
- Barra di costipazione o pestello: è necessario distribuire i colpi in modo uniforme sulla sezione trasversale e assicurarsi che la barra o il pestello non penetrino in modo significativo nello strato sottostante
- Tavola vibrante

La massa volumica si ottiene dalla formula:

$$m. v. = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

m_1 massa del contenitore vuoto espressa in kg

m_2 massa del contenitore riempito con calcestruzzo compattato espressa in kg

V volume del contenitore espresso in m^3

La procedura di prova è descritta nella norma UNI EN 12350-6.

È opportuno che la massa volumica determinata attraverso questa prova non si discosti eccessivamente da quella di progetto.

Contenuto d'aria – Metodo per pressione manometrico

La prova consente di determinare il contenuto d'aria del calcestruzzo fresco compattato e può essere utilizzato per verificare l'effettivo contenuto d'aria della miscela. Viene utilizzato il metodo per pressione manometrico che equalizza un dato volume d'aria a pressione nota in un contenitore sigillato al volume d'aria sconosciuto presente nel campione.

L'apparecchiatura utilizzata comprende:

- misuratore di pressione
- mezzi per la compattazione del calcestruzzo a scelta tra:
 - Tavola vibrante
 - Ago vibrante
 - Pestello o barra di costipazione
- siringa per iniezione di acqua nel contenitore tramite valvole

La procedura della prova è descritta nella norma UNI EN 12350-7.



Figura 5.5 Apparecchiatura per la misura del contenuto d'aria

Determinazione del contenuto d'acqua

Attraverso la prova di bruciatura è possibile conoscere il dosaggio dell'acqua nel calcestruzzo fresco, determinandone la variazione di massa, riferita a quella iniziale, in seguito a un rapido riscaldamento. Attraverso la conoscenza della quantità di aggregati secchi, del loro assorbimento d'acqua e della quantità di cemento è inoltre possibile risalire al rapporto acqua/cemento della miscela, al fine di verificarne la composizione. Per poter descrivere questa prova è utile fornire le seguenti definizioni:

- Contenuto d'acqua totale: acqua aggiunta più l'acqua già contenuta nell'aggregato e sulla superficie dell'aggregato più l'acqua degli additivi e delle aggiunte usate in forma di sospensione e l'acqua derivante da un'eventuale aggiunta di ghiaccio o da riscaldamento mediante vapore.
- Contenuto d'acqua efficace: differenza tra l'acqua totale presente nel calcestruzzo fresco e l'acqua assorbita dagli aggregati.
- Rapporto acqua/cemento: rapporto in massa tra il contenuto d'acqua efficace e il contenuto di cemento nel calcestruzzo fresco.

La quantità d'acqua totale contenuta nel campione iniziale è espressa dalla seguente formula:

$$m_w = m_u - m_s \text{ [kg]}$$

m_u massa del campione prima dell'essiccazione

m_s massa del campione dopo l'essiccazione

Il contenuto totale d'acqua espresso in termini percentuali rispetto alla massa del calcestruzzo è dato dalla formula:

$$m_w \% = \frac{m_w}{m_{cls}} \cdot 100$$

Il dosaggio di acqua totale, che corrisponde al contenuto d'acqua totale rispetto al volume di calcestruzzo, si calcola con la seguente formula:

$$D_w = \frac{m_w}{V_{cls}} = \frac{m_w}{m_u} \cdot \rho_{cls}$$

Il rapporto acqua/cemento viene calcolato con la seguente espressione:

$$a/c = \frac{D_w}{D_c}$$

D_w quantità d'acqua efficace in kg/m^3 , ottenuta come differenza tra il dosaggio di acqua totale e il dosaggio di acqua assorbita dall'aggregato

D_c dosaggio del cemento in kg/m^3

La procedura di prova è descritta nella norma UNI 11201.



Figura 5.6 Determinazione del contenuto d'acqua mediante bruciatura secondo UNI 11201.

5.3 Prove sul calcestruzzo indurito

La valutazione delle caratteristiche fisico/meccaniche del calcestruzzo indurito è importante tanto quanto il comportamento del calcestruzzo fresco. Nonostante tali proprietà siano facilmente controllabili è opportuno verificare che le scelte di mix design per garantire una certa reologia del calcestruzzo non ne alterino le resistenze.

Massa volumica del calcestruzzo indurito

La prova consente di determinare sia in laboratorio che in cantiere la massa volumica del calcestruzzo indurito. È applicabile a calcestruzzi leggeri, normali, elevati, a malte e a boiacche. Il caso in esame prende in considerazione calcestruzzi, malte e boiacche saturi d'acqua. I provini vengono conservati in acqua per tutto il periodo di maturazione.

La massa volumica si ottiene dalla formula:

$$m.v. = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

m massa del provino in kg

V volume del provino in m³

La procedura di prova è descritta dalla norma UNI EN 12390-7.

Prova di resistenza a compressione

La resistenza meccanica è il massimo sforzo che un materiale, in una forma geometrica determinata, è in grado di sopportare prima della rottura. La prova consiste in un metodo per determinare la resistenza alla compressione dei provini di calcestruzzo indurito caricandoli fino a rottura in una macchina per prova di compressione.



Figura 5.7 Prova di resistenza a compressione su cubi secondo UNI EN 12390-4.

L'apparecchiatura utilizzata consiste in una pressa motorizzata per prove di compressione con misura elettronica digitale computerizzata con portata massima di 3000 kN conforme alla norma UNI EN 12390 -4. Nel caso in esame si utilizza una velocità di carico di 0,6 Mpa/s conforme alla normativa vigente che prescrive che questa sia compresa tra $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Il carico applicato al provino viene incrementato in modo continuo alla velocità prestabilita, fino a rottura.

È necessario che i provini siano conformi alle norme UNI EN 12350-1, 12390-1, 12390-2 e 12504-1. Nel caso in esame questi sono cubi di lato 15 cm o carote di diametro 10 cm e altezza 20 cm. La stagionatura si effettua conservando i provini in acqua a 20 °C fino al momento della prova.



Figura 5.8 Maturazione dei provini in acqua secondo UNI EN 12390-2

La resistenza alla compressione è data, per provini cubici, dall'equazione:

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

e per provini cilindrici dall'equazione:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

F carico massimo a rottura espresso in N

A_c area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza di compressione mm^2

Da normativa NTC 2008, per confrontare la resistenza cubica con quella cilindrica è possibile utilizzare la seguente formula:

$$f_c = 0,83 \cdot R_c$$

La differenza tra f_c e R_c dipende sostanzialmente dal fatto che, nel sollecitare provini cilindrici snelli (rapporto $h/D = 2$) si instaura una sollecitazione effettiva maggiore di quella che si registra per provini cubici più “tozzi” (altezza = larghezza).

La procedura di prova è descritta nella norma UNI EN 12390-3

Prove ultrasoniche

Gli ultrasuoni sono vibrazioni acustiche caratterizzate da frequenze comprese tra i 0,5 MHz e i 15 MHz; le onde ultrasonore sono originate da moti oscillatori delle molecole del mezzo in cui si propagano e sono soggette a riflessione e rifrazione sulla superficie di separazione di due mezzi con differente impedenza acustica e a diffrazione e diffusione all'interno del materiale. La propagazione delle onde dipende dal mezzo in esame: infatti nei solidi può avvenire tramite onde longitudinali, trasversali, superficiali e di Lamb mentre nei liquidi e nei gas avviene solo attraverso onde longitudinali.

Le prove ad ultrasuoni si eseguono nell'ambito dei controlli non distruttivi e consentono di ricavare la velocità di propagazione degli impulsi delle onde longitudinali ultrasoniche nel calcestruzzo indurito, che viene utilizzata per numerose applicazioni. Esse sono infatti attualmente considerate importanti mezzi di supporto per le indagini su omogeneità del calcestruzzo, difetti di getto, modulo elastico dinamico, coefficiente di Poisson dinamico, stima della resistenza e variazione delle proprietà del calcestruzzo. La velocità di propagazione degli impulsi dipende infatti dalle caratteristiche elastiche del mezzo e dalla sua densità nonché dalle disomogeneità presenti. Un'eterogeneità del materiale dà luogo quindi ad un'attenuazione delle onde ultrasoniche, che può essere ricondotta allo sviluppo dei fenomeni di assorbimento e diffusione. Il primo è dovuto allo smorzamento del movimento molecolare con conseguente trasformazione dello stesso in calore. Il secondo è legato alle caratteristiche fisiche del materiale e agisce disperdendo il fascio in più direzioni, producendone attenuazioni lungo l'asse di propagazione.

Il principio di funzionamento della prova consiste nella conversione di un treno di onde longitudinali, generato da un trasduttore elettroacustico tenuto in contatto con la superficie sottoposta alla prova e che attraversa un percorso di lunghezza nota, in un segnale elettrico mediante un secondo trasduttore e dei circuiti di temporizzazione elettronica che consentono di misurare il tempo di transito degli impulsi.

L'apparecchiatura consiste in un generatore di impulsi elettrici, una coppia di trasduttori, un amplificatore e un dispositivo elettronico per la misurazione dell'intervallo di tempo che intercorre tra la partenza di un impulso generato dal trasduttore emittente e il suo arrivo al trasduttore ricevente. Il generatore di impulsi elettrici utilizzato è uno strumento a ultrasuoni tascabile con gamma di misura tra 0 e 3000 μ s e ampiezza dell'impulso ultrasonico regolabile da 250 a 1000 V. La frequenza naturale dei trasduttori deve essere generalmente compresa tra 20 kHz e 150 kHz; lo strumento utilizzato è dotato di due sonde piezometriche con frequenza di vibrazione di 55 kHz. La modalità di acquisizione dei dati prevede che nell'arco di un

secondo vengano effettuate quattro misure verificando che rientrino nel range del dispositivo e che siano coerenti tra di loro.



Figura 5.9 Apparecchiatura per le prove ultrasoniche.

Poiché è possibile rilevare impulsi che attraversano il calcestruzzo in diverse direzioni si possono effettuare misure della velocità di propagazione posizionando i trasduttori su facce opposte (trasmissione diretta), su facce adiacenti (trasmissione semidiretta) o sulla stessa faccia (trasmissione indiretta) di un provino.

Dal momento che gli ultrasuoni vengono fortemente attenuati dall'aria, al fine di garantire un adeguato accoppiamento acustico tra il calcestruzzo e la faccia di ciascun trasduttore si utilizza un mezzo di accoppiamento come vaselina o grasso che viene spalmato sulla superficie del trasduttore che a sua volta viene premuto contro la superficie del calcestruzzo. È opportuno ripetere le letture fino a ottenere un valore minimo, che indica che lo spessore del mezzo di accoppiamento è stato ridotto al minimo.

La velocità di propagazione degli impulsi viene calcolata con la seguente formula:

$$V = \frac{L}{T} \quad [km/s]$$

L Lunghezza del percorso in mm

T Tempo impiegato dall'impulso per attraversare la lunghezza in microsecondi

Per ricavare il modulo elastico (E_0) è possibile utilizzare le seguenti formule:

$$E_0 = \frac{E_d}{1,062}$$

$$E_d = \frac{(1 + \delta) \cdot (1 - 2\delta)}{(1 - \delta)} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot V^2$$

E_d modulo elastico dinamico

δ modulo di Poisson posto uguale a 0,2 secondo NTC 2008

γ peso specifico del calcestruzzo in Kgf

g accelerazione di gravità

La procedura di prova è descritta dalla norma UNI EN 12504-4.

Ai fini di controllo e comparazione della misura del modulo elastico, effettuata mediante ultrasuoni, si è calcolato il modulo elastico, come da normativa, in funzione della resistenza. Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 indicano per il calcolo del modulo elastico in sede di progetto la formula:

$$E_{cm} = 22000 \cdot [f_{cm}/10]^{0,3} \quad [N/mm^2]$$

Invece in *Implementation of the AASHTO Pavement Design Procedures into MULTI-PAVE* si suggerisce per il calcolo del modulo elastico la correlazione dell'American Concrete Institute pari a:

$$E_{cm} = 57000 \cdot (f_{cm})^{0,5} \quad [psi]$$

5.4 Prove su boiacche

Testare le boiacche di ciascun impasto di calcestruzzo significa eliminare molte variabili indotte dalla presenza degli aggregati e dalle fibre e poter utilizzare le sole viscosità e resistenze come parametri descrittivi.

Prova di viscosità

Dalle considerazioni svolte nel Capitolo 2 è possibile dedurre come attraverso la prova di viscosità sia possibile studiare nel tempo la reologia di impasti come le boiacche e come l'aumento o la diminuzione di diversi fattori, nel caso specifico acqua e additivi superfluidificanti, ne modifichino il comportamento. Il fine è quello di ricercare una relazione tra il comportamento della boiacca e la reologia del calcestruzzo corrispondente.

Non avendo a disposizione normative italiane o europee che descrivano questo tipo di prova si è individuato un procedimento ripetibile per ogni tipo di impasto preso in considerazione, basandosi sulle procedure descritte nell'ASTM D2196-10 e nella ricerca americana dell'Iowa State University riportate nel Capitolo 2.

La procedura standardizzata per la prova viene descritta in seguito.

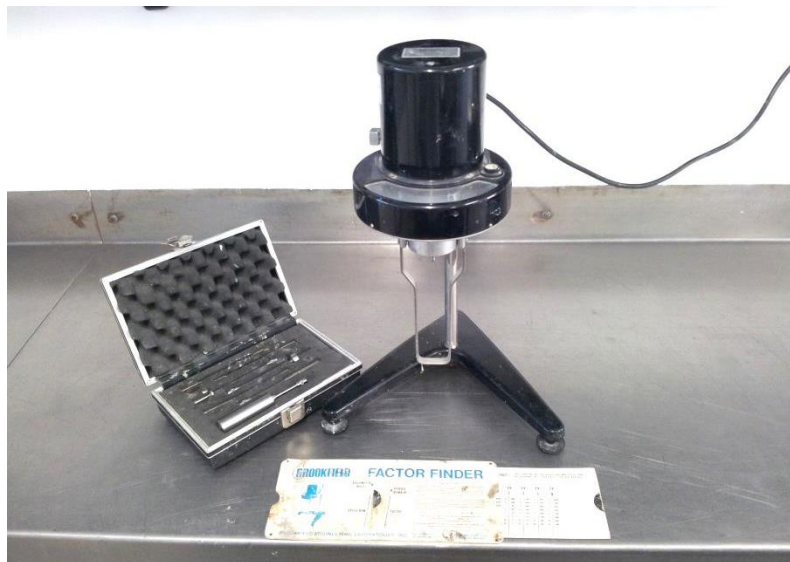


Figura 5.10 Viscosimetro Brookfield con serie di spindle LV e tabella dei fattori di conversione.

La prova viene effettuata su circa 1 litro di boiacca composta da acqua, cemento e additivi. La miscelazione avviene tramite mescolatrice per malta standard come da normativa UNI EN 196-1 con ciclo automatico di mescolamento. Questo ciclo consiste in:

- 30 secondi di mescolamento lento
- 30 secondi di mescolamento lento (per l'immissione della sabbia nel caso di malte)
- 30 secondi di mescolamento veloce
- 90 secondi di pausa
- 60 secondi di mescolamento veloce

	Rotazione min ⁻¹	Moto planetario min ⁻¹
Bassa velocità	140 ± 5	62 ± 5
Alta velocità	285 ± 10	125 ± 10

Tabella 5.6 Velocità di funzionamento della mescolatrice automatica.

Si utilizza un viscosimetro Brookfield che fa ruotare ad una determinata velocità uno spindle immerso nella boiaccia. Si sono utilizzati spindle della serie LV, cercando di garantire che il valore ottenuto si trovi all'incirca nel centro dell'intervallo di misurazione per garantire una maggiore precisione di rilevamento. La regolazione dell'altezza dello spindle è da realizzarsi in modo che la superficie superiore della miscela si trovi in corrispondenza della tacca di riferimento sullo spindle stesso.

Si ritiene opportuno verificare la massa volumica reale per un controllo sulla miscela da testare.

Al tempo 0' (corrispondente a circa 10 minuti dall'inizio della mescolazione) si effettuano tre misurazioni in successione per riprodurre le fasi di carico e scarico realizzate dall'Iowa State University nonché la procedura descritta nell'ASTM D2196-10 per questo tipo di esperimenti:

- viscosità a velocità 30 rpm
- viscosità a velocità 60 rpm
- viscosità a velocità 30 rpm

La lettura della viscosità si effettua per ciascuna misurazione dopo 60 secondi di rotazione dell'apparecchio. Il valore letto è moltiplicato per un coefficiente fornito dal produttore del viscosimetro (Appendice E) fornisce una misura di viscosità in mPa*s. Successivamente si lascia riposare l'impasto per 15 minuti avendo cura di lavare l'apparecchiatura di prova. Durante questo intervallo di tempo si provvede a misurare la temperatura dell'impasto per garantire che la prova si svolga generalmente alla medesima temperatura in modo che quest'ultima non ne influenzi i risultati. Dopo 15 minuti di attesa si effettua nuovamente la prova. Prima di procedere alle misurazioni è necessario mescolare con vigore la boiaccia in modo da omogeneizzarla eliminando eventuali depositi formati nel periodo di riposo. Si ripetono quindi gli stessi rilievi del punto precedente.

Per ciascuna miscela si ottengono sei risultati; si calcola quindi una media per ottenere un valore di viscosità al tempo zero e uno al tempo 15 minuti avendo cura di mediare per primi i risultati a velocità 30 rpm e in secondo luogo effettuare una media tra il risultato ottenuto e quello relativo alla velocità di 60 rpm.

Alla fine della prova si confezionano i provini in uno stampo da tre scomparti orizzontali di sezione 40 mm x 40 mm x 160 mm, riempiendo e compattando in due strati.

Per conoscere la variazione della viscosità nel tempo, con e senza additivo superfluidificante, data dal processo di idratazione del cemento, si è infine ripetuto il ciclo di carico delle prove precedenti ogni 5 minuti per mezz'ora, ogni quarto d'ora successivo fino ad un'ora e poi ogni mezz'ora. La prova è stata eseguita con rapporto acqua/cemento di 0,39

senza superfluidificante e successivamente con lo stesso rapporto acqua/cemento e 0,9 % di additivo superfluidificante.

Massa volumica su boiaccia fresca e indurita

Come per il calcestruzzo la massa volumica della boiaccia fresca può essere utilizzata come controllo di conformità a quanto previsto dal progetto. Essa si effettua pesando successivamente un contenitore, dal volume noto, prima vuoto e poi riempito con boiaccia.

La massa volumica si ottiene dalla formula:

$$m. v. = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

m_1 massa del contenitore vuoto espressa in kg

m_2 massa del contenitore riempito con boiaccia espressa in kg

V volume del contenitore espresso in m^3

La massa volumica della boiaccia indurita viene misurata pesando il provino di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm e dividendo la massa per il volume accuratamente rilevato mediante calibro. È opportuno che la massa volumica non si discosti eccessivamente da quella di progetto.

Resistenze: compressione e flessione

Le prove di resistenza su boiaccie servono a determinarne i valori di resistenza a flessione e compressione. La prova avviene su provini opportunamente stagionati in camera climatica a temperatura di 20 ± 1 °C e umidità non inferiore al 90 % per 24 ore \pm 20 minuti e successivamente sformati e posti in acqua a temperatura costante di 20 ± 1 °C.

Il macchinario utilizzato è una pressa digitale micro-processata da 200 kN con velocità impostate a 50 N/s per la prova di resistenza a flessione e 2400 N/s per quella di compressione, come prescritto da normativa (velocità compresa tra 50 ± 10 N/s fino a rottura per la flessione e velocità di 2400 ± 200 N/s fino a rottura per la compressione).

La prova consiste nella rottura del provino a flessione attraverso applicazione di un carico verticale e nella successiva rottura a compressione dei due mezzi prismi ottenuti. La forza di compressione, generata dall'avanzamento del pistone, è rilevata da una cella di carico e la rottura del provino viene individuata confrontando istante per istante i valori precedenti e successivi di carico.

La procedura di prova è descritta dalla norma UNI-EN 196-1.



Figura 5.11 Pressa configurata per la rottura a flessione (sinistra) e a compressione (destra).

Prove ultrasoniche – Modulo elastico

Anche sulle boiacche si effettuano prove ultrasoniche per il calcolo del modulo elastico, con procedimento analogo a quello descritto per calcestruzzi induriti, tenendo conto, nel calcolo della velocità delle onde, della geometria differente del provino.



Figura 5.12 Misura ultrasonica su travetti.

5.5 Prove su malte

Con questo set di prove si intende verificare il comportamento reologico e le caratteristiche meccaniche della sola malta, costituita privando il calcestruzzo degli aggregati grossi che ne costituiscono lo scheletro e dalle fibre. Le resistenze possono fornire indicazioni sul comportamento del materiale privato di alcuni componenti.

Prova di spandimento

La prova di spandimento è un metodo atto a determinare la consistenza di malte appena impastate tramite l'utilizzo di una tavola a scosse. La consistenza fornisce un indice della fluidità dell'impasto e una misura della sua deformabilità. La prova viene effettuata misurando il diametro che raggiunge un provino lasciato libero di espandersi dopo essere stato sottoposto a un determinato numero di colpi verticali (15) su una tavola a scosse. Analogamente alle boiacche, il provino viene impastato con mescolatrice per malta standard come da normativa UNI EN 196-1 con ciclo automatico di mescolamento. In questo caso, nel ciclo automatico, dopo 30 secondi dall'inizio della mescolazione, si inserisce la sabbia nella bacinella. Gli stampi sono analoghi a quelli utilizzati per il confezionamento di provini di boiaccia.

Il valore di spandimento corrisponde alla media di almeno due misurazioni e si calcola come:

$$s = (D - 100) \cdot 100\%$$

D diametro raggiunto dal provino a seguito della sollecitazione meccanica.



Figura 5.13 Prova di spandimento delle malte secondo UNI EN 1015-3.

La procedura di prova è descritta dalla norma UNI EN 1015-3.

Massa volumica su malta fresca e indurita

Come per il calcestruzzo la massa volumica della malta fresca può essere utilizzata come controllo di conformità a quanto previsto dal progetto, mentre quella della malta indurita come riprova delle corrette condizioni di maturazione. Essa si effettua pesando uno stampo per prismi 40 mm x 40 mm x 160 mm successivamente riempito con malta compattata come previsto da UNI EN 196-1. La compattazione avviene in due strati: una volta che lo stampo è fissato con la sua tramoggia alla tavola a scosse si riempie con un primo strato di malta. Vengono assestati 60 colpi in 60 secondi e successivamente si riempie con un secondo strato di malta e si ripetono i colpi. La superficie viene infine livellata.

La massa volumica si ottiene dalla formula:

$$m. v. = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

m_1 massa dello stampo vuoto espressa in kg

m_2 massa dello stampo riempito con malta compattata espressa in kg

V volume del contenitore espresso in m^3

La massa volumica della malta indurita viene misurata pesando il provino di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm e dividendo la massa per il volume accuratamente rilevato mediante calibro. È opportuno che la massa volumica determinata attraverso questa prova non si discosti eccessivamente da quella di progetto.

Resistenze: compressione e flessione

Le prove di resistenza su malte servono a determinarne i valori di resistenza a flessione e compressione. La prova avviene su provini opportunamente stagionati in camera climatica a temperatura di 20 ± 1 °C e umidità non inferiore al 90 % per 24 ore \pm 20 minuti e successivamente sformati e posti in acqua a temperatura costante di 20 ± 1 °C.

Il macchinario utilizzato è una pressa digitale micro-processata da 200 kN con velocità impostate a 50 N/s per la prova di resistenza a flessione e 2400 N/s per quella di compressione, come prescritto da normativa (velocità compresa tra 50 ± 10 N/s fino a rottura per la flessione e velocità di 2400 ± 200 N/s fino a rottura per la compressione).

La prova consiste nella rottura del provino a flessione attraverso l'applicazione di un carico verticale e nella successiva rottura a compressione dei due mezzi prismi ottenuti. La forza di compressione, generata dall'avanzamento del pistone, è rilevata da una cella di carico e la rottura del provino viene individuata confrontando istante per istante i valori di carico precedenti e successivi. La procedura di prova è descritta dalla norma UNI-EN 196-1.

Prove ultrasoniche – Modulo elastico

Anche sulle malte, si effettuano prove ultrasoniche per il calcolo del modulo elastico, con procedimento analogo a quello descritto per calcestruzzi induriti, tenendo conto della geometria differente del provino nel calcolo della velocità delle onde.

5.6 Lastre stese con cassero sperimentale

Per valutare l'effettiva idoneità delle miscele ad essere utilizzate con slip-form sono stati stesi con il cassero sperimentale gli impasti più significativi che sono stati individuati in:

- serie "acqua/cemento" con additivo superfluidificante fisso a 0,9%, additivo aerante fisso a 0,12% e rapporti a/c di 0,36, 0,39, 0,42.
- serie "superfluidificante" con rapporto acqua/cemento fisso a 0,39, additivo aerante fisso a 0,12% e quantitativi di additivo superfluidificante pari a 0,7%, 0,9%.
- serie "acqua/cemento" con additivo superfluidificante fisso a 1,1%, additivo aerante fisso a 0,12% e rapporti a/c di 0,36, 0,39 e 0,42

Ciascuna serie è stata realizzata incrementando il quantitativo di acqua o di additivo in betoniera, avendo cura di sottrarre al volume iniziale di calcestruzzo richiesto in impianto quello utilizzato nella stesa precedente. Ogni strisciata è lunga circa 6 m.

Considerando ad esempio la prima serie, volendo incrementare il rapporto acqua/cemento di 3 punti percentuali dalla stesa 1 alla stesa 2 (da 0,36 a 0,39), si avrà:

$$\text{Volume richiesto} = 3 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume stesa 1A} = 6 \text{ m} \cdot 60 \text{ cm} \cdot 25 \text{ cm} = 0,9 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume restante} = 3 - 0,9 = 2,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Quantità di cemento} = 2,1 \text{ m}^3 \cdot 390 \text{ kg/m}^3 = 819 \text{ kg}$$

$$\text{Acqua da aggiungere} = 819 \text{ kg} \cdot 0,03 = 24,57 \text{ kg}$$

Al fine di valutare l'idoneità di ogni impasto steso sono stati rilevati diversi dati geometrici della lastra. Le misurazioni sono state effettuate su circa 2 m di stesa a partire da almeno un metro dall'inizio, porzione non classificabile in quanto risente dell'avvio del macchinario, e comunque sulla parte di lastra ritenuta migliore. Ciascun parametro geometrico è stato registrato ogni 20 cm e se ne è effettuata una media. I parametri presi considerazione sono:

- larghezza della lastra (discostamento dai 60 cm corrispondenti alla dimensione del cassero)
- slump verticale: abbassamento del piano della lastra in corrispondenza dello spigolo superiore rispetto al piano (Figura 5.14). Fornisce un'indicazione riguardo l'ingobbimento della lastra.
- slump orizzontale: misura dello spanciamiento dello spigolo inferiore rispetto alla verticale (Figura 5.14).

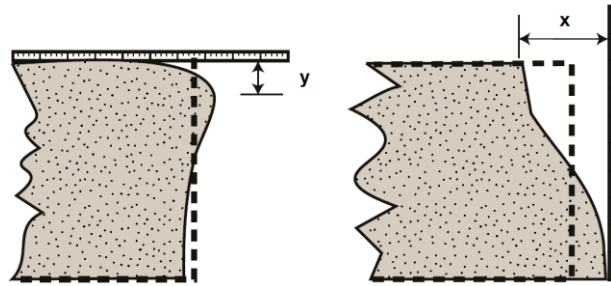


Figura 5.14 Slump verticale e slump orizzontale

- altezza del cordolo/abbassamento: misura del discostamento del cordolo superiore del profilo del giunto dalla dimensione effettiva del macchinario (Figura 5.15).

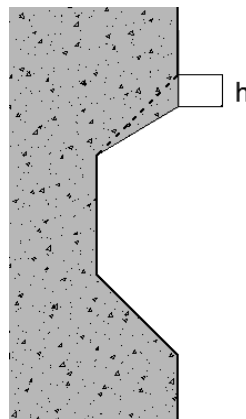


Figura 5.15 Perdita di forma del giunto

Si è inoltre effettuata una verifica visiva della presenza di buchi, strappi o trascinamenti e una valutazione superficiale della finitura della lastra suddividendola in rettangoli 20x40 cm dalla parte del bordo piatto e 20x20 cm dalla parte del profilo del giunto in modo da considerare separatamente anche gli effetti di eventuali strappi o imperfezioni dovuti ai cedimenti nella zona. A ciascun rettangolo è stato attribuito uno dei seguenti livelli di severità:

- Non classificabile: lastra non coesa con presenza di grossi strappi o buchi e con gravi difetti di vibrazione.
- Pessima: lastra generalmente chiusa ma con buchi profondi di grosse dimensioni e piccoli strappi
- Bassa: lastra chiusa con buchi superficiali di dimensione superiore a 1 cm
- Media: lastra chiusa con buchi superficiali di dimensione inferiore a 1 cm
- Elevata: lastra chiusa con totale assenza di buchi e strappi, finitura regolare priva di trascinamenti.

Successivamente, a calcestruzzo indurito, è stato previsto un prelievo di carote, secondo norma UNI EN 12504-1, dalla porzione visivamente migliore della lastra; per ogni stesa sono state estratte 6 carote, con rotture a compressione a 7 e 28 giorni. I valori di resistenza così

ottenuti sono stati poi confrontati con quelli relativi alle rotture dei cubi corrispondenti realizzati in laboratorio al fine di individuare eventuali difetti di vibrazione. In tal caso si otterrebbero infatti dei valori di resistenza a compressione relativi alle carote prelevate in situ inferiori a quelli dei cubi realizzati in laboratorio, discrepanza dovuta a presenza di eccessivi vuoti e buchi conseguenti a una non sufficiente costipazione.



Figura 5.16 Carotatura delle lastre di calcestruzzo

CAPITOLO 6

Analisi dei risultati

In questo capitolo si riportano i risultati delle prove descritte nel Capitolo 5, con relativa analisi critica. Come precedentemente illustrato si sono studiate diverse miscele di calcestruzzi, con corrispondenti malte e boiacche, focalizzandosi sull'influenza di due componenti principali: l'additivo superfluidificante e il rapporto acqua/cemento. Perciò, per ciascun parametro analizzato relativo a malte e boiacche, si studieranno cinque serie, due riguardanti variazioni del rapporto acqua/cemento e tre del quantitativo di additivo superfluidificante. Per quanto riguarda i calcestruzzi invece, si prenderanno in esame i valori relativi a due serie acqua/cemento stese con cassero sperimentale e due serie superfluidificante realizzate in laboratorio, effettuando inoltre un confronto dei risultati riguardanti i calcestruzzi con la stessa composizione ma testati in condizioni diverse. Oltre all'analisi dei valori che i parametri assumono al variare dei componenti si cercherà inoltre di individuarne un intervallo ottimale per miscele stese con slip-form, confrontando la composizione in esame con l'effettivo risultato della stesa con il cassero sperimentale. È da sottolineare come non tutti i parametri siano stati effettivamente studiati per ogni miscela di ciascuna serie; le prove in questione, come ad esempio il contenuto d'acqua o il contenuto d'aria, non hanno infatti una funzione di caratterizzazione della miscela da un punto di vista reologico o meccanico bensì di controllo della corretta realizzazione dell'impasto. Per questo motivo si riporteranno soltanto i risultati relativi ad alcune miscele, quelle delle quali si è ritenuto più importante e significativo effettuare una verifica. La misura della massa volumica è stata invece effettivamente svolta per ogni impasto realizzato anche se non si ritiene rilevante ai fini della ricerca riportarne tutti i risultati; ne saranno forniti solamente alcuni a titolo esemplificativo. L'elenco completo dei risultati ottenuti si può trovare in Appendice D.

6.1 Risultati del calcestruzzo fresco

Il termine calcestruzzo fresco è riferito al tempo che intercorre tra la miscelazione degli ingredienti e l'inizio della presa, che rende l'impasto non più modellabile. Verranno indentificati come calcestruzzi di laboratorio quelli le cui prove sono realizzate pochi minuti dopo la miscelazione. Invece per i calcestruzzi realizzati in centrale di betonaggio per poi essere stesi con il cassero sperimentale il tempo di attesa tra la miscelazione e la prova è di circa un'ora. Anche all'interno della stessa serie le prove di ciascuna miscela sono state eseguite in tempi successivi. Tutti i risultati numerici delle prove sul calcestruzzo fresco sono riportati in Appendice C.

Prova di abbassamento al cono di Abrams

Nella prova di abbassamento al cono (Grafico 6.1) lo slump risulta crescente con l'incremento del rapporto acqua/cemento, partendo da zero (valori minori di 0,5 cm) per miscele più asciutte (a/c 0,36), fino a superare i 2 cm per miscele con maggiore contenuto d'acqua (a/c 0,42). La classe di consistenza secondo normativa UNI EN 206-1 risulta essere < S1 per rapporti acqua/cemento di 0,36, valori per i quali la prova perde di significato, e S1 per rapporti da 0,39 a 0,42.

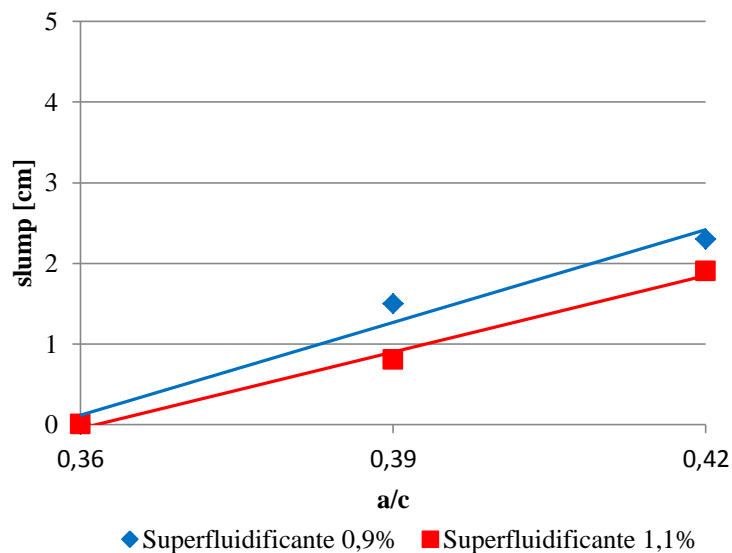


Grafico 6.1 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi stesi con cassero sperimentale delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (in blu) e 1,1 % (in rosso).

Le due serie hanno un andamento simile, pressoché lineare, poiché una variazione così piccola di contenuti di additivo non ha grande influenza sulla fluidità. Ci si attenderebbe che alla serie con maggior contenuto di additivo superfluidificante corrispondano valori di slump superiori: il grafico mostra però un comportamento inverso, ovvero la serie con superfluidificante all'1,1% mostra valori inferiori rispetto a quella con lo 0,9%. Questo comportamento può essere causato dalla perdita di lavorabilità, dovuta all'inizio delle reazioni

di idratazione del cemento, che il calcestruzzo della seconda serie subisce rimanendo nella betoniera per tutto il tempo durante il quale si realizza la prima stesa. I valori relativi a queste serie testano quindi la lavorabilità delle miscele al momento del getto.

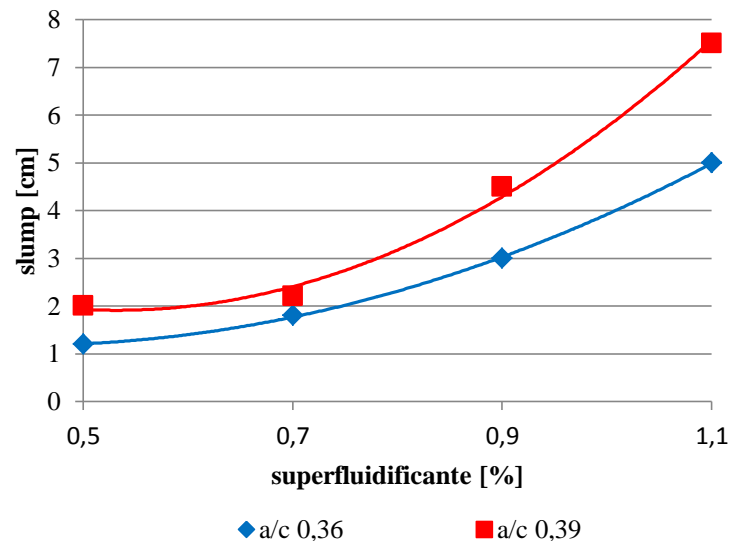


Grafico 6.2 Abbassamento al cono di Abrams di calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,36 (in blu) e 0,39 (in rosso).

Anche in questo caso (Grafico 6.2) il risultato mostra valori di slump maggiori all'aumentare del rapporto acqua/cemento (serie rossa sopra serie blu). Inoltre entrambe le curve hanno un andamento crescente in corrispondenza di un incremento del quantitativo di additivo superfluidificante, risultato differente dal precedente e teoricamente corretto, visto che questi calcestruzzi sono stati confezionati in laboratorio e testati al momento della realizzazione, non essendo quindi soggetti a lunghi tempi di attesa che ne determinerebbero una perdita di lavorabilità. L'andamento delle curve si presenta non lineare con incrementi minori per bassi quantitativi di additivo (0,2 cm per la serie a/c 0,39 e 0,6 cm per quella a 0,36 passando dallo 0,5 % allo 0,7 % di additivo) e via via superiori, fino ad arrivare ad incrementi di 2-3 cm nell'intervallo di additivo dallo 0,9 % all'1,1 %. I calcestruzzi con quantitativi di additivi compresi tra lo 0,5 % e lo 0,7 % presentano una classe di consistenza S1, mentre a partire da 0,7 % fino all'1,1 % rientrano in classe S2.

Prova di spandimento su tavola a scosse

La prova di spandimento su tavola a scosse effettuata sui calcestruzzi stesi con il cassero sperimentale (due serie acqua/cemento), non ha fornito risultati significativi, com'è possibile notare dalla Tabella 6.1 e dalla Tabella 6.2.

	Superfluidificante 0,9 %	
	a/c	DIN (cm)
1A	0,36	NC
1B	0,39	27,5
1C	0,42	34,5

Tabella 6.1 Valori di spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

	Superfluidificante 1,1 %	
	a/c	DIN (cm)
3A	0,36	NC
3B	0,39	NC
3C	0,42	29,3

Tabella 6.2 Valori di spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

Dove si riporta la scritta NC (non classificabile) è stata riscontrata una perdita di coesione del calcestruzzo, con separazione degli aggregati grossi dovuta a problemi di compattazione del conglomerato che si presenta troppo asciutto (Figura 6.1).



Figura 6.1 Prova di spandimento su tavola a scosse non classificabile.

Questo comportamento indica che calcestruzzi molto asciutti e perdita di lavorabilità causata dai tempi di trasporto e attesa prima del getto, portano a consistenze tali da non essere più descrivibili con questa prova. Questo è il caso, ad esempio, del calcestruzzo 3B: infatti ci si aspetterebbe un valore di spandimento maggiore rispetto a quello dell'1B e comunque classificabile. Questa incongruenza deriva da una probabile perdita di lavorabilità conseguente alle condizioni di trasporto, di attesa e climatiche, variabili per ciascuna stesa.

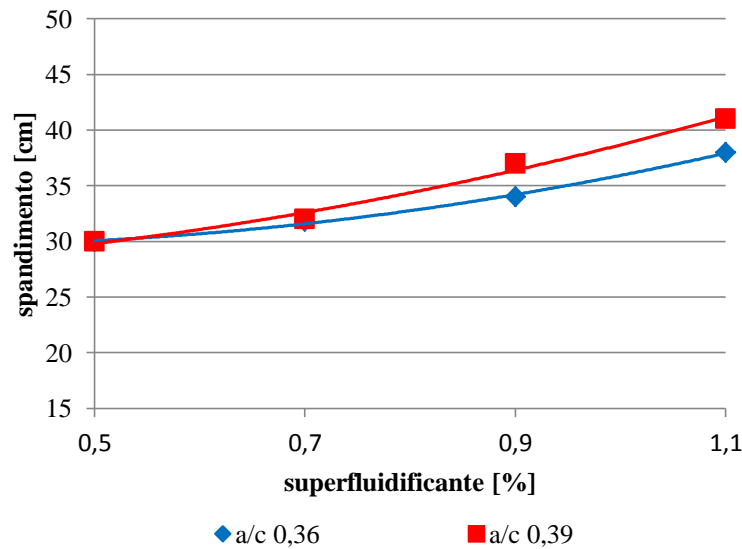


Grafico 6.3 Spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi realizzati in laboratorio per serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (in blu) e 0,39 (in rosso).

Dal Grafico 6.3, coerentemente con quanto atteso, si riscontrano valori crescenti di spandimento all'aumentare del quantitativo di additivo superfluidificante. Inoltre il grafico mostra che a valori superiori di rapporti acqua/cemento corrispondono spandimenti maggiori. L'andamento delle curve, corrispondente ai due diversi rapporti acqua/cemento, è dello stesso tipo e pressoché lineare con incremento maggiore dello spandimento per rapporto acqua/cemento superiore. I calcestruzzi con quantitativo di additivo inferiore allo 0,9% presentano una classe di consistenza F1, secondo norma UNI EN 206-1, mentre quelli con superfluidificante compreso tra 0,9% e 1,1% sono in classe F2.

Indice di compattabilità

Dalle prove effettuate viene mostrato un andamento decrescente dell'indice di compattabilità all'aumentare sia del rapporto acqua/cemento che del quantitativo di additivo superfluidificante. Ciò avviene perché ad un aumento di fluidità corrisponde una maggior costipazione sotto il peso proprio con una minore presenza di vuoti. È da segnalare che per questa prova, contrariamente alla prova di slump e alla tavola a scosse, all'aumentare della compattabilità della miscela corrisponde una diminuzione dell'indice di compattabilità. Per calcestruzzi auto-compattanti l'indice di compattabilità è pari a 1,0.

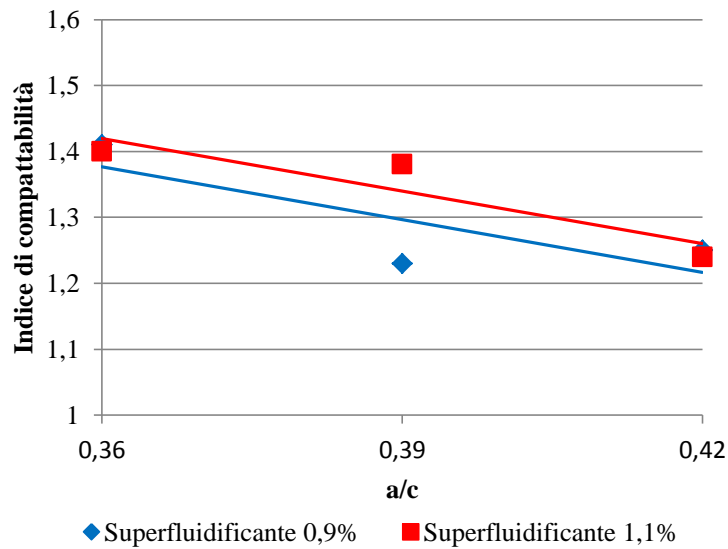


Grafico 6.4 Indice di compattabilità di calcestruzzi stesi con cassero sperimentale della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (in blu) e 1,1 % (in rosso).

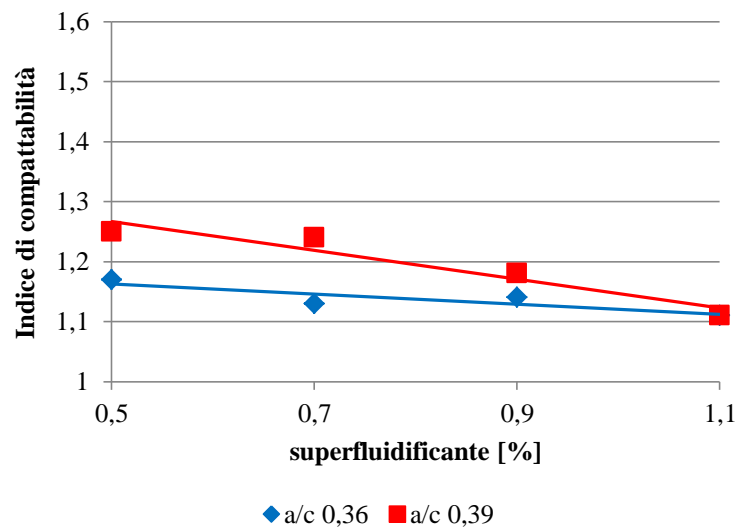


Grafico 6.5 Indice di compattabilità di calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (in blu) e 0,39 (in rosso).

Dal Grafico 6.4 e dal Grafico 6.5 è possibile notare come gli impasti realizzati in laboratorio presentino in generale valori inferiori di indice di compattabilità rispetto a quelli dei calcestruzzi stesi con cassero sperimentale, a ulteriore conferma del fatto che i secondi sono meno fluidi dei primi poiché soggetti a perdita di lavorabilità. Per quanto riguarda la serie superfluidificante realizzata in laboratorio si hanno classi di consistenza C1, secondo norma UNI EN 206–1, per i calcestruzzi con additivo allo 0,5% e allo 0,7% della serie con rapporto acqua/cemento 0,39 mentre tutti i calcestruzzi della serie con acqua/cemento allo 0,36 e i due calcestruzzi della serie con acqua/cemento 0,39 e additivo superfluidificante 0,9 % e all'1,1 % sono in classe C2. Per la serie acqua/cemento stesa con cassero sperimentale i

calcestruzzi con rapporto acqua/cemento 0,36 e quello con acqua/cemento 0,39 e superfluidificante 1,1 % sono in classe di consistenza C1, mentre gli altri presentano valori corrispondenti alla classe C2, ma quasi a cavallo tra le due classi C1-C2.

Massa volumica

Il controllo della massa volumica a fresco è servito alla verifica della corretta realizzazione dell'impasto. In particolare, dopo ciascuna stesa, è stato calcolato il volume di materiale rimanente in autobetoniera per poi calcolare l'aggiunta d'acqua.

	Superfluidificante 0,9 %		
	a/c	M.V. prog.	M.V. reale
1A	0,36	2388	2377
1B	0,39	2369	2330
1C	0,42	2349	2291

Tabella 6.3 Confronto tra masse volumiche di progetto e reali dei calcestruzzi stesi con cassero sperimentale della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

Come si può osservare dalla Tabella 6.3 le masse volumiche reali si discostano di meno del 3 % dal valore di progetto. Si osserva poi che la riduzione di massa volumica con l'aumentare del rapporto acqua/cemento viene rispettata dai calcestruzzi messi in opera.

Tutte le masse volumiche dei calcestruzzi freschi sono riportate in Appendice D.

Contenuto d'aria – metodo per pressione manometrico

Si riporta a titolo esemplificativo la prova del contenuto d'aria effettuata sui calcestruzzi della prima serie acqua/cemento stesa con cassero sperimentale (additivo superfluidificante 0,9%).

	Superfluidificante 0,9 %	
	a/c	% aria
1A	0,36	3,0
1B	0,39	3,8
1C	0,42	4,2

Tabella 6.4 Contenuto d'aria dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

Secondo UNI EN 206 è necessario ottenere un valore di aria inglobata del 3% per classi di esposizione XF, parametro che risulta verificato attraverso questa prova. Avendo quindi ottenuto un corretto quantitativo d'aria per tutti i calcestruzzi della serie acqua/cemento, non si ritiene necessario ripetere la prova per gli altri calcestruzzi dal momento che in nessuno di questi viene variata la quantità di cemento e di additivo e che la verifica risulta soddisfatta con tutti i rapporti acqua/cemento presi in considerazione anche all'interno delle altre serie. Questa prova viene quindi utilizzata solo come verifica e, siccome la quantità d'aria non è un parametro variabile all'interno della sperimentazione, non è necessario ripeterla per tutte le miscele.

Determinazione del contenuto d'acqua

La determinazione del contenuto d'acqua tramite bruciatura è stata effettuata sui calcestruzzi di partenza delle tre serie stese con il cassero sperimentale, per controllare che il rapporto acqua/cemento richiesto all'impianto di betonaggio fosse corrispondente a quello della stesa e che la mescolazione, il tempo di trasporto e il calore con conseguente evaporazione non l'avessero modificato. I risultati forniti dalla prova sono riportati nella tabella seguente:

Stesa	a/c richiesto	a/c effettivo
1	0,33	0,36
2	0,39	0,39
3	0,36	0,36

Tabella 6.5 Contenuti d'acqua richiesti ed effettivi per ciascuna stesa ricavati mediante prova di bruciatura.

Per la prima stesa era stato inizialmente richiesto un valore di rapporto acqua/cemento pari a 0,33 ma, dopo il trasporto dall'impianto di betonaggio al luogo di getto, il calcestruzzo è apparso troppo asciutto ed inadatto per la stesa: pertanto si è deciso di portare il rapporto acqua/cemento a 0,36 prima di iniziare la stesa, aggiungendo acqua in betoniera. Il valore così ottenuto è stato poi verificato tramite prova di bruciatura. Alla luce di quanto accaduto con la prima stesa, sono stati richiesti, per le stese successive, rapporti acqua/cemento più elevati, rivelatesi entrambi corretti a seguito delle prove di contenuto d'acqua.

Confronto tra calcestruzzo realizzato in laboratorio e steso con cassero sperimentale

In questa sede si vogliono studiare le differenze riscontrate nei valori delle prove su calcestruzzi freschi tra quelli realizzati in laboratorio e quelli che sono stati stesi con il cassero sperimentale. Infatti, dall'analisi dei dati è risultato subito evidente come, ad una stessa miscela con identici quantitativi di acqua, cemento, additivi e aggregati, corrispondessero valori molto differenti. Si ipotizza che questo sia dovuto alla perdita di lavorabilità del calcestruzzo steso con cassero sperimentale dovuta alle modalità e ai tempi di trasporto e mescolamento, assenti nel caso di calcestruzzi realizzati in laboratorio, nonché alle temperature non controllate cui esso è sottoposto durante tutte le operazioni. Questa perdita di lavorabilità è imputabile all'inizio della reazione di idratazione del cemento e quindi alla diminuzione di acqua libera: è quindi opportuno distinguere tra la lavorabilità del calcestruzzo appena confezionato da quella al momento del getto.

Si riportano in seguito grafici esemplificativi di quanto appena esposto, rappresentanti le differenze riscontrate nei valori ottenuti dalle prove dell'abbassamento al cono di Abrams, dell'indice di compattabilità e dello spandimento su tavola a scosse relativi alle stesse miscele. Gli impasti in questione sono relativi alle due serie di superfluidificante: la serie 1 con rapporto acqua/cemento 0,36 e la serie 2 con rapporto acqua/cemento 0,39.

Acqua/cemento 0,36		
superfluid %	Slump lab [cm]	Slump Slip[cm]
0,9	3	0
1,1	5	0

Tabella 6.6 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

Acqua/cemento 0,39		
superfluid %	Slump lab [cm]	Slump Slip [cm]
0,7	2,2	1
0,9	4,5	2
1,1	7,5	0,8

Tabella 6.7 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

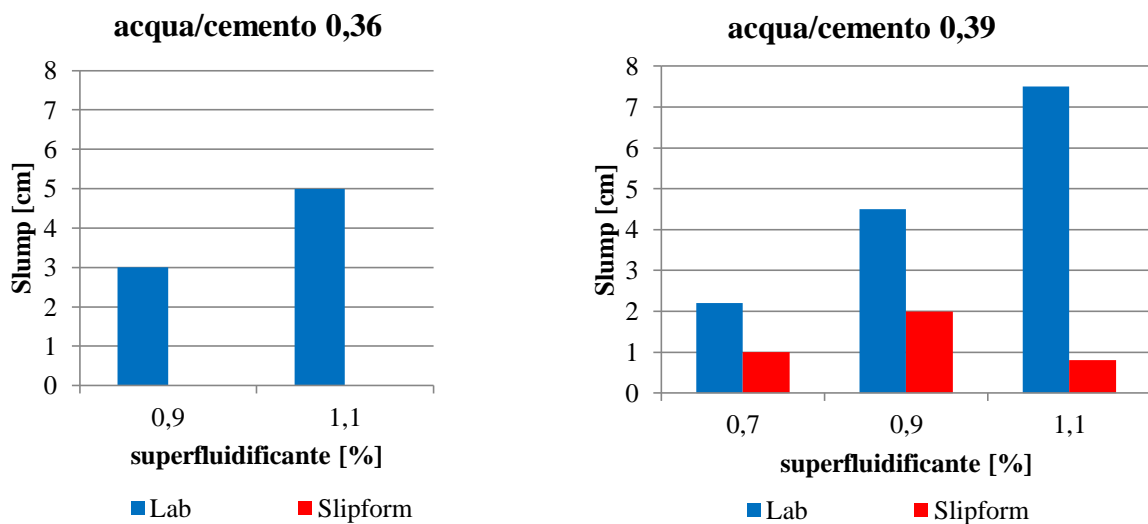


Grafico 6.6 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

Com'è possibile notare dalla Tabella 6.6, dalla Tabella 6.7 e dal Grafico 6.6 Confronto tra abbassamento al cono di calcestruzzi realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale. il valore di abbassamento al cono indica, nel caso di calcestruzzo realizzato in laboratorio, una classe di consistenza S2, mentre per quanto riguarda il calcestruzzo al momento del getto, questo è in classe S1 o minore. Ciò significa che durante il mescolamento e il trasporto si ha effettivamente una grossa perdita di lavorabilità, di cui è necessario tener conto nelle prescrizioni progettuali.

Acqua/cemento 0,36		
superfluid %	Indice di compattabilità lab	Indice di compattabilità Slip
0,9	1,14	1,41
1,1	1,11	1,40

Tabella 6.8 Confronto tra compattabilità di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

Acqua/cemento 0,39		
superfluid %	Indice di compattabilità lab	Indice di compattabilità Slip
0,7	1,24	1,25
0,9	1,18	1,25
1,1	1,11	1,38

Tabella 6.9 Confronto tra compattabilità di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

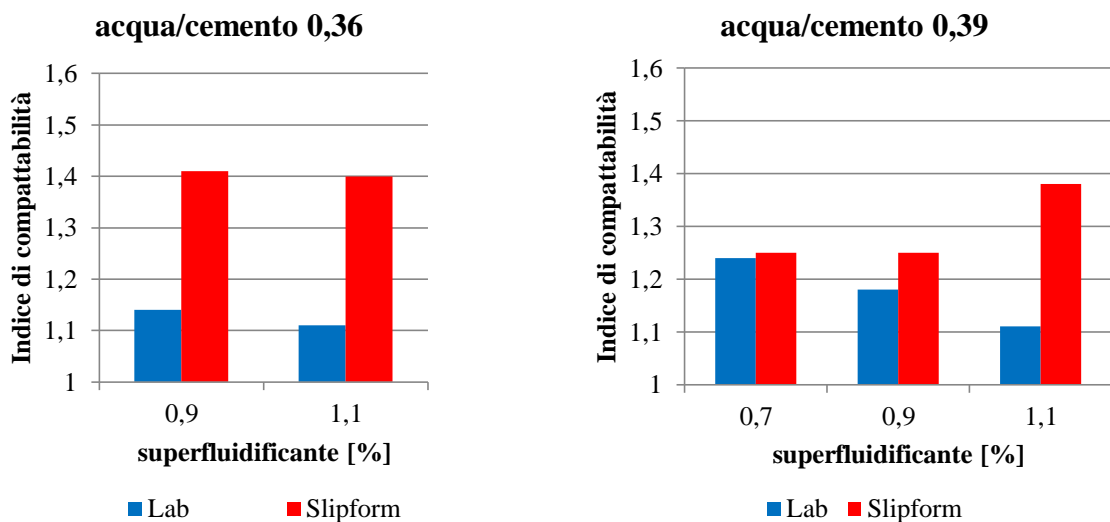


Grafico 6.7 Confronto tra compattabilità di calcestruzzi realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

Anche in questo caso (Tabella 6.8, Tabella 6.9 e Grafico 6.7) si nota come il calcestruzzo confezionato in laboratorio abbia indici di compattabilità minori rispetto a quello steso con cassero sperimentale, che corrispondono a una fluidità maggiore: infatti i primi presentano nella maggior parte dei casi una classe di consistenza C2, che indica una maggiore fluidità e chiusura dei vuoti, mentre i secondi sono in classe C1.

Acqua/cemento 0,36		
superfluidificante %	DIN lab [cm]	DIN Slip[cm]
0,9	34	NC
1,1	38	NC

Tabella 6.10 Confronto tra spandimento su tavola a scosse di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

Acqua/cemento 0,39		
superfluidificante %	DIN lab [cm]	DIN Slip [cm]
0,7	32	27,5
0,9	37	27
1,1	41	NC

Tabella 6.11 Confronto tra spandimenti su tavola a scosse di calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 realizzati in laboratorio o stesi con cassero sperimentale.

Un'ulteriore conferma di quanto già esposto si ricava dall'analisi dei valori della prova di spandimento su tavola a scosse: infatti, come mostrato dalla Tabella 6.10 e dalla Tabella 6.11, i calcestruzzi realizzati in laboratorio presentano generalmente spandimenti corrispondenti a una classe di consistenza F2, mentre quelli relativi alle stese sono in classe F1 o, per la maggior parte, non classificabili, ovvero presentano un comportamento incoerente a causa della perdita di lavorabilità, come già esposto precedentemente.

Si può quindi affermare che tutti i calcestruzzi realizzati in laboratorio hanno classi di consistenza superiori rispetto a quelli stesi con cassero sperimentale: è opportuno quindi prestare attenzione a questo fenomeno in eventuali specifiche progettuali o linee guida per il mix design di calcestruzzi da estrarre.

Calcestruzzo di prova

Si riportano infine i valori relativi alle prove sul fresco del calcestruzzo di prova, già citato nel Capitolo 5, avente le seguenti caratteristiche:

- Curva granulometrica uguale a tutti gli altri calcestruzzi, secondo ETL 97-5
- Dosaggio di cemento: 390 kg/m³
- Fibre in polipropilene : 1 kg/m³
- Additivo aerante: 0,12%
- Additivo superfluidificante: 0,9 %
- Rapporto acqua/cemento: 0,33

Si ritiene utile la trattazione di questi risultati in quanto inizialmente questa miscela era stata individuata come quella di partenza per le stese col cassero sperimentale. Infatti le prove

sul fresco avevano mostrato una buona reologia del calcestruzzo, un'ottima capacità di auto-sostenersi, una buona chiusura dell'impasto e i seguenti valori riferiti alle prove di consistenza:

- Abbassamento al cono di Abrams: 1,5
- Spandimento su tavola a scosse: 27 cm
- Indice di compattabilità: 1,25

Tali valori, tra tutti i calcestruzzi testati inizialmente, erano i più vicini a quelli di riferimento trattati nell'analisi bibliografica.

Pertanto, per la prima stesa col cassero sperimentale, era stato richiesto un calcestruzzo con queste caratteristiche. Come già trattato precedentemente però, al momento della stesa, il calcestruzzo si è mostrato troppo asciutto ed inadeguato alla messa in opera, a causa di una probabile perdita di lavorabilità durante il trasporto, e si è quindi passati a calcestruzzi con rapporti acqua/cemento superiori.

6.2 Risultati del calcestruzzo indurito

Le prove su calcestruzzo indurito non hanno mostrato una variabilità come quelle sul calcestruzzo fresco realizzato in laboratorio o in centrale di betonaggio. La resistenza del calcestruzzo indurito, essendo influenzato dalle modalità di messa in opera/vibrazione, viene verificata attraverso i cubi confezionati in laboratorio e le carote estratte dalle lastre stese. Ciascun dato è il risultato di una media su tre provini per ciascuna scadenza. Tutti i dati numerici delle prove sul calcestruzzo indurito sono riportati in Appendice D.

Massa volumica

La massa volumica del calcestruzzo indurito funge da controllo del corretto proporzionamento e della corretta maturazione del calcestruzzo; è inoltre possibile utilizzarla come parametro di controllo sulla qualità della compattazione. Infatti confrontando le masse volumiche di provini vibrati con metodi diversi è possibile riscontrare eventuali difetti in uno dei due metodi. Nel caso in esame si analizzano quindi i valori di massa volumica a 28 giorni di cubi e carote confezionati dallo stesso calcestruzzo, i primi vibrati con tavola vibrante, le seconde derivanti da carotaggio della stesa con cassero sperimentale. Si riportano quindi nelle tabelle sottostanti i valori corrispondenti alle due stese acqua/cemento; naturalmente è privo di senso riportare anche i valori delle serie di superfluidificante realizzate in laboratorio, delle quali sono presenti stese e di conseguenza carote solo in minima parte. Si utilizza un parametro chiamato “grado di compattazione”, costituito dal rapporto tra la massa volumica delle carote a 28 giorni e quella dei cubi, che indica appunto il grado di costipazione del calcestruzzo steso rispetto a quello dei cubi confezionati manualmente. Se il grado di compattazione assume valori prossimi all’unità la vibrazione delle carote è equivalente a quella dei cubi; nel caso sia minore di uno indica invece una scorretta o carente vibrazione nelle carote, e quindi nelle stese. In ogni caso occorre realizzare il maggior grado di compattazione possibile, comunque almeno pari a 0,97.

Stesa	MV cubi [kg/m ³]	MV carote [kg/m ³]	grado di compattazione
1A	2394,1	-	1,02
	2449,5	2456,8	
	2416,3	2469,9	
1B	2383,7	2473,2	1,03
	2397,6	2456,8	
	2397,6	2477,0	
1C	2342,2	2406,7	1,02
	2328,6	2388,7	
	2357,3	2399,4	

Tabella 6.12 Masse volumiche e grado di compattazione di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

Stesa	MV cubi [kg/m ³]	MV carote [kg/m ³]	grado di compattazione
3A	2448,0	-	0,98
	2441,5	-	
	2446,5	2399,0	
3B	2451,9	2402,6	0,98
	2441,8	2408,5	
	2443,3	2401,1	
3C	2416,3	2363,7	0,98
	2408,0	2351,1	
	2411,9	2382,9	

Tabella 6.13 Masse volumiche e grado di compattazione di calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

Le Tabella 6.12 e la Tabella 6.13 indicano un grado di compattazione prossimo a uno per entrambe le stese. Ciò significa che la vibrazione del cassero è sufficiente a sopperire alla carente lavorabilità del calcestruzzo fresco ed a far raggiungere alla stesa la massima compattazione ottenuta nel confezionamento dei provini. In qualche caso (grado di compattazione > 1) il costipamento della lastra risulta addirittura superiore a quello dei provini. Ciò è indice, per calcestruzzi contenenti additivo aerante, di espulsione di una parte dell'aria inglobata, anche se in minima parte visto che il valore massimo rilevato è di 1,03. In ogni caso è da sottolineare che il carotaggio viene effettuato nella parte centrale e, più in generale, nelle zone di migliore finitura: non è pertanto garantito che la compattazione del cassero sia sufficiente in tutta la sezione trasversale della stesa.

Prova di resistenza a compressione

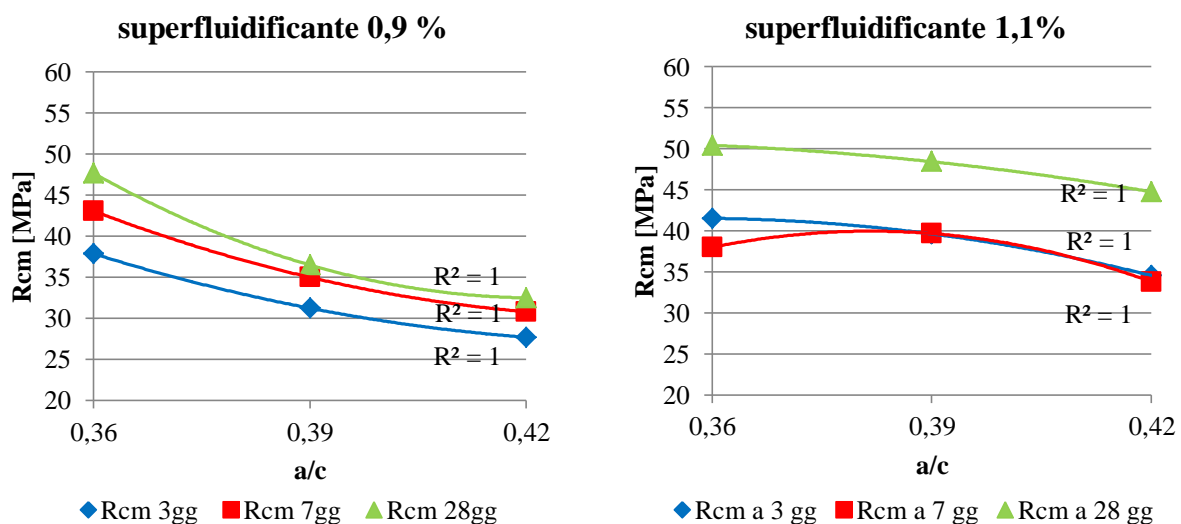


Grafico 6.8 Resistenza a compressione dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

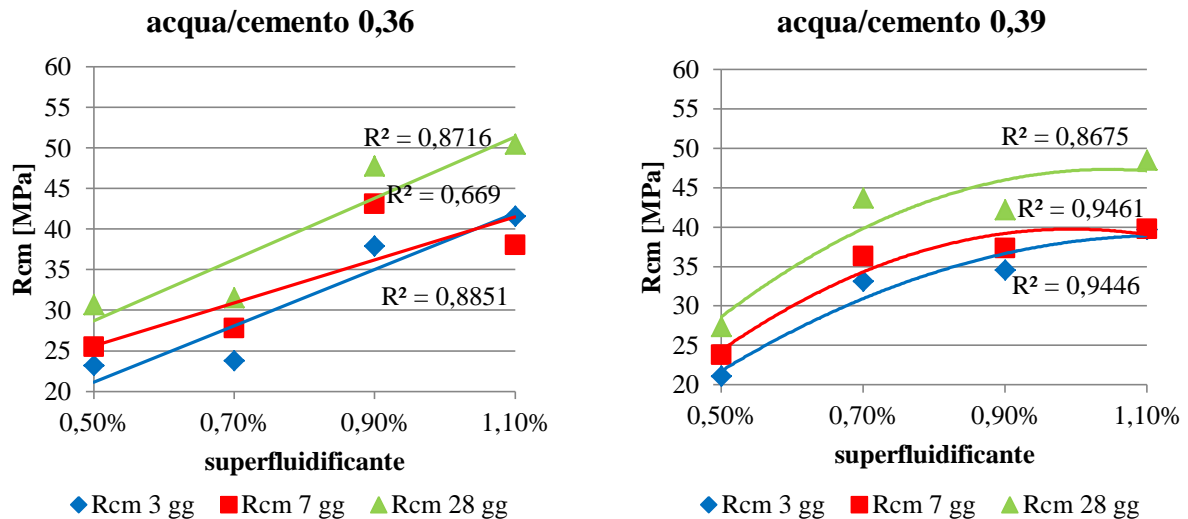


Grafico 6.9 Resistenza a compressione dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (a sinistra) e 0,39 (a destra).

Nel caso in esame, come atteso, le resistenze a compressione crescono con il passare dei giorni di maturazione e decrescono all'aumentare del rapporto acqua/cemento (Grafico 6.8 e Grafico 6.9); infatti il contenuto d'acqua è un parametro fondamentale nella determinazione della resistenza.

Nella serie acqua/cemento con superfluidificante allo 0,9 % si passa da una resistenza a compressione a 28 giorni pari a 47,4 MPa per rapporto acqua/cemento 0,36 fino a 32,5 MPa per rapporto acqua/cemento 0,42, con diminuzione relativa del 31 %. Nella serie con superfluidificante all'1,1% le resistenze sono leggermente superiori: sempre riferendosi ai 28 giorni si ha un massimo di 50,4 MPa per rapporto acqua/cemento di 0,36, fino ad arrivare ad un minimo di 44,8 MPa per rapporto acqua/cemento 0,42.

La stessa tendenza dell'additivo superfluidificante ad incrementare le resistenze si riscontra nel Grafico 6.9. Infatti, a livello teorico, il quantitativo di additivo superfluidificante non dovrebbe essere un parametro che influenza la resistenza a compressione del calcestruzzo, che dipende prevalentemente dal rapporto acqua/cemento e dal tipo di cemento; in entrambe le serie superfluidificante si nota però come al crescere del quantitativo di additivo crescano a loro volta anche le resistenze. Questo comportamento può essere spiegato grazie alla specifica funzionalità dell'additivo che permette una migliore dispersione e distribuzione dei granuli di cemento nell'impasto, rendendo più efficaci le reazioni di idratazione. Si passa quindi da una resistenza di 27,3 MPa con additivo allo 0,5 % a una di 48,4 MPa per con additivo all'1,1 % per la serie con acqua/cemento allo 0,39, mentre da 30,6 MPa a 50,4 MPa per la serie con acqua/cemento allo 0,36. Entrambe le serie hanno un incremento massimo di circa 20 MPa.

Confronto resistenze a compressione cubi-carote

Si procede poi a un confronto tra le resistenze a compressione dei cubi, confezionati con il calcestruzzo delle stese, e delle carote, estratte dalle diverse lastre. Anche questo confronto è utile a verificare la qualità della compattazione: infatti il fatto che le resistenze delle carote siano inferiori a quelle dei cubi può essere dovuto alla presenza di vuoti all'interno della carota che indicherebbero dei problemi di compattazione. Si riportano quindi i grafici relativi alle stese delle due serie acqua/cemento relativi alle rotture a compressione a 28 giorni. Anche in questo caso sono state estratte e testate tre carote per ogni scadenza da ciascuna lastra, salvo eccezioni dovute a problemi di vibrazione/carotaggio.

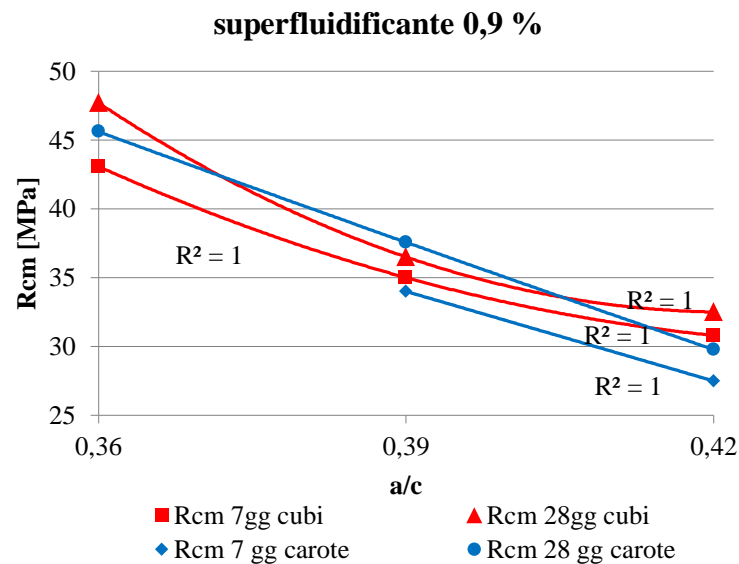


Grafico 6.10 Confronto tra resistenza cubica a compressione dei cubi e delle carote della prima stesa (serie acqua/cemento, superfluidificante 0,9 %).

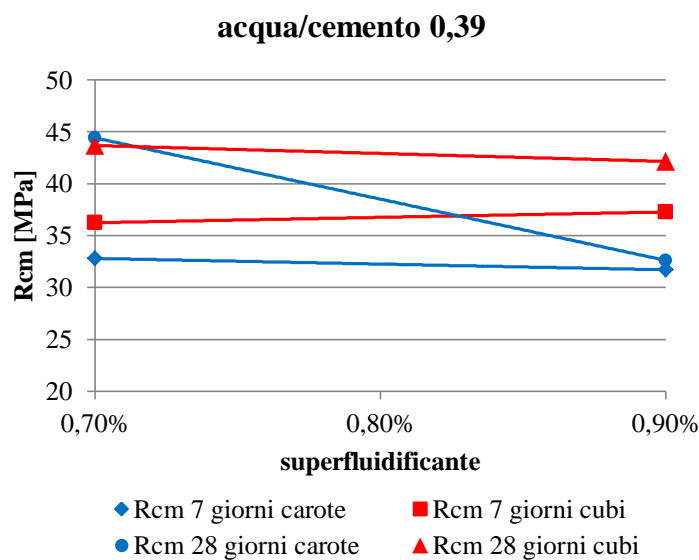


Grafico 6.11 Confronto tra resistenza cubica a compressione dei cubi e delle carote della seconda stesa (serie superfluidificante, acqua/cemento 0,39).

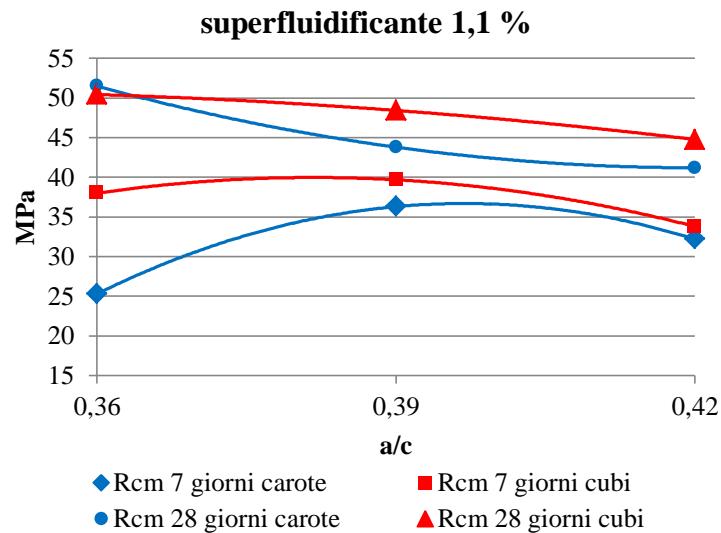


Grafico 6.12 Confronto tra resistenza cubica a compressione dei cubi e delle carote della terza stesa (serie acqua/cemento, superfluidificante 1,1 %).

Nel Grafico 6.10, Grafico 6.11 e Grafico 6.12 le linee blu corrispondono alla resistenza a compressione delle carote estratte dalla lastra stesa con il cassero sperimentale a 7 e 28 giorni, quelle rosse a quella dei cubi compattati in laboratorio. La resistenza a compressione cilindrica delle carote (f_c) viene trasformata in resistenza a compressione cubica (R_c), secondo quanto indicato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni, per poter effettuare un confronto con le resistenze dei cubi. Si può quindi notare come in tutte e tre le serie le resistenze a compressione delle carote siano generalmente inferiori a quelle dei cubi. Non si riscontrano tuttavia differenze di resistenze così marcate da far pensare a dei difetti nella vibrazione del cassero, come già evidenziato dal grado di compattazione (la differenza di resistenza a 28 giorni è dell'ordine di 3 MPa). Anche i valori di resistenza a compressione cilindrica e cubica delle carote sono riportati in Appendice D.

Un altro aspetto da considerare è che le carote sono soggette ad un effetto di disturbo causato dal carotaggio, nonché a una non perfetta omogeneità della sezione, fattori che potrebbero altrettanto influenzare il valore delle resistenze.

L'andamento delle resistenze delle carote è conforme a quello già evidenziato precedentemente per i provini cubici, tendenzialmente decrescente con l'aumentare del rapporto acqua/cemento e crescente o costante con l'incremento del dosaggio di additivo superfluidificante. Le uniche eccezioni sono costituite dalle carote estratte dalla seconda lastra della seconda serie (lastra 2B, a/c 0,39, superfluidificante 0,9 %) in cui la resistenza decresce all'aumentare dell'additivo superfluidificante e presenta una differenza con quella dei provini cubici di ben 10 MPa e da quelle estratte dalla prima lastra della terza serie (lastra 3A, a/c 0,36, superfluidificante 1,1 %) in cui la resistenza a 7 giorni con rapporto acqua/cemento 0,36 è minore di quelle con rapporti acqua/cemento superiori. Nel primo caso

ciò è dovuto a problemi nella vibrazione verificatisi durante la stesa di quelle particolari lastre, che ne hanno impedito la corretta compattazione, provocando quindi una forte presenza di vuoti al suo interno, che causano una diminuzione delle resistenze. Nel secondo caso l'incongruenza può essere dovuta all'insufficienza di dati: infatti è stato possibile il prelievo di una sola carota per scadenza in quanto la lastra si presentava mal compattata a causa di un problema nella vibrazione, che ne ha reso difficoltoso il carotaggio. Questa bassa ripetibilità rende la prova statisticamente poco significativa.

Prove ultrasoniche – Modulo elastico

Dal Grafico 6.13 e dal Grafico 6.14 è possibile notare come l'andamento del modulo elastico segua per lo più quello delle resistenze: si ha infatti modulo elastico decrescente all'aumentare del rapporto acqua/cemento per superfluidificante pari a 0,9% e crescente all'aumentare del quantitativo di additivo per i provini analizzati a 28 giorni. Si notano invece delle incongruenze con quanto appena riportato negli andamenti del modulo elastico della serie acqua/cemento con additivo all'1,1%, che risulta infatti all'incirca costante, e nei valori delle serie di superfluidificante a 3 e a 7 giorni, dispersi o non del tutto crescenti. Sarebbero quindi necessarie ulteriori prove per definire un chiaro andamento del modulo elastico, poiché probabilmente queste incertezze sono causate dalla bassa ripetibilità delle prove. Si può comunque identificare un valore medio per il modulo elastico che, per la serie acqua/cemento con superfluidificante all'1,1%, vale 36,4 GPa a 3 giorni, 37,4 GPa a 7 giorni e 43,5 GPa a 28 giorni.

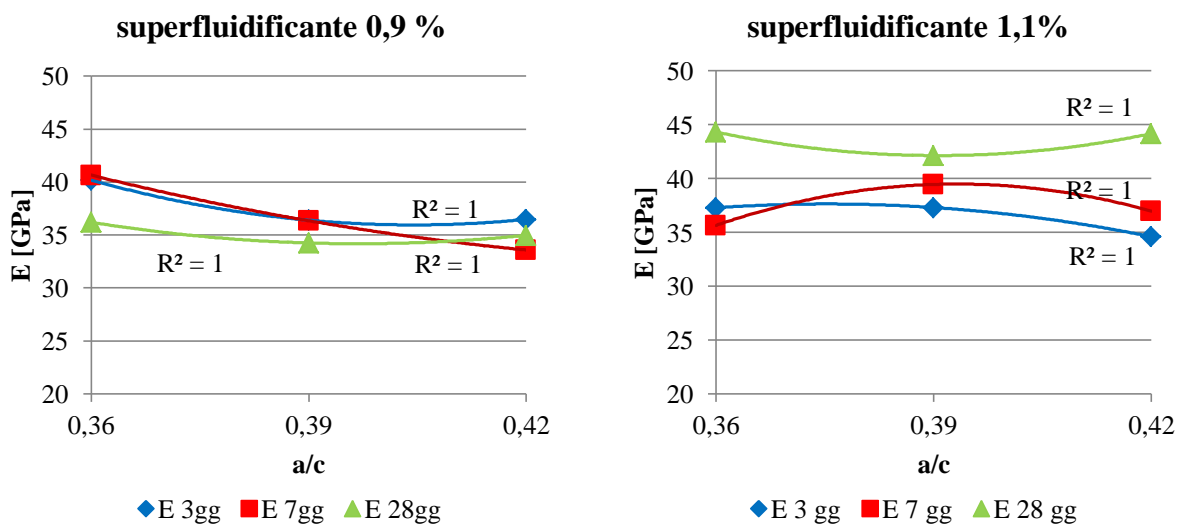


Grafico 6.13 Modulo elastico dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

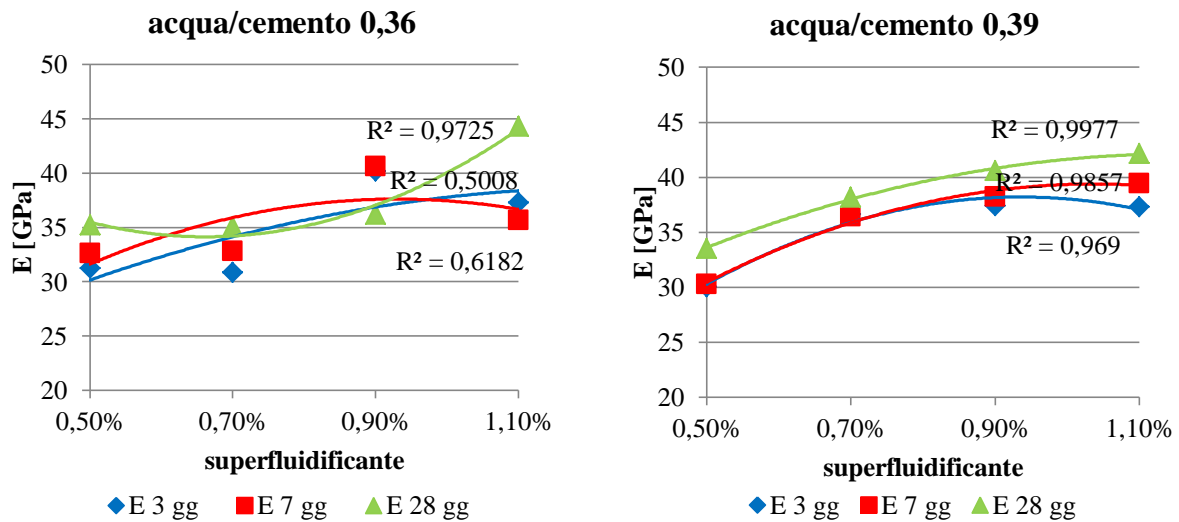


Grafico 6.14 Modulo elastico dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (a sinistra) e 0,39 (a destra).

Per la serie acqua/cemento con additivo allo 0,9 % si passa da un valore massimo di modulo elastico a 28 giorni di 36,2 GPa a un minimo di 35,0 GPa, mentre in quella con additivo all'1,1% il valore resta pressoché costante e pari a 44 GPa. Entrambe le serie superfluidificante hanno un comportamento simile passando da valori minimi di modulo elastico di circa 34 GPa fino a valori massimi di circa 44 GPa.

Confronto moduli elastici misurati – teorici

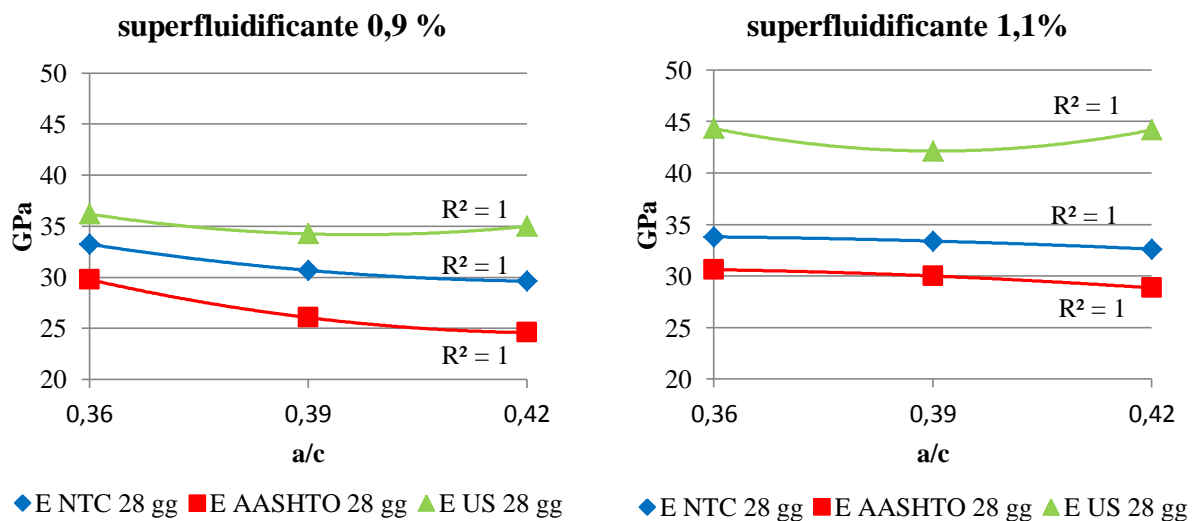


Grafico 6.15 Confronto tra i moduli elastici misurati e teorici dei calcestruzzi delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

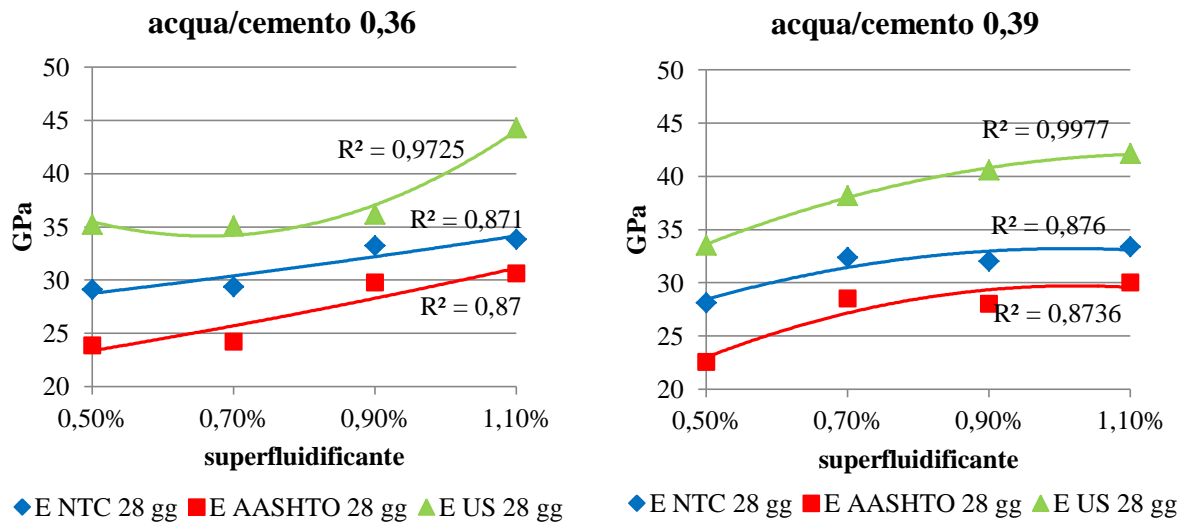


Grafico 6.16 Confronto tra i moduli elastici misurati e teorici dei calcestruzzi delle serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36 (a sinistra) e 0,39 (a destra).

Come si osserva dal Grafico 6.15 e dal Grafico 6.16 il modulo elastico reale è maggiore del modulo elastico calcolato con la formula indicata nelle Norme Tecniche per le Costruzioni che è maggiore del maggiore del modulo elastico calcolato con la formula indicata in AASHTO – Pavement Design Practices. Le formule sono da utilizzarsi in sede progettuale, quindi risultano cautelative, mentre gli ultrasuoni mostrano il modulo elastico effettivo che risulta anche di 10 GPa superiore a quello calcolato secondo normativa italiana.

6.3 Risultati delle boiacche

Le prove sperimentali su boiacche hanno fornito risultati coerenti con le previsioni di comportamento ipotizzate; solo la prova di resistenza a flessione ha evidenziato un comportamento inaspettato. Per ciascuna miscela sono stati confezionati due travetti. I risultati numerici delle prove su boiacca sono in Appendice E.

Prova di viscosità

Le prove di viscosità, realizzate secondo il piano sperimentale, hanno descritto l'influenza dell'acqua e dell'additivo superfluidificante sulla boiacca. Per gli intervalli di variazione dei parametri da noi considerati emerge sempre un andamento decrescente.

Nella serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % e 1,1 % l'andamento è parabolico e si osserva una grande variazione di viscosità dall'inizio alla fine della serie.

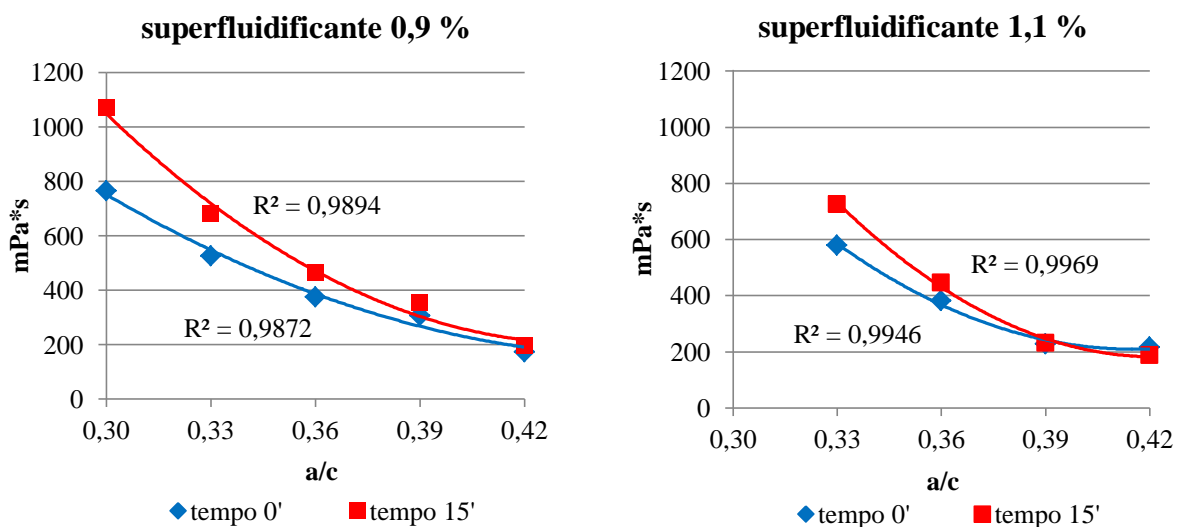


Grafico 6.17 Viscosità della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9% (a sinistra) e 1,1% (a destra).

Dal Grafico 6.17 si nota come l'incremento di viscosità dopo 15 minuti si riduca notevolmente per quantità d'acqua maggiori: l'influenza del processo di idratazione del cemento sulla viscosità dipende dal rapporto tra acqua e cemento. Questo comportamento non si evidenzia nei grafici successivi della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento fissi.

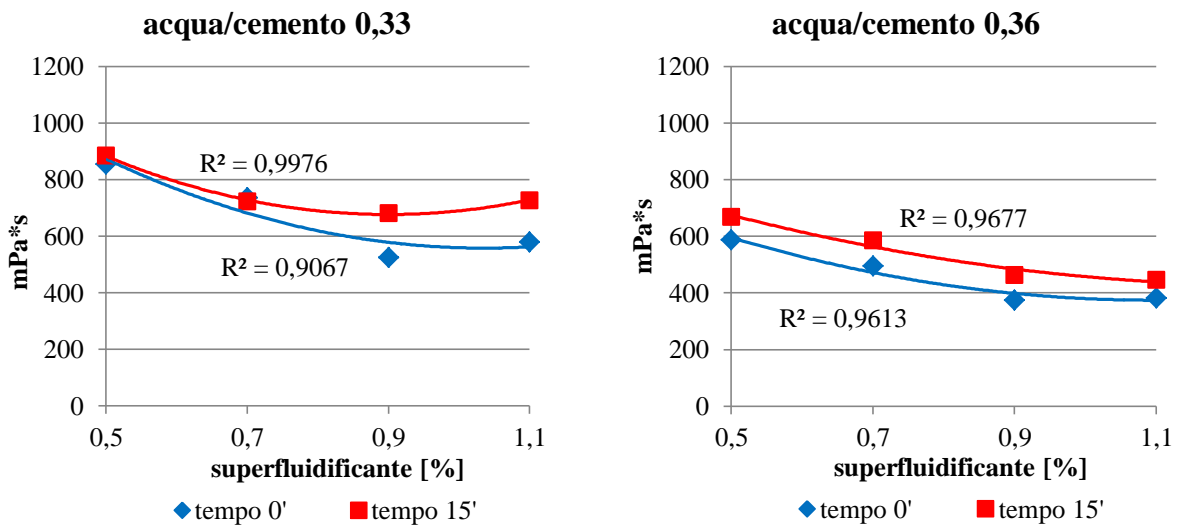


Grafico 6.18 Viscosità della boiaccia della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,30 (a destra).

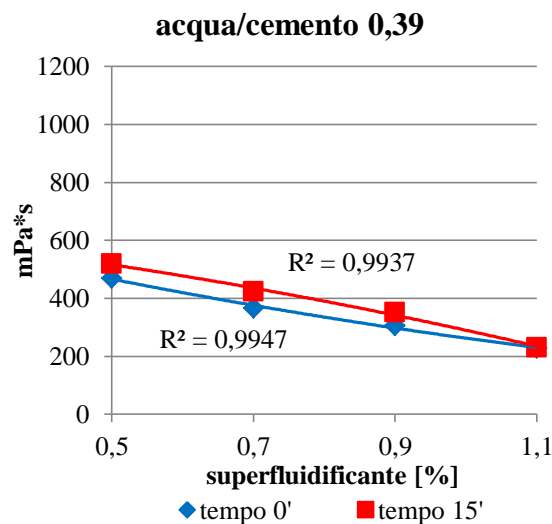


Grafico 6.19 Viscosità della boiaccia della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,39.

Nel Grafico 6.18 e nel Grafico 6.19 l'aumento di dosaggio di additivo superfluidificante dall'inizio alla fine di ciascuna serie non produce variazioni di viscosità paragonabili alla serie acqua/cemento. Si osserva invece un costante incremento di viscosità dopo 15 minuti indipendentemente dal dosaggio di superfluidificante, coerentemente con quanto riportato nell'analisi bibliografica.

Dalla prova di viscosità nel tempo (Grafico 6.20) si è avuta la conferma che la viscosità cresce in modo esponenziale nel tempo e che l'additivo superfluidificante garantisce un aumento di lavorabilità riducendo la viscosità ed il suo mantenimento nella fase iniziale, dove infatti la viscosità è quasi costante.

Viscosità - Tempo

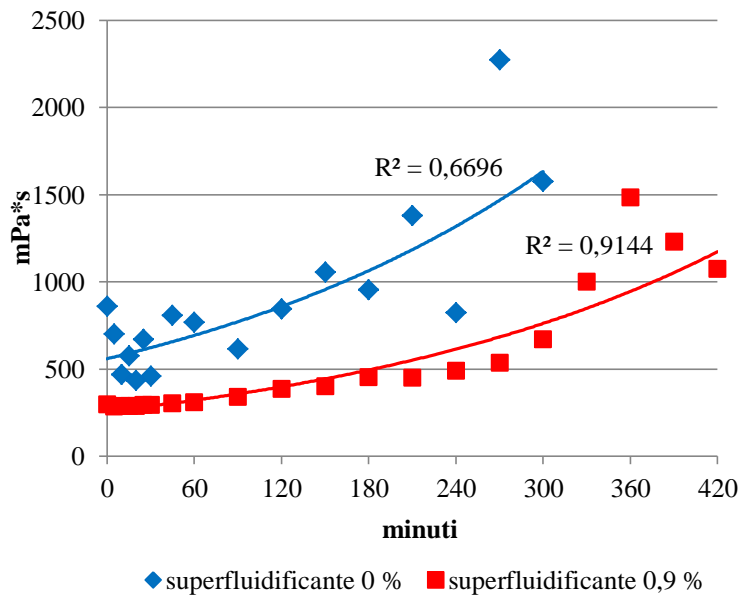


Grafico 6.20 Viscosità nel tempo per una boiaccia con (rosso) e senza (blu) superfluidificante.

Resistenza a compressione

La resistenza a compressione delle boiacche segue un andamento lineare negli intervalli di variazione considerati. Nelle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % e 1,1 % all'aumentare della quantità d'acqua in rapporto al cemento si riduce la resistenza a compressione, come si vede dal Grafico 6.21.

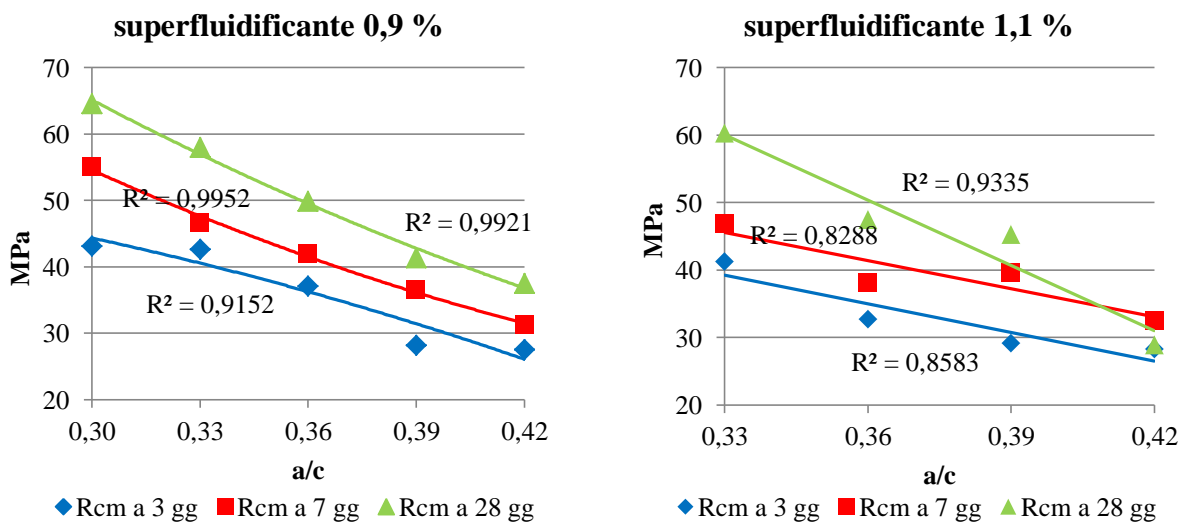


Grafico 6.21 Resistenza a compressione di boiacche della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

La riduzione della resistenza che si evidenzia nelle serie acqua/cemento non è presente per variazioni di dosaggio di additivo superfluidificante (Grafico 6.22 e Grafico 6.23) . L'additivo non influisce sulle resistenze ma solo sulle viscosità delle boiacche.

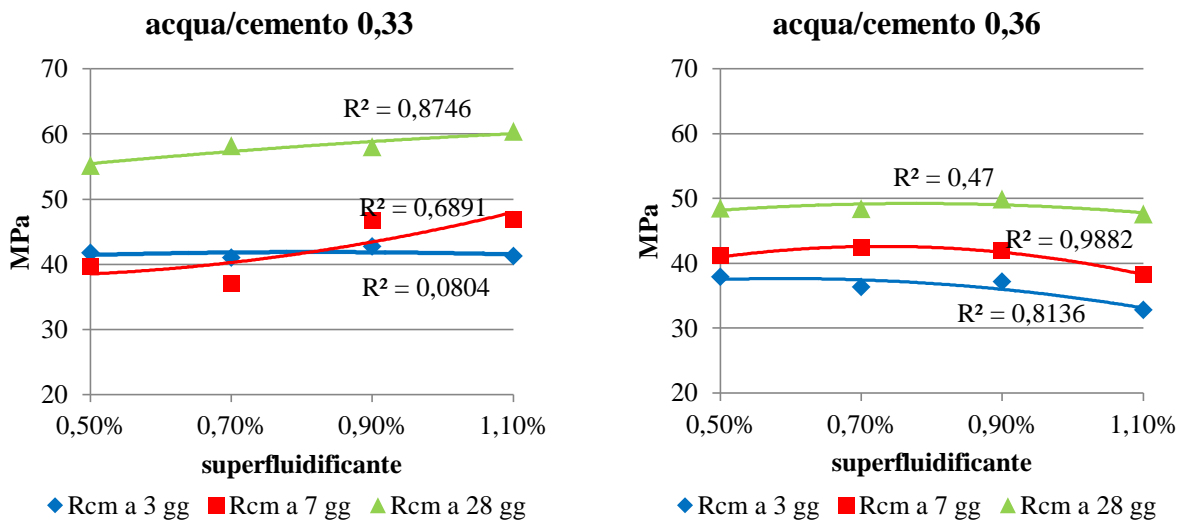


Grafico 6.22 Resistenza a compressione di boiacche della serie superfluidificante con rapporto acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).

Aumentando il rapporto acqua/cemento le resistenze complessive si riducono proporzionalmente, ma rimangono generalmente costanti al variare del superfluidificante.

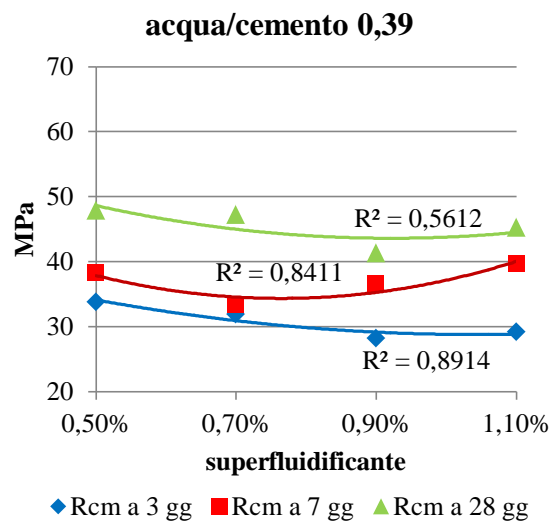


Grafico 6.23 Resistenze a compressione di boiacche per serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

Resistenza a flessione

La prova di resistenza a flessione ha confermato una grande incertezza nei risultati. La causa è dovuta al fatto che la rottura si esprime lungo un piano e non su un volume come per le prove di resistenza a compressione.

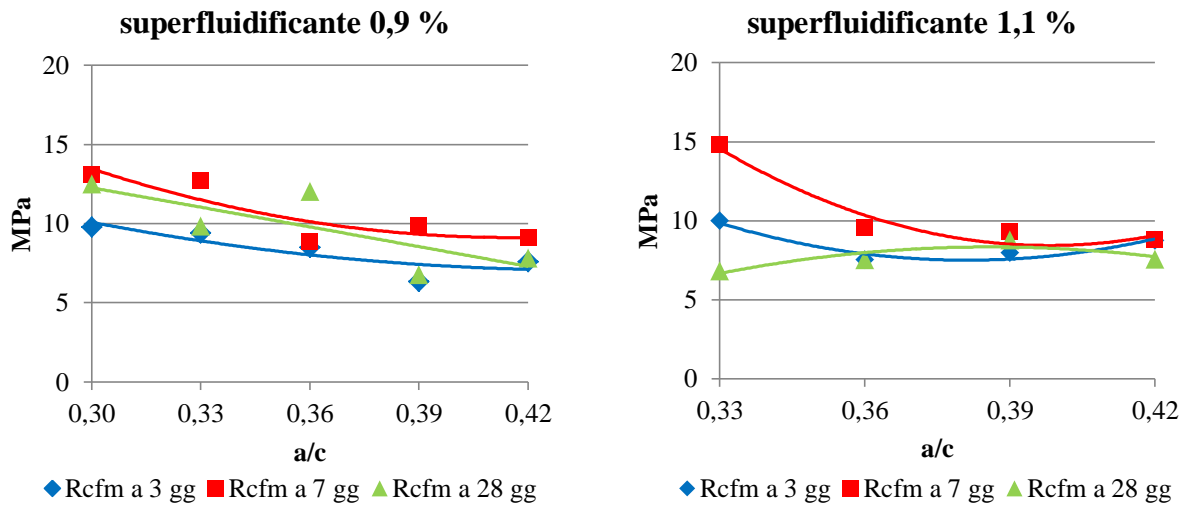


Grafico 6.24 Resistenza a flessione della boiaccia della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra)

Dal Grafico 6.24 delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % e 1,1 % si osserva una riduzione della resistenza a flessione a 28 giorni rispetto ai 7 giorni. Questo comportamento si osserva anche per le serie superfluidificante (Grafico 6.25 e Grafico 6.26).

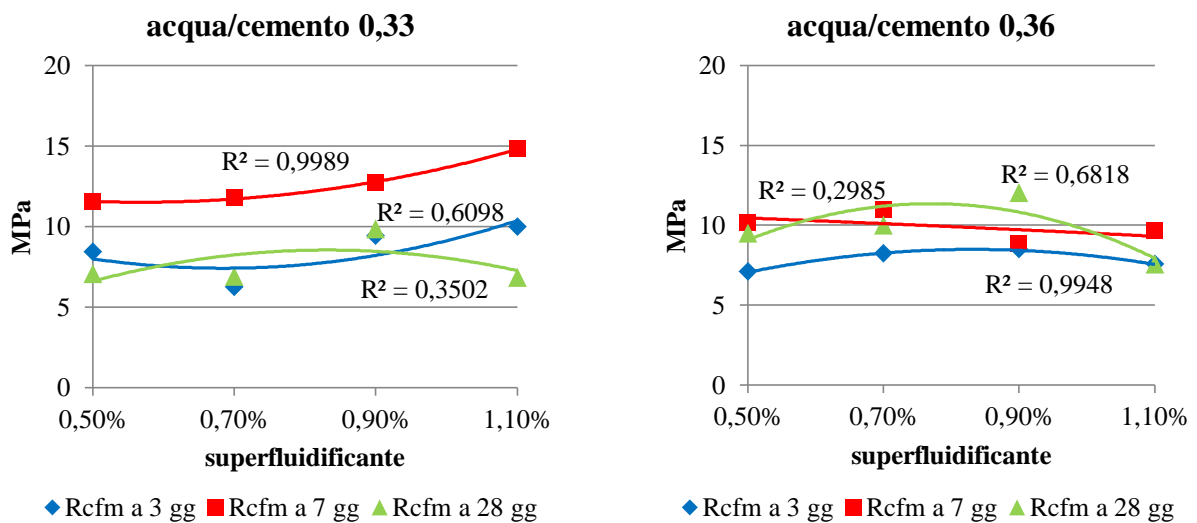


Grafico 6.25 Resistenza a flessione delle boiacche della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).

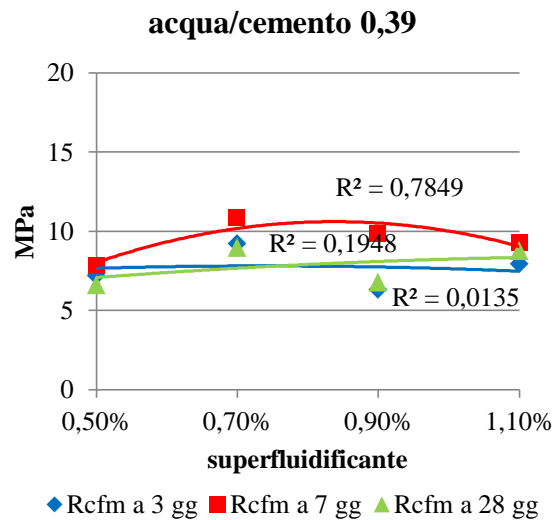


Grafico 6.26 Resistenza a compressione delle boiacche della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

Contrariamente a quanto ci si aspetterebbe, ovvero un incremento di resistenza a flessione a 28 giorni, le boiacche presentano la loro resistenza massima a flessione a 7 giorni. L'errore potrebbe essere dovuto alla grande incertezza su questo tipo di prova. Tuttavia probabilmente questo risultato potrebbe essere dovuto ai fenomeni di ritiro plastico e igrometrico, accentuati dall'assenza di aggregati, che inducono tensioni interne riducendo la resistenza a trazione per flessione della boiacca.

Prove ultrasoniche - Modulo elastico

Il modulo elastico ritrova un andamento stabile paragonabile alla resistenza a compressione della boiacca. In particolare si evidenzia come il modulo elastico decresca con l'aumento del rapporto acqua/cemento (Grafico 6.27) mentre rimanga costante per variazioni di dosaggio di additivo superfluidificante (Grafico 6.28 e Grafico 6.29).

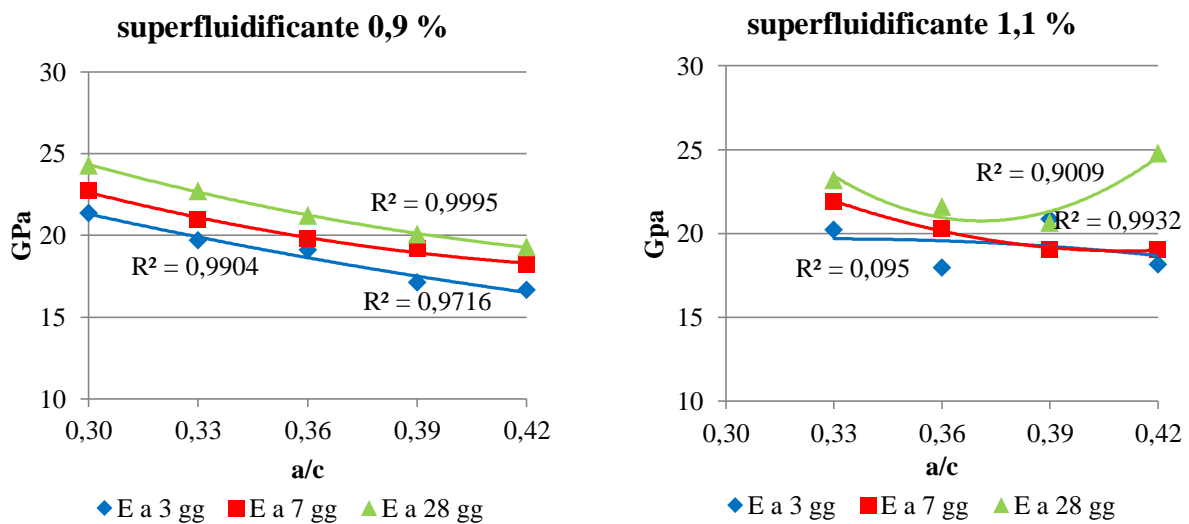


Grafico 6.27 Modulo elastico delle boiacche delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

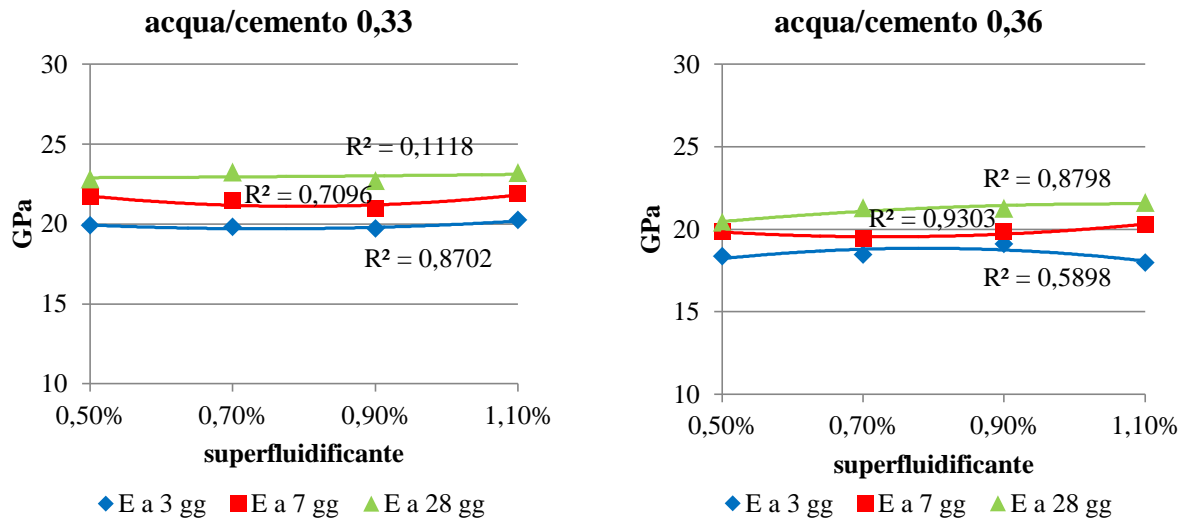


Grafico 6.28 Modulo elastico delle boiacche delle serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).

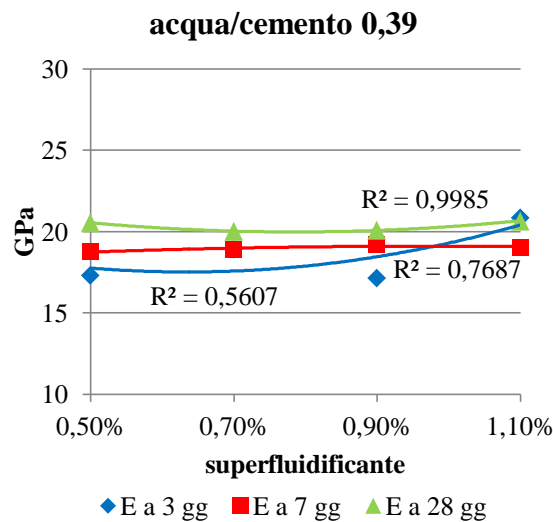


Grafico 6.29 Modulo elastico delle boiacche della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

Massa volumica

La misura della massa volumica della boiaccia fresca e indurita è stata eseguita e riportata in Appendice E. In particolare, la misura sulla boiaccia fresca aveva lo scopo di confrontare la stessa miscela nei vari impasti eseguiti. Si è considerata una variazione del 10 % della media come indice di incongruenza. Con valori ritenuti incongruenti, l'impasto è stato scartato senza sottoporlo ad alcuna prova. La misura della massa volumica del travetto indurito è invece servita come controllo del processo di maturazione.

Nel corso delle prove si sono riscontrate incongruenze nelle boiacche fresche, probabilmente dovute ad errori di mix design o di pesatura, mentre non si sono mai riscontrate variazioni eccessive sui travetti induriti.

6.4 Risultati delle malte

Le prove sperimentali sulle malte hanno consentito di formulare intervalli di consistenza idonei per la progettazione per slip-form. Tutti i risultati numerici delle prove sulle malte e i grafici degli spandimenti di ciascuna delle serie analizzate si trovano in Appendice F.

Prova di spandimento

Tramite il risultato di questa prova è possibile determinare la consistenza di ciascuna malta in termini di fluidità e deformabilità, andando a studiare l'influenza della sola componente fine dell'aggregato sulla miscela. Si riportano i risultati per le due serie acqua/cemento e per le tre di superfluidificante.

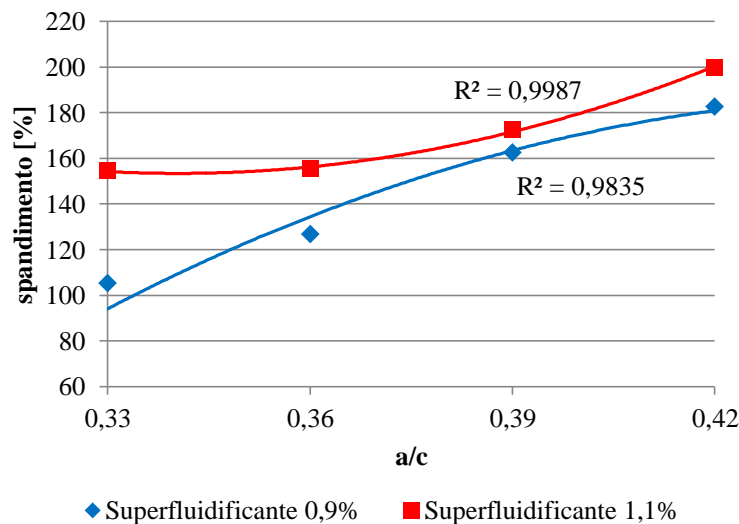


Grafico 6.30 Spandimento delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (in blu) e 1,1 % (in rosso).

Dal Grafico 6.30 si nota che, come atteso, i valori degli spandimenti aumentano all'aumentare del rapporto acqua/cemento e sono superiori nella serie con un quantitativo di additivo superfluidificante maggiore. L'andamento della serie con additivo superfluidificante a 1,1 % non è quello reale: infatti i valori di spandimento relativi ai rapporti acqua/cemento di 0,39 e 0,42 sono calcolati a 0 colpi poiché a 15 il materiale sarebbe fuoriuscito dalla tavola di prova. In ogni caso è possibile eseguire alcune considerazioni riguardo gli altri valori del grafico. Nella serie con superfluidificante allo 0,9% si nota un incremento pressoché lineare dello spandimento, mentre nella serie con additivo pari a 1,1% si nota un primo tratto a valore quasi costante ed un secondo tratto della curva teoricamente molto pendente. Questo comportamento potrebbe essere determinato dalla specifica funzionalità dell'additivo che consente una migliore dispersione e distribuzione dei granuli di cemento nell'impasto per determinati contenuti d'acqua; in questo modo anche le reazioni di idratazione risultano più efficaci. Ciò denota un comportamento dell'additivo superfluidificante non lineare con

l'andamento del rapporto acqua/cemento. Questa ipotesi può essere confermata anche osservando i risultati riportati nel Grafico 6.31.

I grafici dello spandimento sono coerenti con quelli della prova su tavola a scosse effettuata sul calcestruzzo fresco.

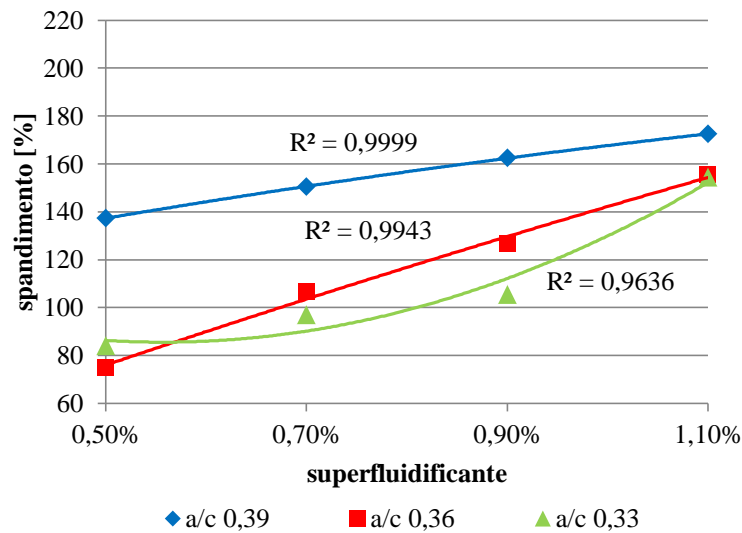


Grafico 6.31 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39 (in blu), 0,36 (in rosso) e 0,33 (in verde).

Anche in questo caso si nota un andamento crescente dei valori di spandimento all'aumentare della quantità di additivo superfluidificante e dei rapporti acqua/cemento, in accordo con quanto appena visto. A conferma di quanto esposto riguardo il grafico precedente, si noti, ad esempio, come, per rapporti acqua/cemento di 0,33 e 0,36 i valori abbiano tra di loro un incremento pressoché nullo (<10 %) in corrispondenza dello 0,7 % di additivo, mentre per rapporto acqua/cemento 0,39 si abbia un notevole incremento rispetto ai valori precedenti (40 %). Questo comportamento si riscontra in corrispondenza di tutti i quantitativi di additivo (curve rossa e verde molto vicine, distanti dalla curva blu).

Resistenza a compressione

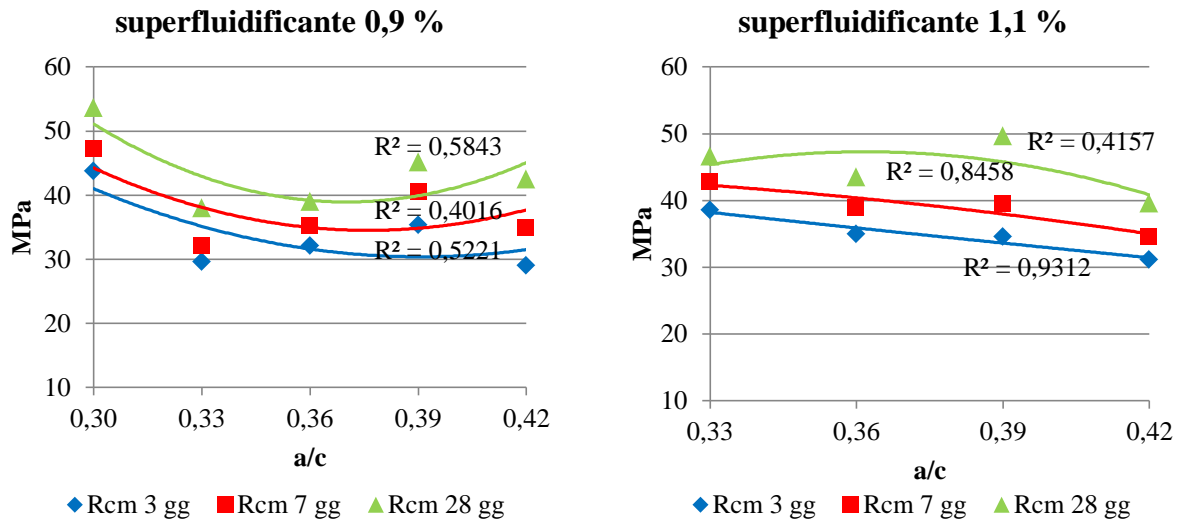


Grafico 6.32 Resistenza a compressione delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

Osservando il Grafico 6.32 a sinistra, si nota come la resistenza a compressione diminuisca all'aumentare del rapporto acqua/cemento e aumenti con il numero di giorni di stagionatura per arrivare a un massimo a 28 giorni di 53,6 MPa per rapporto a/c di 0,30 e di 37,9 MPa per rapporto a/c di 0,33. Anche nel Grafico 6.32 a destra si riscontra una diminuzione delle resistenze con l'incremento del rapporto acqua/cemento e un aumento con il passare dei giorni di stagionatura. Si noti come in questo caso il valore massimo raggiunto dalla resistenza, relativo ai 28 giorni e con rapporto a/c di 0,33, sia di 49,6 MPa, leggermente maggiore rispetto ai 37,9 MPa della stessa malta con additivo allo 0,9%. Questa tendenza all'incremento delle resistenze di pari passo con la quantità di additivo si può approfondire nei grafici seguenti ed è coerente con quanto riscontrato nelle resistenze dei calcestruzzi.

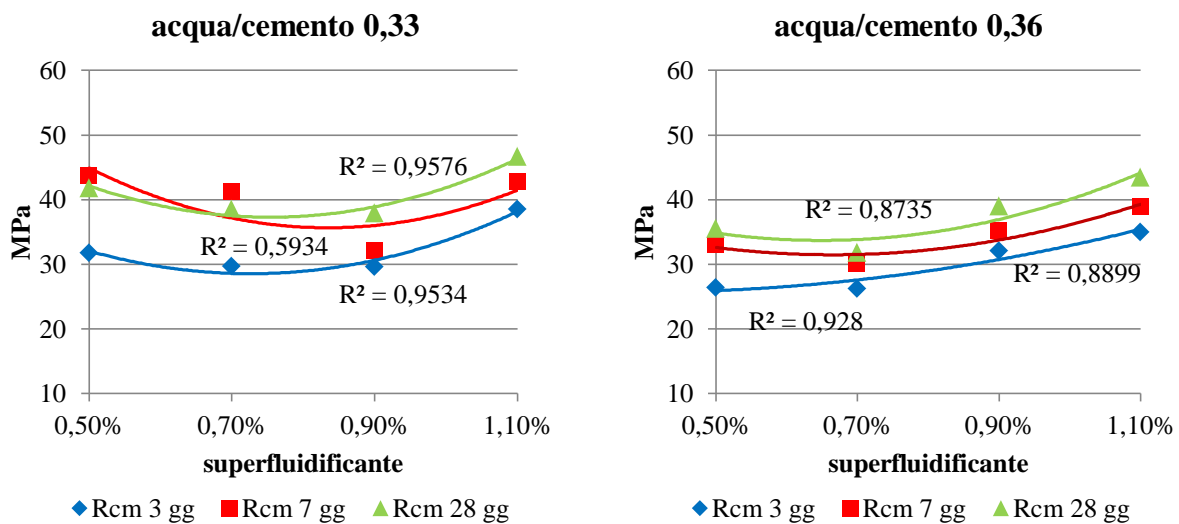


Grafico 6.33 Resistenza a compressione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).

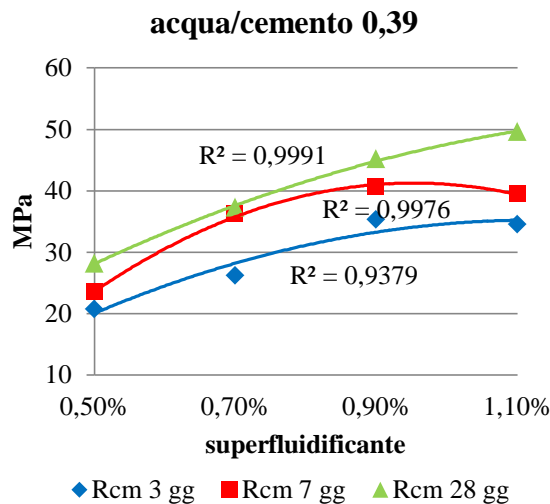


Grafico 6.34 Resistenza a compressione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

In tutti i grafici relativi alle serie di superfluidificante si riscontra lo stesso andamento delle resistenze, che assumono valori circa costanti o crescenti all'aumentare della quantità di additivo. Infatti si può notare come nel Grafico 6.33 (a sinistra) le resistenze si assestano intorno ad un valore costante; questo perché dipendono fortemente dal rapporto acqua/cemento, anch'esso costante nella serie. Nel Grafico 6.33 (a destra) e nel Grafico 6.34 l'andamento delle resistenze è invece lievemente crescente all'aumentare dell'additivo, caratteristica già riscontrata ed illustrata nei grafici delle resistenze a compressione del calcestruzzo.

Resistenza a flessione

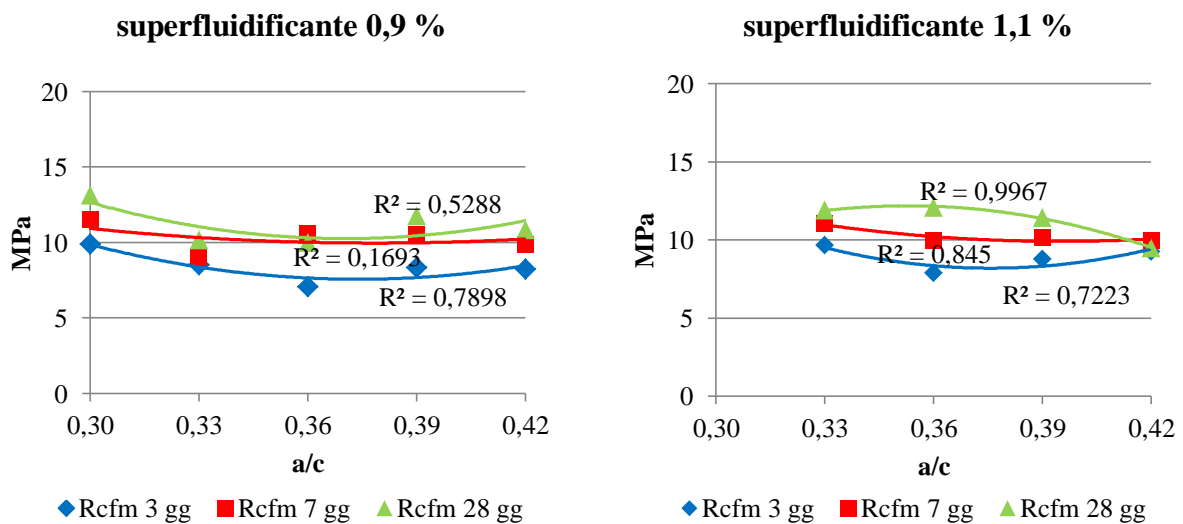


Grafico 6.35 Resistenza a flessione delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

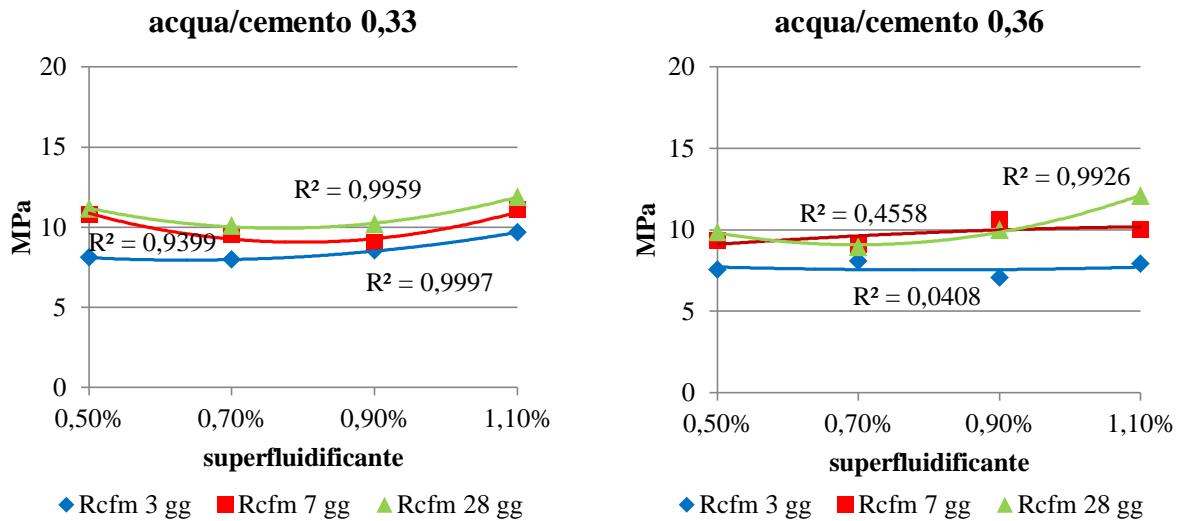


Grafico 6.36 Resistenza a flessione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).

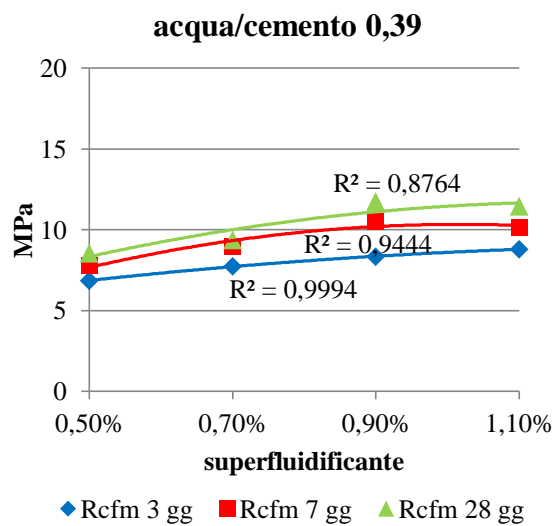


Grafico 6.37 Resistenza a flessione delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

L'andamento della resistenza a flessione è coerente con quello della resistenza a compressione: infatti questa diminuisce all'aumentare del rapporto acqua/cemento e cresce all'aumentare dei giorni di stagionatura e del quantitativo di additivo superfluidificante. Per quanto riguarda la serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9% sia hanno valori di resistenza compresi tra 13,1 MPa e 10,9 MPa, mentre per quella con additivo all'1,1% da 11,9 MPa a 11,5 MPa. Le serie superfluidificante invece presentano valori tra un minimo di 8,6 MPa per la serie con acqua/cemento a 0,39 ad un massimo di circa 12 MPa per le serie con acqua/cemento 0,33 e 0,36.

Prove ultrasoniche - Modulo elastico

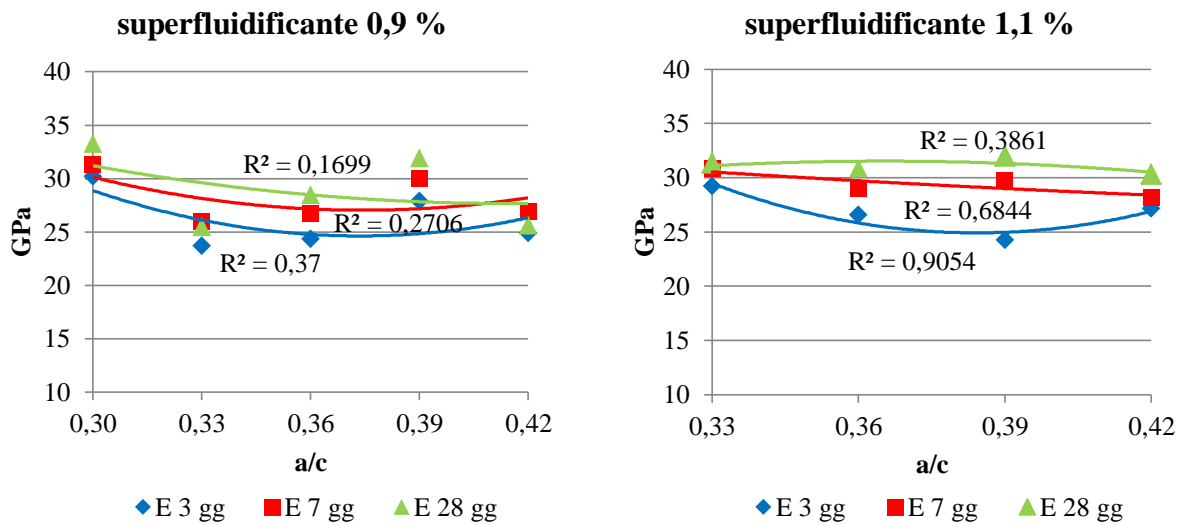


Grafico 6.38 Modulo elastico delle malte delle serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 % (a sinistra) e 1,1 % (a destra).

In entrambi i grafici relativi al modulo elastico delle serie acqua/cemento (Grafico 6.38) si riscontra un andamento leggermente decrescente all'aumentare del rapporto acqua/cemento. I valori per la serie acqua/cemento con superfluidificante allo 0,9% passano, a 28 giorni, da un massimo di 33,3 GPa a un minimo di 25,6, mentre per quella con superfluidificante all'1,1% da 31,3 GPa a 30,0 GPa. Ciò è in linea con quanto già visto nei calcestruzzi, ma si osserva come i valori dei moduli elastici nelle malte siano inferiori.

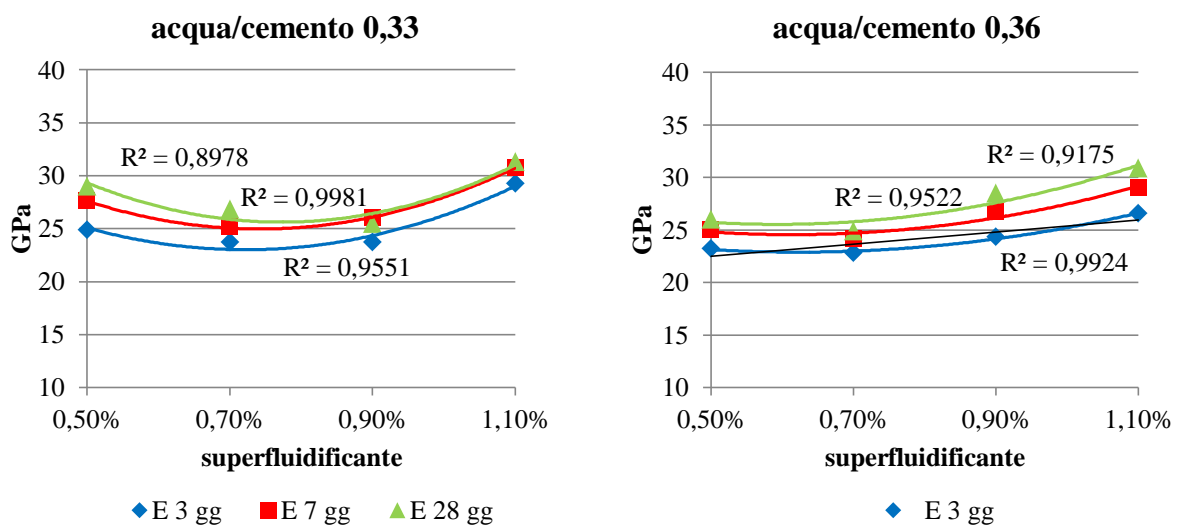


Grafico 6.39 Modulo elastico delle malte delle serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33 (a sinistra) e 0,36 (a destra).

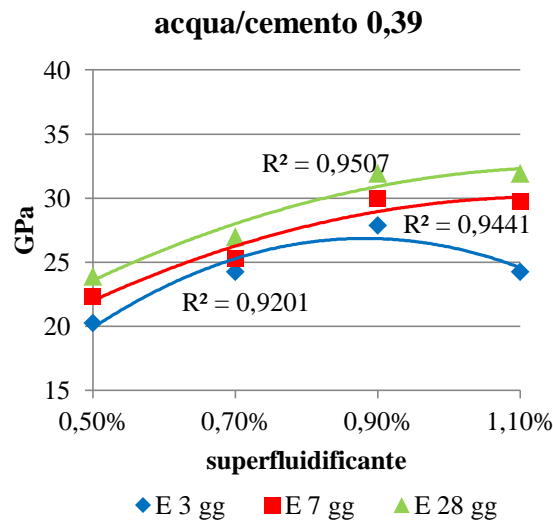


Grafico 6.40 Modulo elastico delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

Anche in questo caso l'andamento del modulo elastico nelle malte è coerente con quello nei calcestruzzi, mostrandosi crescente o al più costante all'aumentare del quantitativo di additivo (Grafico 6.39 e Grafico 6.40). Il valore minimo relativo a queste serie si ha per rapporto acqua/cemento 0,39 e additivo allo 0,5 % e corrisponde a 23,9 GPa, mentre il massimo è 32 GPa con rapporto acqua/cemento 0,39 e additivo all'1,1 %.

Massa volumica

La prova di massa volumica viene utilizzata come controllo sulla corretta composizione di una stessa miscela: quando i valori di due provini con la stessa composizione si discostano di più di 100 g si è scelto di realizzare un terzo provino di controllo. Dopo le rotture a flessione e a compressione si procederà a verificare i risultati: se un provino presenta valori di resistenza a compressione al di fuori del 10 % del valor medio, questo verrà scartato dai risultati. Si riporta in tabella un esempio di masse volumiche di malte fresche relative alla serie acqua/cemento con superfluidificante allo 0,9 %.

Denominazione	M03	M08	M01	M02	M09
Acqua/cemento	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42
Superfluidificante	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%
M.V. Fresco	2265	2052	2115	2263	1958
	2264	2158	2012	2233	2303
	-	2137	2178	-	2200

Tabella 6.14 Massa volumica a fresco di alcune malte.

Com'è possibile notare dalla Tabella 6.14 in tutti i casi eccetto per la malta M02 e la malta M03 è stato necessario confezionare un terzo provino. Per esempio la massa volumica del primo provino e del secondo della malta M08 si discostano di 106 g per cui si è realizzato il

terzo provino. Noto anche il valore di massa volumica di quest'ultimo si comprende che l'errore sta nel confezionamento del primo provino. Ci si riserva comunque di effettuare un controllo sui valori delle resistenze. La massa volumica a 3, 7 e 28 giorni viene utilizzata come ulteriore controllo delle corrette condizioni di stagionatura.

6.5 Confronto sulle resistenze a compressione e sui moduli elastici

Si effettua ora un confronto tra le resistenze e tra i moduli elastici di boiacche, malte e calcestruzzi corrispondenti per comprendere l'influenza dell'aggregato su tali parametri. L'andamento dei grafici per tutte le miscele è simile; se ne riportano quindi solo due per ogni parametro a titolo esemplificativo.

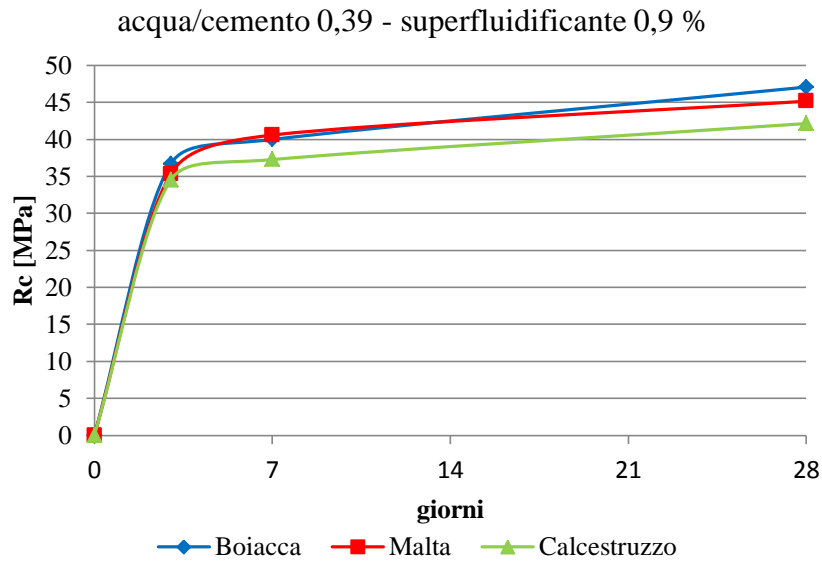


Grafico 6.41 Resistenze a compressione di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,39 e superfluidificante 0,9 %.

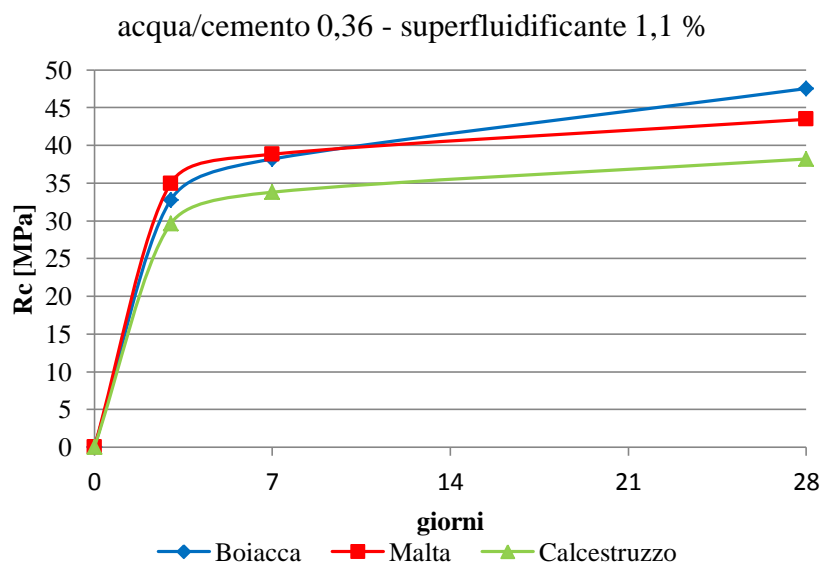


Grafico 6.42 Resistenze a compressione di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,36 e superfluidificante 1,1 %.

Dal Grafico 6.41 e dal Grafico 6.42 è evidente che la resistenza a compressione a 28 giorni della boiaccia è superiore a quella della malta che a sua volta è superiore a quella del calcestruzzo. Infatti la presenza di aggregati e l'aumento delle loro dimensioni crea delle zone di debolezza sulle superfici di contatto tra pasta cementizia e aggregato, causate da un'adesione minore tra due materiali diversi rispetto a quella che si avrebbe in un unico materiale. Inoltre questo fenomeno può anche essere causato dal migrazione dell'aria intrappolata nella zona di contatto tra matrice e aggregato. Il decremento di resistenza è più accentuato tra malte e calcestruzzi proprio per la presenza di aggregati grossi (linea verde più distante dalla rossa rispetto alla blu – Grafico 6.41 e 6.42).

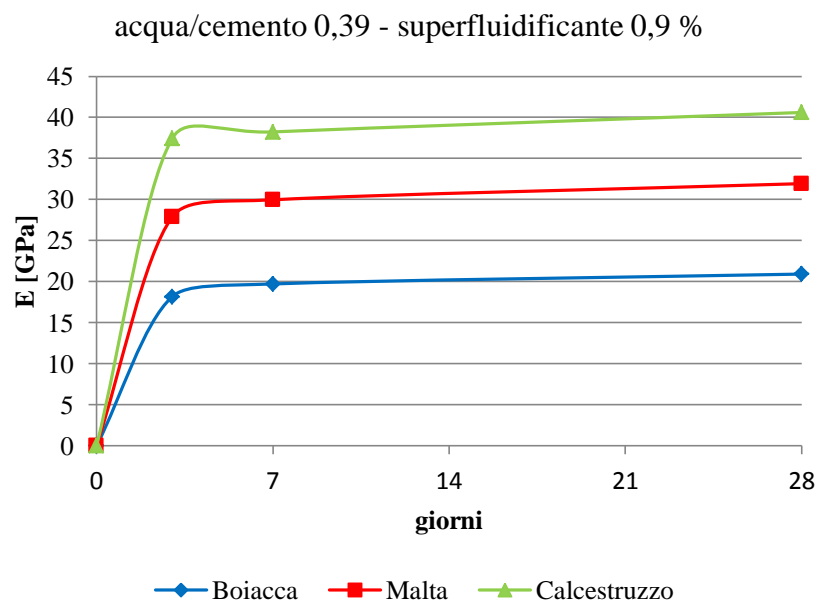


Grafico 6.43 Modulo elastico di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,39 e superfluidificante 0,9 %.

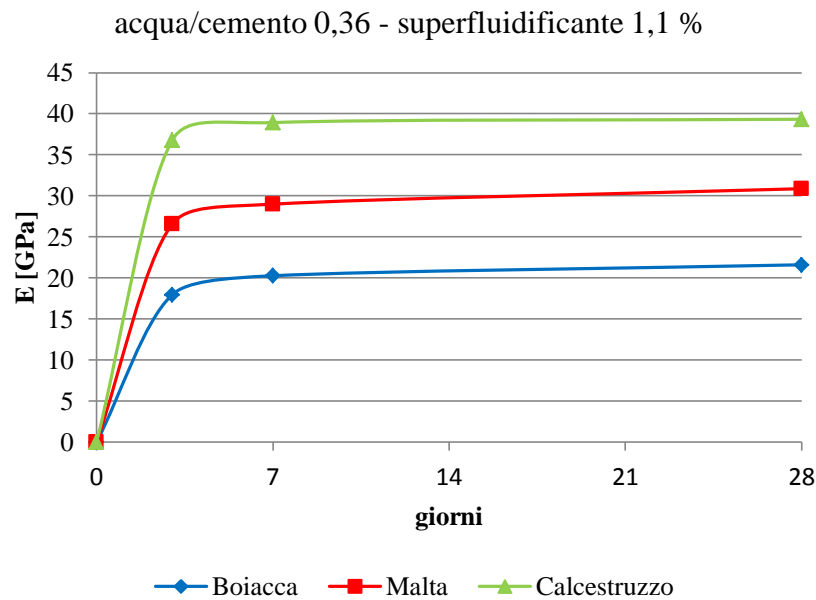


Grafico 6.44 Modulo elastico di boiacche, malte e calcestruzzi con acqua/cemento 0,36 e superfluidificante 1,1 %.

In questo caso si riscontra un andamento opposto rispetto alle resistenze. Infatti i calcestruzzi presentano dei valori di modulo elastico superiori a quelli delle malte a loro volta superiori a quelli delle boiacche. Ciò si verifica perché gli aggregati hanno modulo elastico superiore alla pasta cementizia e, di conseguenza, maggiore è la quantità di aggregati e maggiore sarà il modulo elastico. Questo effetto è dovuto alla velocità di propagazione delle onde ultrasoniche che negli aggregati, compatti e privi di discontinuità, è superiore a quella della pasta cementizia. Nella formula per il calcolo del modulo elastico riportata nel Capitolo 5 si evidenzia come questo sia direttamente proporzionale alla velocità di propagazione elevata al quadrato: quindi il modulo elastico sarà tanto più grande quanto maggiore sarà la velocità degli ultrasuoni. Inoltre la presenza del peso specifico al numeratore nella formula in questione indica che il modulo elastico è direttamente proporzionale alla massa volumica, maggiore nei calcestruzzi rispetto a quella delle malte e delle boiacche.

Dai grafici è evidente come il modulo elastico risenta maggiormente della presenza di aggregati e delle loro dimensioni rispetto alla resistenza a compressione.

6.6 Risultati delle stese con cassero sperimentale

Per ciascuna delle tre serie sono state realizzate tre stese con il cassero sperimentale. Per ciascuna stesa saranno evidenziati i parametri identificativi, un'immagine significativa e verranno svolte le considerazioni del caso. Nelle considerazioni si riportano i valori medi di larghezza, altezza del cordolo, slump verticale e slump orizzontale, come mostrato nel Capitolo 5, misurati nel tratto centrale migliore di lunghezza 2 metri.

Allo scopo di valutare la buona riuscita di ciascuna lastra si sono adottate le seguenti tolleranze:

- Larghezza della lastra 60 ± 1 cm
- Slump verticale 0,6 cm
- Altezza cordolo $9 \pm 0,5$ cm

Per la valutazione dello slump orizzontale non si sono indicate tolleranze in quanto il fenomeno non si è mai verificato, a conferma del corretto proporzionamento della miscela e funzionamento del cassero sperimentale.

È possibile trovare indicate in Appendice G le immagini relative ai difetti cui si farà riferimento, gli aspetti trattati riguardanti la valutazione delle lastre stese con cassero sperimentale e tutti i dati geometrici di ciascuna stesa.

Serie acqua/cemento – superfluidificante 0,9 %

STESA 1A

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m^3
- Acqua/cemento = **0,36**
- Superfluidificante = **0,9 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



Nella realizzazione della stesa si è verificato uno spostamento del vibratore che ha reso invalutabile la messa in opera. Nel tratto migliore si presentano comunque molti strappi e la finitura della lastra risulta medio/bassa. La larghezza media della lastra è di 60 cm quindi non si verifica allargamento della lastra. L'altezza media del cordolo di 8,5 cm con un cedimento di 0,5 cm.

STESA 1B

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,39**
- Superfluidificante = **0,9 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



La valutazione ha inizio dopo 1,7 metri di stesa. La finitura della lastra risulta elevata e senza strappi. La larghezza media è di 60,5 cm (allargamento di solo 0,5 cm), l'altezza media del cordolo è di 8,9 cm e lo slump verticale medio è di 0,6 cm. Tutti i parametri risultano pressoché stabili.

STESA 1C

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,42**
- Superfluidificante = **0,9 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



La valutazione ha inizio dopo 1 metro di stesa. Gli spostamenti/ondulazioni del cassero sperimentale sono indicativi dell'eccessiva fluidità della miscela. Per lo stesso motivo si può osservare una quasi completa chiusura del profilo. La larghezza media della lastra è di 64,2 cm (allargamento di 4,2 cm) e lo slump verticale medio di 2,1 cm. Entrambi i cedimenti non possono essere considerati accettabili. La finitura risulta elevata grazie all'abbondanza di pasta cementizia.

*Serie superfluidificante – acqua/cemento 0,39***STESA 2A**

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,39**
- Superfluidificante = **0,7 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



La valutazione riguarda il tratto successivo ai primi tre metri di stesa. In questa stesa si evidenzia qualche strappo profondo ed una finitura bassa. Il profilo del giunto ha una buona tenuta. La larghezza media della lastra è di 60,3 cm, l'altezza media del cordolo è rimasta di 9 cm e lo slump verticale medio è di 0,7 cm. I parametri sono praticamente stabili rispetto alle dimensioni del cassero, tuttavia la finitura risulta non accettabile.

STESA 2B

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,39**
- Superfluidificante = **0,9 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



La valutazione ha inizio dopo 2,4 m di stesa. La qualità della lastra è molto scadente nonostante l'aumento di additivo superfluidificante. Nella parte finale della stesa si sono riscontrati problemi di vibrazione. La larghezza media della lastra è di 60,1 cm, l'altezza media del cordolo è di 8,7 cm lo slump verticale medio è di 0,4 cm. I parametri dimensionali sono accettabili.

Serie acqua/cemento – superfluidificante 1,1 %

STESA 3A

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,36**
- Superfluidificante = **1,1 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



Durante la stesa un problema al vibratore ha ridotto l'intensità di vibrazione, infatti la lastra risulta completamente strappata. Il profilo è stato delineato solo per 50 cm.

STESA 3B

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,39**
- Superfluidificante = **1,1 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



La lastra è valutata dopo 2 metri dall'inizio della stesa. La finitura è generalmente bassa e la lastra è strappata in più punti. La larghezza media della lastra è di 60 cm, l'altezza media del cordolo è di 8,5 cm e lo slump verticale medio è di 0,4 cm. Le dimensioni misurate restano praticamente stabili.

STESA 3C

- Cem II/A-LL 42,5R 390 kg/m³
- Acqua/cemento = **0,42**
- Superfluidificante = **1,1 %**
- Aerante = 0,12 %
- Sabbia 0/2 = 11 %
- Sabbia 0/8 = 34 %
- Ghiaia 8/20 = 55 %



La lastra è valutata dopo 1,1 m dall'inizio della stesa. A metà della stesa si è aggiunto un secondo vibratore migliorando la qualità della finitura. La larghezza media della lastra è di 60,6 cm, l'altezza media del cordolo è di 9 cm e lo slump verticale medio è di 0,83 cm. I parametri sono influenzati dall'alto rapporto acqua/cemento e dosaggio di superfluidificante

6.7 Considerazioni finali

Il campo prova di lastre di calcestruzzo stese mediante cassero sperimentale ha mostrato come sia possibile ottenere un ottimo risultato in termini di caratteristiche geometrico/meccaniche e di finitura della pavimentazione. Si è individuata come stesa complessivamente migliore la 1B (acqua/cemento 0,39 – superfluidificante 0,9 %) che presenta sia buona finitura superficiale sia parametri geometrici nei limiti delle tolleranze. Le caratteristiche e la finitura della lastra 2B, che ha medesima composizione della 1B, mettono in luce come la stesa di pavimentazioni con il cassero sperimentale non sia semplicemente un problema di proporzionamento della miscela ma riguardi anche velocità di avanzamento, vibrazione, condizioni metereologiche e miscelazione. Infatti, a parità di composizione, la lastra 2B presenta finitura peggiore a causa di un mal funzionamento del vibratore e dell'aggiunta di additivo alla miscela dopo molto tempo dalla produzione del calcestruzzo che, in particolare con climi caldi, non garantisce l'efficacia sulla lavorabilità della miscela.

Per quanto riguarda le problematiche relative alla vibrazione si evidenzia come, nonostante il grado di compattazione indichi una buona vibrazione, la finitura superficiale delle lastre non sia invece soddisfacente. Il vibratore ha infatti un'area di influenza teorica pari almeno alla sezione della lastra estrusa ma, come già esposto, l'ampiezza di vibrazione decade esponenzialmente con la distanza. Anche il manuale Wirtgen suggerisce, per una sufficiente ed omogenea intensità di vibrazione, la sovrapposizione delle aree di influenza di vibratorii contigui ponendoli a 36 cm di distanza e la presenza di un vibratore a 12,5 cm dal bordo del cassero. La qualità della finitura delle lastre, quindi, risente di una insufficiente intensità di vibrazione al bordo del cassero, ancora più evidente per le miscele più asciutte. Ciò è confermato dall'analisi visiva della finitura, che risulta sempre peggiore nei rettangoli valutati in prossimità del corolo rispetto a quelli nel centro della lastra.

Si può osservare inoltre come in alcune lastre, ad esempio la 3C, i calcestruzzi siano meno fluidi di quanto ci si potrebbe aspettare, paragonati a quelli di altre lastre aventi quantitativi di additivo superfluidificante o di acqua minori. Questo comportamento è dovuto alla perdita di lavorabilità già evidenziata nelle prove sul calcestruzzo fresco come ad esempio l'abbassamento al cono di Abrams, lo spandimento su tavola a scosse e l'indice di compattabilità. Per questa ragione le specifiche da fornire per la caratterizzazione delle proprietà del calcestruzzo fresco saranno riferite a prove da effettuarsi al momento del getto.

A conferma di ciò si vuole sottolineare come i risultati delle stese con cassero sperimentale non fossero prevedibili: infatti i test di laboratorio iniziali avevano individuato nella miscela con un rapporto acqua/cemento pari a 0,33 quella più idonea alla stesa con questo tipo di macchinari.

Dalla Tabella 6.15 si evidenzia come effettivamente i parametri relativi alle prove sul calcestruzzo fresco realizzato in laboratorio corrispondano a quelli delle prove al momento del getto sul calcestruzzo della stesa migliore (acqua/cemento 0,39, superfluidificante 0,9 %).

	Superfluidificante 0,9%	
	a/c 0,33 Lab	a/c 0,39 Slip
Slump [cm]	1,5	1,5
DIN [cm]	27	27,5
Indice di compattabilità	1,25	1,23

Tabella 6.15 Confronto della reologia della stesa del calcestruzzo con acqua/cemento 0,33 realizzato in laboratorio e il calcestruzzo con acqua/cemento 0,39 steso con cassero sperimentale.

Analizzando i risultati ottenuti dalle stese si possono trarre le seguenti indicazioni sulla reologia del calcestruzzo fresco per la messa in opera cassero sperimentale:

- Classe di consistenza tramite prova di abbassamento al cono di Abrams: S1.
- Classe di consistenza tramite spandimento su tavola a scosse: F1
- Classe di consistenza tramite indice di compattabilità tra: C1 e C2 (attorno a 1,25)

Al fine di effettuare un corretto mix design del calcestruzzo per slip-form, seguendo le indicazioni fornite da ETL 97-5 per il proporzionamento della curva degli aggregati (coarsness factor compreso tra 63 e 75, workability factor compreso tra 29 e 35), fissato il dosaggio di cemento pari a 390 kg/m^3 e utilizzando fibre in polipropilene fibrillato di 6 mm per garantire la stabilità dei profili estrusi, si consiglia il rispetto dei seguenti parametri di progetto:

- rapporto acqua/cemento di circa 0,39 garantendo la reologia del fresco e la resistenza richiesta.
- spandimento della malta corrispondente compreso tra 150 % e il 170 %
- viscosità della boiaccia corrispondente compreso tra 250 e 350 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ a tempo 0' e tra 300 e 400 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ a tempo 15'.

Si noti come alcuni di questi valori siano conformi alle prescrizioni per il calcestruzzo destinato alla stesa tramite slip-form del piazzale cargo dell'aeroporto di Malpensa, descritte nell'Analisi Bibliografica.

Considerati gli elevati standard di resistenza richiesti oggi giorno alle pavimentazioni stradali ed aeroportuali se ne è effettuato uno studio sui calcestruzzi presi in esame.

Come evidenziato dal confronto tra boiacche, malte e calcestruzzi, a parità di altre condizioni, più l'aggregato è grosso maggiore è la probabilità di trovare zone di frattura tra pasta e aggregato. D'altro canto aumentando i fini aumenta la richiesta di acqua (a pari consistenza) e quindi diminuisce la resistenza. Perciò, qualora fossero necessari incrementi di resistenza senza modificare i materiali impiegati, è possibile ridurre il rapporto acqua/cemento ed aumentare il dosaggio di additivo. Entrambi, come mostrato dalle prove, incrementano le resistenze, il primo per la riduzione della porosità capillare, il secondo per l'aumento del grado di idratazione dato dalla migliore dispersione del cemento in acqua.

CAPITOLO 7

Conclusioni e sviluppi futuri

In questa tesi sono stati svolti degli studi sul calcestruzzo da utilizzarsi con finitrici a casseformi scorrevoli. Nella prima parte dell'elaborato si è svolta un'analisi bibliografica sulle esperienze, soprattutto all'estero, e sugli studi già effettuati in questo campo. Dopo aver compreso il funzionamento delle finitrici a casseformi scorrevoli (slip-form), in particolare nella realizzazione di pavimentazioni in ambito stradale o aeroportuale, si sono approfonditi gli aspetti teorici alla base del suo funzionamento. Dalle considerazioni emerse si è ritenuto insufficiente lo studio della reologia della miscela attraverso le sole prove normate, non avendo riscontro con la reale messa in opera con slip-form. È stata quindi valutata la necessità di svolgere dei campi prova attraverso un prototipo di cassero scorrevole che simuli, in dimensioni ridotte, una reale slip-form. La realizzazione, l'utilizzo e la valutazione del risultato di questo cassero sperimentale ha richiesto uno studio adeguato per considerare o eliminare fattori di incongruenza con la macchina reale. Effettuato ciò, si sono potute comprendere le principali interazioni tra il cassero sperimentale ed il calcestruzzo. Due parametri nello specifico, governabili dall'operatore di macchina, possono influire sul risultato finale in funzione anche della reologia della miscela: la regolarità e velocità di avanzamento e l'intensità di vibrazione. Questo aspetto è stato anche dimostrato nei campi prova con cassero sperimentale quando si sono verificati problemi nelle vibrazione e nella conduzione della macchina. Per ridurre la grande variabilità che influenza il risultato finale si è fissata una velocità di avanzamento ed un'intensità di vibrazione secondo la media delle applicazioni reali.

La reologia di una miscela di calcestruzzo per questo tipo di applicazioni dipende da tanti aspetti differenti: alcuni sono stati affrontati in precedenti pubblicazioni e assunti per validi, come ad esempio la composizione della curva degli aggregati secondo le indicazioni dell'ETL 97-5 e l'intensità di vibrazione secondo quanto indicato in ACI 309R-96. Il mix design della miscela è stato invece realizzato con quattro rapporti acqua/cemento (0,33 – 0,36 – 0,39 –

0,42) e con quattro dosaggi di additivo superfluidificante (0,5 % - 0,7 % - 0,9 % - 1,1 %). Sono state anche testate le malte e le boiacche corrispondenti.

Dalle prove di consistenza sul calcestruzzo fresco è emerso che per miscele così asciutte la perdita di lavorabilità, nonostante l'utilizzo di additivo superfluidificante, è tale da condizionare il risultato della stesa come evidenziato nel campo prova sperimentale. Le prescrizioni sul calcestruzzo sono pertanto da riferirsi al momento del getto. Dall'analisi dei risultati risulta consigliabile prescrivere al momento del getto una classe di consistenza S1, F1 e tra C1 e C2 per calcestruzzi destinati a questo tipo di applicazioni.

La consistenza del calcestruzzo fresco e delle malte in laboratorio possono essere utili nella fase di mix design. Le indicazioni sullo spandimento delle malte introducono il fattore aggregato fine nella reologia della miscela. Nonostante il proporzionamento degli aggregati sia stato mantenuto costante nella presente ricerca, è possibile trarre da questa prova indicazioni per la correzione del mix design del calcestruzzo in funzione della natura litologica e delle curve granulometriche degli aggregati fini a disposizione. Dallo studio emerge come lo spandimento non vari linearmente con l'aumento di acqua e additivo ma, in corrispondenza di uno stesso dosaggio di superfluidificante, vi sia un contenuto d'acqua che ne migliora le sue specifiche funzionalità. Inoltre è stato individuato un intervallo ottimale di variazione dello spandimento delle malte corrispondenti a calcestruzzi destinati alla messa in opera tramite slip-form, utile ai fini di progettazione.

In merito alla viscosità delle boiacche corrispondenti risulta che questa sia fortemente influenzata dalla variazione del rapporto acqua/cemento e del dosaggio di additivo superfluidificante. Si denota come la modifica del rapporto acqua/cemento influisca maggiormente sulla viscosità rispetto al dosaggio di additivo superfluidificante, anche se quest'ultimo permette minori variazioni di viscosità nel tempo, quindi di consistenze delle miscele di calcestruzzo, a favore delle pratiche di cantiere. Anche in questo caso si è individuato un intervallo ottimale di variazione della viscosità in fase di progettazione.

Nell'analisi delle resistenze, molto importanti per gli standard richiesti nelle moderne pavimentazioni, si è osservato una leggera crescita con l'aumento di dosaggio di additivo superfluidificante e una netta riduzione a fronte dell'incremento del rapporto acqua/cemento. Interessante è invece il confronto tra le resistenze e i moduli elastici di malte, boiacche e calcestruzzi che esprime l'influenza dell'aggregato su queste proprietà. Nonostante, con le attuali conoscenze dei cementi e delle relazioni fondamentali del mix design, non sia difficile il raggiungimento della classe di resistenza progettuale, ciò non è altrettanto scontato se il calcestruzzo viene messo in opera mediante slip-form. Dal confronto tra le resistenze dei cubi e delle carote delle lastre stese con cassero sperimentale e dal loro grado di compattazione si evince come sia possibile il raggiungimento di un buon grado di costipazione e di resistenza, almeno nella zona centrale da cui vengono estratte le carote.

La finitura superficiale delle stese con cassero sperimentale non raggiunge l'ottimo livello qualitativo che si potrebbe ottenere con gli strumenti in dotazione alle reali slip-form ed evidenzia una probabile carenza di vibrazione nelle zone laterali del cassero, dovuta all'assenza di un secondo vibratore.

I dati ottenuti e riportati in questa trattazione rappresentano una prima significativa informazione, soggetta a possibili ulteriori sviluppi, riguardo ai tanti fattori che influenzano la buona riuscita della messa in opera con l'utilizzo di finitrici a casseforme scorrevoli e soprattutto all'individuazione delle linee guida per definire degli intervalli di variabilità considerati accettabili. Nel prosieguo di questo studio è necessario, in primo luogo, validare i risultati ottenuti attraverso una slip-form reale. Si suggerisce poi di indagare le possibilità di variazione della natura litologica e della forma (tondeggianti o frantumata) dell'aggregato, il contributo del dosaggio e della tipologia delle fibre e l'influenza della frequenza e dell'ampiezza della vibrazione sulla massa in opera del calcestruzzo. Infine si dovrà affrontare il problema di pavimentazioni in calcestruzzo esauste e delle possibilità di riciclaggio, anche direttamente in opera, ai fini della salvaguardia ambientale.

Appendice A

Schede tecniche dei materiali



Denominazione commerciale		Diam. di Rif.		Curva tipica (passante %)	Stacci / Dimensione Aggregato		
Sabbia		12620	13139 13043 13242				
	07	Provenienza	Serie stacci	Serie di base	100,00	125	
		Deposito	Scheda tecnica di prodotto n°	1005	100,00	90	
		Origine	Naturale	Lavorazione	Non frantumato	100,00	80
		Data	13-giu-14	DdT numero		100,00	63
						100,00	56
1305 - CPD - 0384		DoP N°1 - FT.CPR 305/2011 All. III				100,00	45
Descrizione Petrografica						100,00	40
Descrizione Petrografica Componenti Litici : Rocce carbonatiche prevalenti, subordinati gneiss, graniti e scisti.						100,00	31,5
						100,00	25
						100,00	22,4
						100,00	20
						100,00	16
						100,00	14
						100,00	12,5
						100,00	11,2
						99,89	10
		97,56	8				
		92,83	6,3				
		89,29	5,6				
		79,97	4				
		58,17	2				
		39,38	1				
		24,81	0,5				
		12,59	0,25				
		5,31	0,125				
		3,20	0,063				
			0				
Note:		Aggregati per calcestruzzo	Aggregati per malte	Aggregati per miscele bituminose	Aggregati per materiali legati e non e per opere civili e stradali		
Tolleranze sulla distribuzione granulometrica tipica nei limiti previsti (EN 12620 prosp.4 e prosp.5 - EN 13139 prosp.2)		Sigla identificativa della prova / Unità di misura	UNI EN 12620:2008	UNI EN 13139:2003	UNI EN 13043:2004	UNI EN 13242:2008	
REQUISITI GEOMETRICI							
Granulometria	AG	NATURALE 0/8	CP	FRAZIONE UNICA	FRAZIONE UNICA		
Dimensione	d/D (mm)	0/8	0/8	0/8	0/8		
Categoria	cat.	Gng90		Ga90 Gtc10	Ga85 Gta20		
Indice di forma dei granuli / particelle	SI	SI nr		SI nr	SI nr		
Coefficiente di appiattimento	FI	FI nr	NPD	FI nr	FI nr		
Particelle schiacciate / superfici frantum	C - (%)			C nr			
Massa volumica dei granuli	Pssa / Pdry (Mg/mc)	2,665	2,665	2,634	2,665		
Assorbimento	WA (%)	1,18	1,18	WA24 2	WA24 2		
PULIZIA							
Contenuto fini (polveri)	f	f 10	categoria 2	f 3,2	f 5		
Qualità dei fini (equivalente in sabbia)	SE	82	82	82	82		
Qualità dei fini (blu di metilene)	MB	NPD	NPD	MBf nr	NPD		
Affinità ai leganti bituminosi	6h 24h						
Contenuto di conchiglie	Cc	SC nr	NPD				
Contenuto di arumi di argilla e partic. friabili							
REQUISITI FISICI							
Resistenza alla frammentaz / frantumaz	LA	LA nr		LA nr	LA nr		
Resistenza alla frammentazione per urto	SZ	SZ nr		SZ nr	SZ nr		
Resistenza alla usura superficiale	Mde	Mde nr		Mde nr	Mde nr		
Resistenza alla levigabilità	VL - PSV	VL nr		PSV nr			
Resistenza alla abrasione superficiale	AAV	AAV nr		AAV nr			
Resistenza alla abrasione pneumat.chiod	An	An nr		An nr			
Resistenza allo shock termico	ShK.Term.						
REQUISITI CHIMICI							
Cloruri	Cl-	0,005	0,005				
Solfati solubili in acido	SO ₄ ⁻	AS0,2	AS0,2		AS0,2		
Solfati idrosolubili di aggregati riciclati	SO ₄ ric						
Zolfo totale	S	0,021	0,021		S1		
Componenti che alterano la velocità di presa ed indurimento del calcestruzzo, nelle malte, nelle miscele con leganti idraulici	sost.umica acido fulvico resis.comp. impur.organ	Più chiara NPD NPD NPD	Più chiara NPD NPD NPD		NPD NPD		
Contenuto in carbonato	CO ₃	2,19					
DURABILITA' ALLA REAZIONE ALCALI SILICE							
Reattività alcali silice	ASR (%)	0,044	0,044				
Prova di confronto con cls a caratter. note	Comparativa						
DURABILITA' AI CICLI DI GELO E DISGELO							
Resistenza al gelo / disgelo		F2	1,179	F2	F2		
Solfato di Magnesio	MgSO ₄	MS nr		MS nr	MS nr		
STABILITA' DI VOLUME							
Stabilità di volume - Ritiro per essiccamento		NPD	NPD	NPD	NPD		
Costituenti che alterano la stabilità di volume della scoria di acciaieria o di alto forno	disint. silicato dicalcico disint del ferro	NPD NPD	NPD	NPD NPD	NPD NPD		
SOSTANZE PERICOLOSE							
Emissione di radioattività	U	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE		
Rilascio di metalli pesanti	Cr-Pb-Cd-Hg-As	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE		
Rilascio di idrocarburi poliaromatici	IPA	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE		
Rilascio di carbonio poliaromatico	C poli	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE		
Rilascio di altre sostanze pericolose	X	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE	NEI LIMITI DI LEGGE		
DURABILITA' AGLI AGENTI ATMOSFERICI							
Sonnenbrand del basalto	Sonn. Bas			SB nr	SB nr		

Figura A.2 Scheda tecnica della sabbia 0/8.

Schede tecniche degli additivi

**ADDITIVO MULTIFUNZIONALE PER CLS AD ELEVATA CONSISTENZA
ED APPLICAZIONI CON SLIP-FORM**

**CE approved – Certificato n. 1305 - CPD - 0017
EN 934-2 T3.1/T3.2**

Descrizione [redacted] è un formulato innovativo con molecole multifunzionali con funzione disperdente - viscosizzante in sistemi a bassissimo rapporto A/C.

Vantaggi ed Indicazioni di impiego [redacted] particolarmente studiato per la tecnologia dei cls ad alta consistenza applicati con SLIP-FORM, consente i seguenti vantaggi :

- con bassissimi rapporti A/C ed elevata consistenza (S1) consente la reologia mobile e l'omogenea compattazione di calcestruzzi opportunamente formulati e prequalificati e posati con il sistema SLIP-FORM.
- viene facilitata la "REOLOGIA DINAMICA" con questi sistemi di posa.
- i calcestruzzi così ottenuti (ed opportunamente stagionati) consentono il contenimento del ritiro e l'eliminazione delle fessurazioni plastiche ed igrometriche.
- massima durabilità nelle condizioni di esercizio e di esposizione ambientale (aeroporti, piazzali, strade, etc.) ; raccomandata l'applicazione dell'impregnante reattivo [redacted] dopo 1-3 giorni dalla stesura
- incremento resistenze alle brevi stagionature (24 h) per il taglio dei giunti
- compatibile con [redacted] per l'ottenimento di Shrinkage Free Concrete – Calcestruzzi Senza Ritiro

Metodo d'uso Per la massima efficacia non utilizzare aggregati asciutti ma solamente aggregati già saturi d'acqua. La curva granulometrica e la tipologia degli aggregati deve essere preventivamente determinata e seguita da prequalifica in laboratorio e cantiere.

Dosaggio 1,0% ÷ 1,6% riferito al peso del cemento utilizzato.

Confezioni Sfuso autocisterna, fusti da 220 Kg, cisternette da 1000 Kg, taniche da 20 Kg

Stoccaggio Conservare a temperature comprese fra +3°C e +35°C. Evitare il gelo ed il surriscaldamento del prodotto da irradiazione solare diretta. In caso di stoccaggi lungamente protratti si consiglia l'utilizzo di gorgogliatori d'aria o di una miscelazione prima dell'utilizzo. Il prodotto, se idoneamente conservato, mantiene le sue caratteristiche fino a 12 mesi.

Raccomandazioni: Come tutti i formulati poliacrilici, il prodotto rimanendo a lungo fermo nei recipienti di stoccaggio, tende a separare (in maniera più accelerata con le temperature elevate) verso l'alto le funzioni omogeneizzanti e antischiuma contenute nella formulazione. Si raccomanda perciò l'utilizzo di "gorgogliatori" ad aria onde mantenere il prodotto omogeneo. Eventualmente richiedere ns. supporto Tecnico per ovviare a tale problema od installare una ns. cisterna con predisposto gorgogliatore.

Figura A.4 Scheda tecnica dell'additivo superfluidificante.

AERANTE PER CALCESTRUZZI AD ELEVATA STABILITA'

**CE approved – Certificato n. 1305 - CPD - 0017
EN 934-2 T5**

- Descrizione e vantaggi** E' un prodotto liquido formulato da acidi resinici saponificati in modo tale da provocare nel calcestruzzo, con funzione tensioattiva, la formazione di bolle d'aria ad elevata stabilità e di dimensioni comprese nell'intervallo ottimale di 0,05 / 0,4 mm.
Si ottiene di conseguenza un miglioramento della lavorabilità degli impasti, la riduzione della permeabilità all'acqua, della segregazione e del "bleeding" ed un notevole incremento sia della resistenza ai cicli di gelo-disgelo che alla cristallizzazione dei sali decongelanti.
L'uso del [] consente inoltre una ottima lavorabilità ai conglomerati poveri di parti fini, nella lavorazione di manufatti vibrocompattati o girocompressi (blocchi, tubi, ecc.), e negli impasti contenenti inerti leggeri.
- Avvertenze** Evitare lo stoccaggio a temperature inferiori a 0° C.
- Confezioni** Tanica da 20 Kg.
Fusto da 220 Kg.
- Stoccaggio** Il prodotto si conserva per almeno 1 anno se stoccato in luogo asciutto, in confezioni originali, con temperature comprese tra +1 °C e +35 °C.
- Dosaggi** Per l'esatto computo dell'aria introdotta si consiglia di eseguire test preliminari sugli impasti particolari.
Il dosaggio comunque può essere considerato compreso tra un minimo di 15 ml ed un massimo di 100 ml per quintale cemento a seconda del quantitativo d'aria da introdurre. In casi particolari possono essere usati anche dosaggi maggiori.
Il prodotto è compatibile con gli additivi fluidificanti e superfluidificanti di nostra produzione purché dosato separatamente (in betoniera all'atto dell'impasto).
- Specifiche** Lo [] risponde ai requisiti contenuti nella normativa EN 934-2 prospetto T5 e possiede la marcatura CE relativa agli additivi per calcestruzzo. Le sue prestazioni, inoltre, rispondono e superano i limiti imposti da tutte le normative applicabili alla tecnologia del calcestruzzo.
- Indicazioni di pericolo** Leggere attentamente le istruzioni evidenziate sulle confezioni ed eventualmente richiederci la scheda di sicurezza relativa al prodotto.

Figura A.5 Scheda tecnica dell'additivo aerante.

Scheda tecnica delle fibre

FIBRE POLIPROPILENE PER EDILIZIA

Descrizione Le FIBRE [] aggiunte alle malte o calcestruzzi incrementano la tixotropia e riducono le fessurazioni allo stato plastico.
Le FIBRE [] si producono nel processo continuo di estrusione dei granuli poliolefinici. Il materiale estruso viene scaldato, stirato per migliorare la tenacità, spalmato e poi tagliato in fibre da 12 o 18 mm.

Campi di applicazione

- pavimentazioni industriali e civili
- pavimentazioni per silos e piscine
- prefabbricati
- malte da riparazione
- strade
- calcestruzzi leggeri

Stoccaggio Tenere in ambiente coperto secco e pulito

Confezioni 20 sacchi idrosolubili da 0,9 Kg in scatole da 18 Kg

Caratteristiche tecniche (valori tipici)

• materiale	Propilene fibrillato
• densità	910 g/l
• diametro	34 / 48 µ
• colore	Bianco
• modulo di elasticità	3500 – 3900 N/mm ²
• punto di fusione	160 – 170 °C
• temperatura di accensione	> 560 °C
• resistenza chimica	Ottima, specialmente contro gli alcali

a) lavorabilità dell'impasto
I test dimostrano che le FIBRE [] aumentano l' apparente coesione e riducono leggermente la mobilità del calcestruzzo. Il test di assestamento può essere usato come indicatore generale dell'impasto contenente le FIBRE [] .

b) assorbimento dell'acqua
L'uso delle FIBRE [] , limitando le fessurazioni allo stato plastico, riduce l'assorbimento dell'acqua nel calcestruzzo incrementando la resistenza alla penetrazione delle sostanze aggressive contenute nell'acqua, come per es. i sali antigelo.
Le FIBRE [] aumentano la resistenza al gelo/disgelo grazie ad una migliore omogeneità dell'impasto.

c) abrasione
FIBRE [] aumentano la resistenza contro lo stress meccanico e l'abrasione.

d) impatto
Il calcestruzzo contenente le FIBRE [] , consente migliori resilienze.

Figura A.6 Scheda tecnica delle fibre polipropileniche pag. 1.

e) chimico

Le FIBRE [] di origine poliolefinica, sono resistenti agli alcali ad a molte aggressioni chimiche.

f) fuoco

Con le FIBRE [] il calcestruzzo incrementa l'integrità strutturale in occasione di incendi. Le fibre, bruciando, consentono la fuoriuscita dei vapori surriscaldati altamente distruttivi.

g) estetica superficiale

Le FIBRE [] migliorano l'estetica superficiale mantenendo invariata la durezza

h) comportamento alle aggressioni chimiche

<i>verso gli ACIDI</i>	20 °C	60 °C
Acido idroclorico	+	+
Acido nitrico 25 %	+	+
Acido acetico 50 %	+	+
Acido lattico 90 %	+	+
Fluoro idrogenato 40 %	+	+
Acido fosforico	+	+
Acido solforico	+	+
<i>verso SOLUZIONI ALCALINE</i>		
Idrossido di potassio 50 %	+	+
Idrossido di sodio 50 %	+	+
<i>verso SALI (soluzioni sature)</i>		
Carbonato di sodio	+	+
Solfato di ammonio	+	+
Cloridrato di sodio	+	+
Solfato di sodio	+	+
Sali di zinco	+	+
Sali di rame	+	+
Fosfati di sodio	+	+
Sali ferrici	+	+
<i>verso ALTRI MINERALI</i>		
Acqua marina	+	+
Olio (da tavola)	+	0
Olio minerale (senza componenti aromatici)	+	0
Tetracloruro di carbonio	0	+

+ = forte 0 = limite di resistenza - = debole

Indicazioni di pericolo Leggere attentamente le istruzioni evidenziate sulle confezioni ed eventualmente richiederci la scheda di sicurezza relativa al prodotto.

Figura A.7 Scheda tecnica delle fibre polipropileniche pag. 2.

Appendice B

Programma prove

Politecnico di Milano

Indagini e prove per il mix design del calcestruzzo per slip-form testato con cassero sperimentale

1. Analisi preventive sui materiali

Aggregati:		
Curve granulometriche per singole pezzature		
Dimensione massima consigliata dell'aggregato	37,5 mm – 25 mm – 19 mm [in ETL 97-5 consigliato 19 mm per condizioni severe di esposizione]	ETL 97-5
Fuso inferiore e superiore	Sono disponibili curve granulometriche di precedenti lavori realizzati in aeroporti o da pregresse esperienze	
Valutazione del contenuto di fini	passante 0,063 ≤ 3% (non frantumato) ≤ 10% (frantumato alluvionali) ≤ 16% (frantumato roccia) oppure SE ≥ 80 (non frantumato) ≥ 70 (frantumato)	UNI 8520-2 UNI EN 933-8
Los Angeles per aggregati grossi (> 4 mm)	≤ LA ₉₀	UNI EN 1097-2
Gelo/Disgelo per aggregati grossi (> 4 mm)	Assorbimento d'acqua ≤ 1% per cls in classe XF [Se superato si consiglia per cls in classe XF categoria di resistenza al gelo ≤ F2]	UNI EN 12620 UNI 8520-2 UNI EN 1097-6 UNI 1367-1 (UNI 1367-5)
Massa volumica per pezzatura		UNI EN 1097-6
Percentuale di assorbimento per pezzatura		UNI EN 1097-6
Fineness modulus (FM) sulla curva cumulata	consigliato FM > 2,35 [calcolato con setacci USAF CRD C-104-80 e ASTM C33]	UNI EN 12620 - Annex B [NB: la norma UNI utilizza una serie di setacci leggermente differente]
Coarseness factor (CF) sulla curva cumulata	Ottimo zona A [ETL 97-5]	
CF = (% trattenuto al setaccio 9.5 mm / % trattenuto al setaccio 2.36 mm) * 100		
Workability factor (WF) sulla curva cumulata		
WF = % passante 2.36 mm		

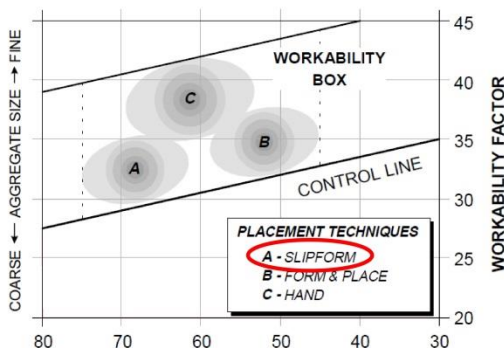


Figura B.1 Programma prove sperimentali pag. 1

Cemento:																																																													
Dosaggio	<p>consigliato da ETL 97-5: $> 335 \text{ kg/m}^3$ oppure $> 307 \text{ kg/m}^3 + 15\text{-}25\%$ ceneri volanti</p> <p>consigliato da UNI EN 206: $> 340 \text{ kg/m}^3$ se di classe XF4</p> <p>consigliato da UNI 11104: $> 360 \text{ kg/m}^3$ se di classe XF4</p>	UNI EN 206 Annex F (Dosaggio funzione della classe di esposizione)																																																											
Aggregati + Cemento:																																																													
Curve granulometriche di riferimento: Fuller – Bolomey - Cubica	Vedere anche la curva di riferimento utilizzata per pavimentazioni aeroportuali svizzere																																																												
Acqua:																																																													
Quantità	<p>Regola di Lyse (vedi tab. Collepardi, "Il nuovo calcestruzzo", ENCO)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Diametro (mm)</th> <th colspan="5">Richiesta d'acqua (kg/m³) per classe di consistenza</th> </tr> <tr> <th>S1</th> <th>S2</th> <th>S3</th> <th>S4</th> <th>S5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>8</td><td>195</td><td>210</td><td>230</td><td>250</td><td>255</td></tr> <tr><td>16</td><td>185</td><td>200</td><td>220</td><td>240</td><td>245</td></tr> <tr><td>20</td><td>180</td><td>195</td><td>215</td><td>225</td><td>230</td></tr> <tr><td>25</td><td>175</td><td>190</td><td>210</td><td>215</td><td>225</td></tr> <tr><td>32</td><td>165</td><td>180</td><td>200</td><td>210</td><td>220</td></tr> <tr><td>63</td><td>140</td><td>155</td><td>175</td><td>185</td><td>190</td></tr> <tr><td>125</td><td>125</td><td>140</td><td>155</td><td>165</td><td>170</td></tr> <tr><td>160</td><td>120</td><td>135</td><td>150</td><td>160</td><td>165</td></tr> </tbody> </table> <p><i>Nota: i valori di acqua di impasto vanno ridotti di 10 kg/m³ per inerti alluvionali tondeggianti ed aumentati di 10 kg/m³ per inerti di frantumazione</i></p> <p>Rispettando $a/c < 0,45$ [$< 0,42$ secondo Minnesota Concrete Flatwork Specifications] secondo UNI EN 206 (classe XF4)</p>		Diametro (mm)	Richiesta d'acqua (kg/m ³) per classe di consistenza					S1	S2	S3	S4	S5	8	195	210	230	250	255	16	185	200	220	240	245	20	180	195	215	225	230	25	175	190	210	215	225	32	165	180	200	210	220	63	140	155	175	185	190	125	125	140	155	165	170	160	120	135	150	160	165
Diametro (mm)	Richiesta d'acqua (kg/m ³) per classe di consistenza																																																												
	S1	S2	S3	S4	S5																																																								
8	195	210	230	250	255																																																								
16	185	200	220	240	245																																																								
20	180	195	215	225	230																																																								
25	175	190	210	215	225																																																								
32	165	180	200	210	220																																																								
63	140	155	175	185	190																																																								
125	125	140	155	165	170																																																								
160	120	135	150	160	165																																																								
Acqua + cemento + aggregati																																																													
Prova di viscosità su boiaccia (viscosimetro Brookfield)	Nessun dato numerico disponibile in letteratura. Si ritiene comunque molto utile la conoscenza della viscosità ai fini della presente ricerca																																																												
Prova di spandimento delle malte		UNI EN 196-1 UNI EN 1015-3																																																											
Determinazione del modulo elastico (E) con prova ultrasonica	Fare su tutti i provini con differenti tempi di maturazione	UNI EN 12504-4																																																											
Prova di resistenza a compressione e a flessione di boiacce e malte su prismi 4x4x16		UNI EN 196-1																																																											
Additivi:																																																													
Contenuto d'aria	<p>consigliato da UNI EN 206: $> 4\%$ se di classe XF4</p> <p>consigliato da UNI 11104: $> 3\%$ se di classe XF4</p>																																																												
2. Prove su calcestruzzo fresco																																																													
Prova di slump con cono di Abrams	Verifica classe S1 (10-40 mm)	UNI EN 12350-2																																																											

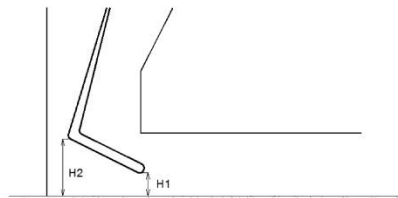
Figura B.2 Programma prove sperimentali pag. 2.

Indice di compattabilità		UNI EN 12350-4
Prova di spandimento su tavola a scosse	<i>Classi da F1 a F6 da verificare in funzione dei mix</i>	UNI EN 12350-5
Contenuto d'aria - Metodo per pressione		UNI EN 12350-7
Determinazione del contenuto d'acqua		UNI 11201
Massa volumica		UNI EN 12350-6

3. Prove su calcestruzzo indurito

Prova di resistenza a compressione su cubetto (R_{ck}) a 3-7-28 giorni di maturazione	<i>Almeno due prove per ogni tempo di maturazione</i>	UNI EN 12390-3
Determinazione del modulo elastico (E) con prova ultrasonica	<i>Fare su tutti i provini con differenti tempi di maturazione per avere indicazione dell'evoluzione della rigidità del cls nel tempo (prova non distruttiva)</i>	UNI EN 12504-4 Confronto con il valore calcolato secondo NTC 2008 e secondo AASHTO
Massa volumica	<i>Su tutti i provini prima della rottura</i>	UNI EN 12390-7

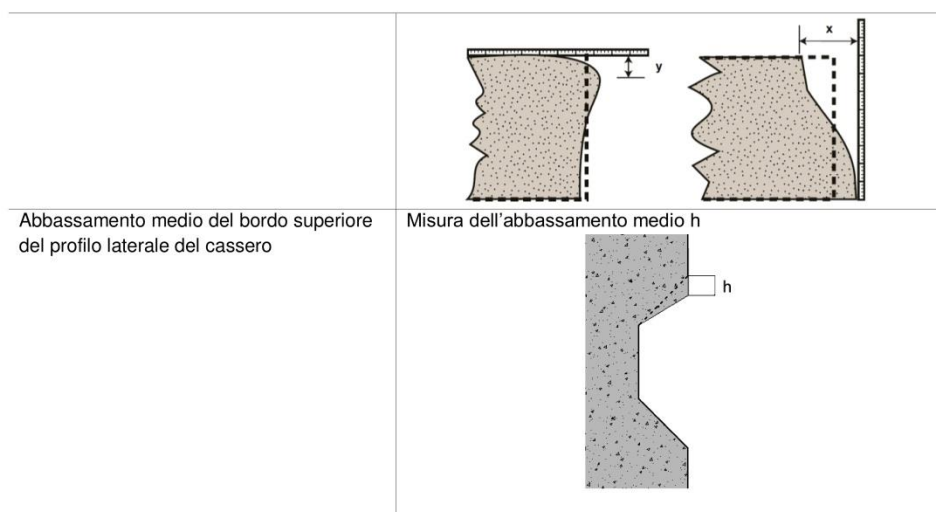
4. Misure in fase d'esecuzione

Velocità di avanzamento della stesa	<i>c.a. 1 m/min - Mediante posizionamento a terra di tacche ogni 25 cm (da tralasciare ogni 15 secondi)</i>
Linearità di avanzamento nella stesa	<i>Indicando a terra con nastro adesivo le "linee guida" per le ruote anteriori del cassero</i>
Altezza e inclinazione del vibratore	Misura di H1 e H2 dal piano di posa 
Variazione intensità di vibrazione	<i>Per un cassero di 60 cm serve almeno un vibratore con velocità compresa tra 7000 e 12000 giri al minuto (vedi Wirtgen, "Manuale per il getto in opera del calcestruzzo con finitrici a casseforme scorrevoli - pt 1, ed. 2009)</i>

5. Valutazione delle condizioni della lastra di calcestruzzo

Fenomeni di segregazione	Verifica visiva di disomogeneità nell'impasto, bleeding superficiale in fase di stesa, ecc.
Finitura superficiale	Suddividere l'area superficiale di cls estruso in porzioni di 20x20 cm, utilizzare tre livelli di severità (basso, medio, elevato) per classificare il fenomeno.
Pulizia/integrità della parete verticale senza giunto	Verifica visiva della presenza di buchi, strappi, trascinati, ecc. in funzione di tre livelli di severità (basso, medio, elevato).
Edge slump	Misura dello slump verticale y e orizzontale x

Figura B.3 Programma prove sperimentali pag. 3.



Abbassamento medio del bordo superiore del profilo laterale del cassero

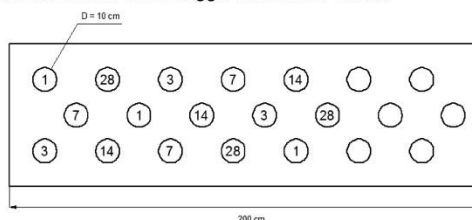
Misura dell'abbassamento medio h

6. Prove successive alla stesa

Prova di resistenza a compressione su carote (f_{ck}) a 7-28 giorni [UNI EN 12390]

NB: si potrebbero carotare tutti i campioni al giorno 1 se le resistenze lo consentono e farli poi maturare in condizioni omogenee

Schema dei fori di carotaggio su lastra di 2 metri



Per rapporti di carotaggio altezza/diametro diversi da 2 vedi Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 – Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14-01-2008, capitolo C11.2.6 Controllo della resistenza del calcestruzzo in opera, pagg. 324-326 oppure:

rapporto altezza/diametro h/d	fattori di correzione	
	ASTM C 42-68	BS 1881
2,00	1,00	1,00
1,75	0,99	0,98
1,50	0,97	0,96
1,25	0,94	0,94
1,00	0,91	0,92

Tabella - Fattori di correzione standard per la resistenza di cilindri con diversi rapporti altezza-diametro

Verifica della percentuale dei vuoti attraverso massa volumica

Dal confronto con la massa volumica di altri provini della medesima miscela si ricava se l'aria inglobata è superiore (scarsa compattazione in fase di stesa) oppure inferiore (eccessiva vibrazione o problemi additivo aerante)

Figura B.4 Programma prove sperimentali pag. 4.

Appendice C

Calcestruzzo fresco

Prova di abbassamento al cono di Abrams

	Superfluidificante 0,9 %	
	a/c	Slump (cm)
1A	0,36	0
1B	0,39	1,5
1C	0,42	2,3

Tabella C.1 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9%

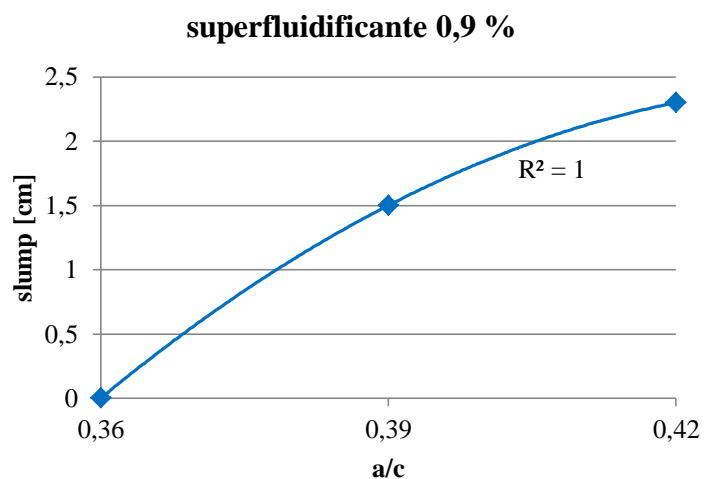


Grafico C.1 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %

	Superfluidificante 1,1 %	
	a/c	Slump (cm)
3A	0,36	0
3B	0,39	0,8
3C	0,42	1,9

Tabella C.2 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

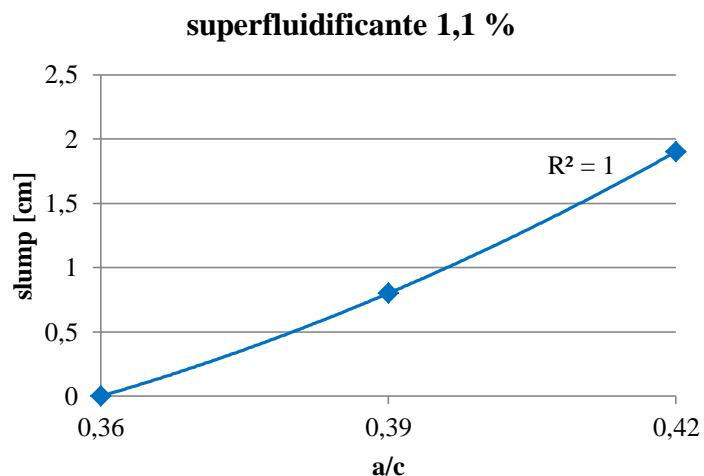


Grafico C.2 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

	Acqua/cemento 0,39	
	superfluid %	Slump (cm)
16	0,5	2
21	0,7	2,2
22	0,9	4,5
23	1,1	7,5

Tabella C.3 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

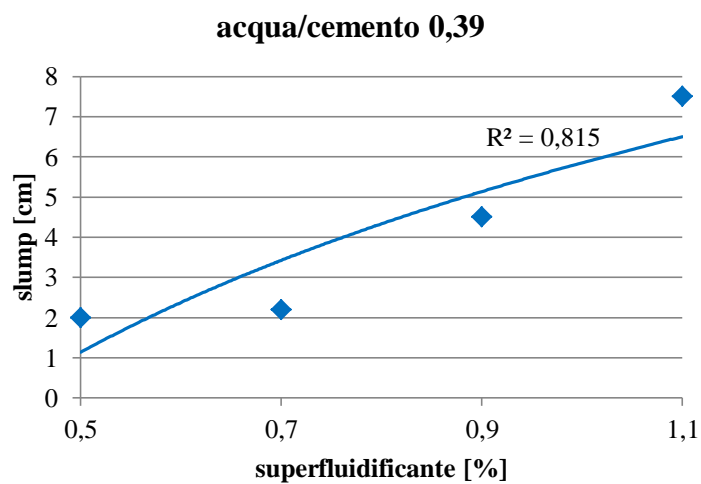


Grafico C.3 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

Acqua/cemento 0,36		
	superfluid %	Slump (cm)
18	0,5	1,2
17	0,7	1,8
19	0,9	3
20	1,1	5

Tabella C.4 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

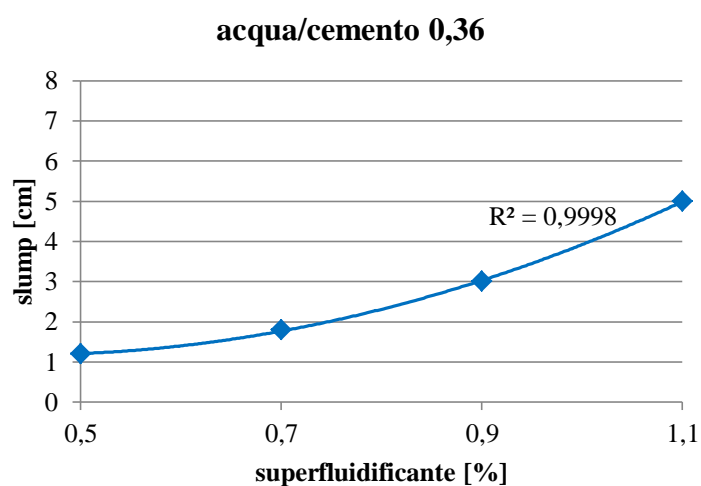


Grafico C.4 Abbassamento al cono di Abrams dei calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

Prova di spandimento su tavola a scosse

Acqua/cemento 0,39		
	superfluid %	DIN (cm)
16	0,5	30
21	0,7	32
22	0,9	37
23	1,1	41

Tabella C.5 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

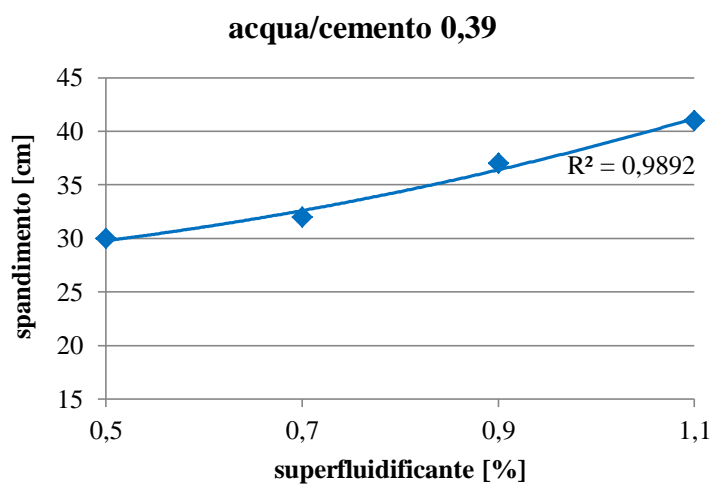


Grafico C.5 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

	Acqua/cemento 0,36	
	superfluid %	DIN (cm)
18	0,5	30
17	0,7	31,8
19	0,9	34
20	1,1	38

Tabella C.6 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

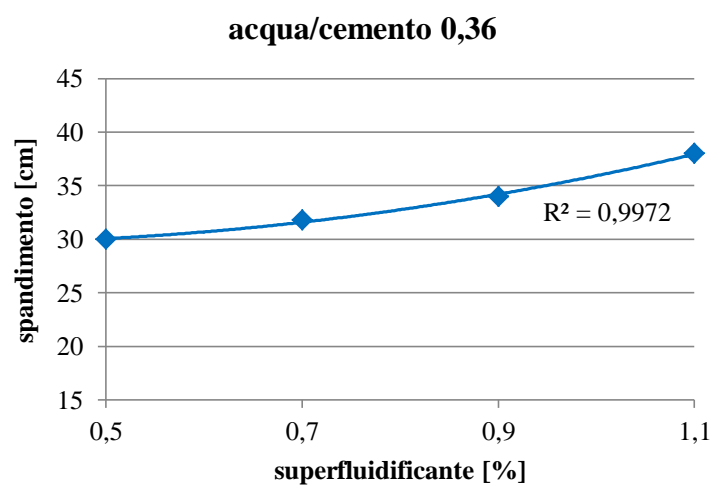


Grafico C.6 Spandimento su tavola a scosse dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

Indice di compattabilità

Superfluidificante 0,9 %		
	a/c	Indice di compattabilità
1A	0,36	1,41
1B	0,39	1,23
1C	0,42	1,25

Tabella C.7 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

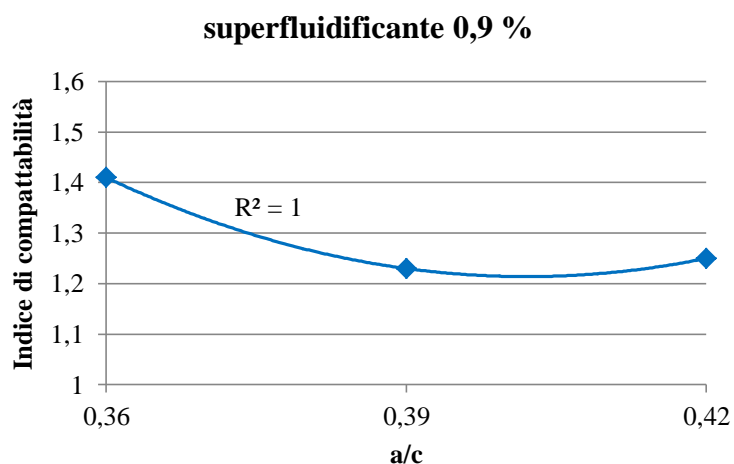


Grafico C.7 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

Superfluidificante 1,1 %		
	a/c	Indice di compattabilità
3A	0,36	1,40
3B	0,39	1,38
3C	0,42	1,24

Tabella C.8 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

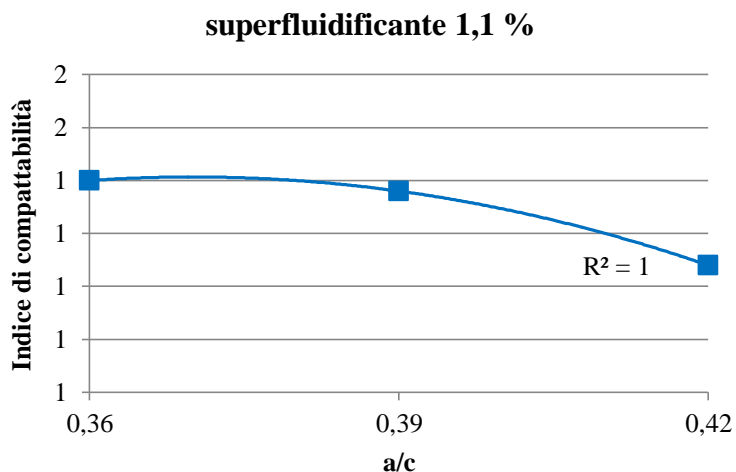


Grafico C.8 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

	Acqua/cemento 0,36	
	superfluid %	Indice di compattabilità
18	0,5	1,17
17	0,7	1,13
19	0,9	1,14
20	1,1	1,11

Tabella C.9 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

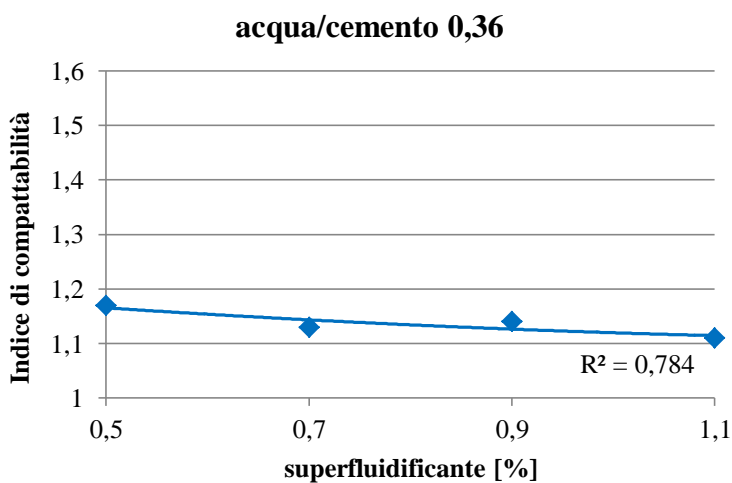


Grafico C.9 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

Acqua/cemento 0,39		
	superfluid %	Indice di compattabilità
16	0,5	1,25
21	0,7	1,24
22	0,9	1,18
23	1,1	1,11

Tabella C.10 Indice di compattabilità dei calcestruzzi della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

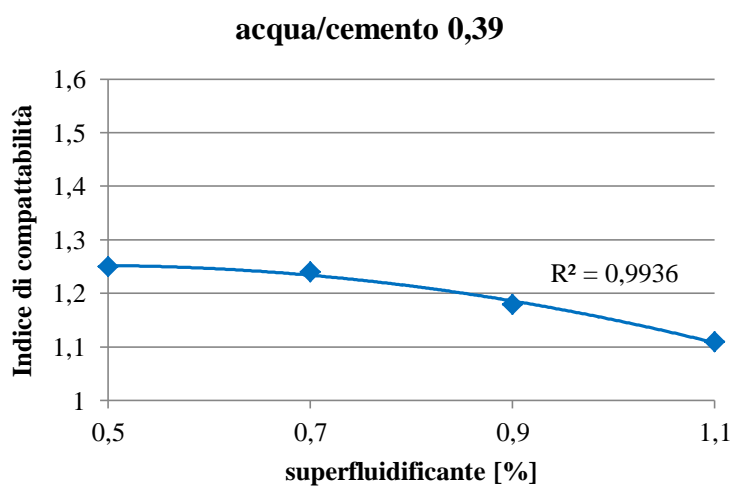


Grafico C.10 Indice di compattabilità dei calcestruzzi realizzati in laboratorio della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

Appendice D

Calcestruzzo indurito

Data e ora		20/06/14	20/06/14	20/06/14	16/07/14	20/07/14	23/07/14	23/07/14	28/07/14	28/07/14	28/07/14	27/08/14	27/08/14	03/09/14	03/09/14	03/09/14
CLS	N.	CLS 01A	CLS 01B	CLS 01C	CLS 02A	CLS 02B	CLS 03A	CLS 03B	CLS 03C	CLS 16	CLS 17	CLS 18	CLS 19	CLS 20	CLS 21	CLS 22
REK	kg/mc	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390
CEMENTO	Classe	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL
SUPERLUIDI	% vol	0,90%	0,90%	0,90%	0,70%	0,90%	1,10%	1,10%	1,10%	0,50%	0,70%	0,50%	0,90%	1,10%	0,70%	0,90%
FICANTE	kg/mc	3,51	3,51	2,73	3,51	4,29	4,29	4,29	1,95	1,95	2,73	1,95	3,51	4,29	2,73	3,51
AERANTE	%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%	0,12%
FIBRE	kg/mc	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SABBIA 0/2	%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
SABBIA 0/8	%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
GH. 8/20	%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%
FM		5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21
CF		71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
WF		32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
M.V. fresco	kg/mc	2377	2330	2291	2349	2355	2409	2400	2375	2276	2316	2307	2316	2351	2380	2395
Rem 3gg	MPa	37,9	31,2	27,7	33,1	34,5	41,5	39,6	34,6	21	23,7	23,1	23,7	25,4		
Rem 7gg	MPa	43,1	35,0	30,8	36,2	37,3	38,0	39,7	33,8	23,7	27,7	25,4	27,7	25,4		
Rem 28gg	MPa	47,7	36,5	32,5	43,6	42,1	50,4	48,4	44,7	27,3	31,5	30,6	31,5	30,6		
M.V. 3gg	kg/mc	2417	2379	2321	2393	2395	2427	2438	2399	2286	2305	2305	2305	2305		
M.V. 7gg	kg/mc	2412	2371	2329	2376	2414	2432	2444	2403	2285	2301	2306	2306	2301		
M.V. 28gg	kg/mc	2420	2393	2343	2323	2405	2445	2446	2412	2292	2325	2321	2321	2301		
E 3gg	GPa	40,2	36,4	36,5	36,6	37,4	37,3	37,3	34,6	30,0	30,8	31,3	31,3	31,3		
E 7gg	GPa	40,7	36,3	33,6	36,4	38,2	35,7	39,5	37,0	30,3	32,8	32,6	32,6	32,6		
E 28gg	GPa	36,2	34,2	35,0	38,2	40,6	44,3	42,1	44,2	33,5	35,1	35,2	35,2	35,2		
Extc 28gg	GPa	33,2	30,7	29,6	32,4	33,8	33,4	33,4	32,6	28,1	29,4	29,1	29,1	29,1		
EASHTO 28gg	GPa	29,8	26,1	24,6	28,5	28,0	30,6	30,0	28,9	22,5	24,2	23,9	23,9	23,9		

Tabella D.1 Risultati delle prove sui calcestruzzi.

Stesa	1A	1B	1C
Acqua/cemento	0,36	0,39	0,42
Superfluidificante	0,90%	0,90%	0,90%
Diametro 7 giorni	-	9,35	9,35
Altezza 7 giorni	-	18,9	18,85
Diametro 28 giorni	9,2	9,2	9,2
Altezza 28 giorni	18,95	19	18,9
M.V. 7 giorni	-	2379	2321
M.V. 28 giorni	2463	2473	2399
fck 7 giorni	-	28,2	22,8
fck 28 giorni	37,8	31,5	24,7
Rcm 7 giorni	-	34,00	27,49
Rcm 28 giorni	45,6	37,57	29,77
gdc 7 giorni	-	1,00	1,00
gdc 28 giorni	1,02	1,03	1,02

Tabella D.2 Risultati delle carote di calcestruzzo della prima serie di lastre stese.

Stesa	2A	2B
Acqua/cemento	0,39	0,39
Superfluidificante	0,70%	0,90%
Diametro 7 giorni	9,95	9,95
Altezza 7 giorni	20	20,1
Diametro 28 giorni	9,93	9,93
Altezza 28 giorni	20	19,9
M.V. 7 giorni	2393	2389
M.V. 28 giorni	2389	2278
fck 7 giorni	27,2	26,3
fck 28 giorni	36,9	27,0
Rcm 7 giorni	32,8	31,72
Rcm 28 giorni	44,4	32,56
gdc 7 giorni	1,01	0,99
gdc 28 giorni	1,04	0,95

Tabella D.3 Risultati delle carote di calcestruzzo della seconda serie di lastre stese.

Stesa	3A	3B	3C
Acqua/cemento	0,36	0,39	0,42
Superfluidificante	1,10%	1,10%	1,10%
Diametro 7 giorni	9,36	9,4	9,4
Altezza 7 giorni	19	18,9	19
Diametro 28 giorni	9,37	9,4	9,4
Altezza 28 giorni	19	19	19
M.V. 7 giorni	2425	2403	2372
M.V. 28 giorni	2399	2403	2364
fck 7 giorni	21,0	30,2	26,7
fck 28 giorni	42,6	36,4	34,2
Rcm 7 giorni	25,3	36,3	32,2
Rcm 28 giorni	51,3	43,8	41,2
gdc 7 giorni	1,00	0,99	0,99
gdc 28 giorni	0,98	0,98	0,98

Tabella D.4 Risultati delle carote di calcestruzzo della terza serie di lastre stese.

Appendice E

Boiacche

	15-05/26-27/06	15-19/05/14 07/07/14	13-15/05/14 07/07/14	20-21/05/14 07- 09/07/14	12-27-30/06/14	12-26/06/14	12-27/06/14	18-30/06/14
CEMENTO A/C	B08 II/A-LL 42,5R	B10 II/A-LL 42,5R	B11 II/A-LL 42,5R	B12 II/A-LL 42,5R	B03 II/A-LL 42,5R	B01 II/A-LL 42,5R	B02 II/A-LL 42,5R	B04 II/A-LL 42,5R
	0,33	0,33	0,33	0,33	0,30	0,36	0,39	0,36
	0,9 %	0,5 %	0,7 %	1,1 %	0,9 %	0,9 %	0,9 %	0,5 %
	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %
SUPERFLUIDIFICANTE AERANTE SPINDLE	LV3	LV3	LV3	LV3	LV3	LV3	LV2	LV3
	$\rho = 2026$ Kg/mc	2002 Kg/mc	2002 Kg/mc	2011 Kg/mc	2014 Kg/mc	1972 Kg/mc	1949 Kg/mc	1966 Kg/mc
	η a 30 rpm = 550 mPa*s	953 mPa*s	763 mPa*s	595 mPa*s	793 mPa*s	385 mPa*s	318 mPa*s	655 mPa*s
	$\sigma = 39$ mPa*s	232 mPa*s	143 mPa*s	98 mPa*s	118 mPa*s	19 mPa*s	56 mPa*s	66 mPa*s
VISCOSITA'	η a 60 rpm = 500 mPa*s	758 mPa*s	708 mPa*s	565 mPa*s	737 mPa*s	365 mPa*s	295 mPa*s	520 mPa*s
	$\sigma = 20$ mPa*s	107 mPa*s	119 mPa*s	91 mPa*s	35 mPa*s	21 mPa*s	64 mPa*s	28 mPa*s
	η a 30 rpm = 707 mPa*s	965 mPa*s	783 mPa*s	760 mPa*s	1120 mPa*s	485 mPa*s	373 mPa*s	715 mPa*s
	$\sigma = 37$ mPa*s	324 mPa*s	184 mPa*s	136 mPa*s	217 mPa*s	10 mPa*s	42 mPa*s	85 mPa*s
MEDIA	η a 60 rpm = 657 mPa*s	803 mPa*s	664 mPa*s	693 mPa*s	1017 mPa*s	440 mPa*s	334 mPa*s	620 mPa*s
	$\sigma = 49$ mPa*s	173 mPa*s	123 mPa*s	123 mPa*s	40 mPa*s	42 mPa*s	51 mPa*s	85 mPa*s
	$\eta = 525$ mPa*s	855 mPa*s	735 mPa*s	580 mPa*s	765 mPa*s	375 mPa*s	306 mPa*s	588 mPa*s
	$\sigma = 35$ mPa*s	138 mPa*s	39 mPa*s	21 mPa*s	40 mPa*s	14 mPa*s	16 mPa*s	95 mPa*s
CEMENTO A/C	B05 II/A-LL 42,5R	B06 II/A-LL 42,5R	B09 II/A-LL 42,5R	B13 II/A-LL 42,5R	B14 II/A-LL 42,5R	B15 II/A-LL 42,5R	B16 II/A-LL 42,5R	
	0,36	0,36	0,42	0,39	0,39	0,39	0,42	
	0,7 %	1,1 %	0,9 %	0,5 %	0,7 %	1,1 %	1,1 %	
	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	0,12 %	
SUPERFLUIDIFICANTE AERANTE SPINDLE	LV3	LV2	LV2	LV2-LV3	LV2	LV2	LV2	
	$\rho = 1960$ Kg/mc	1970 Kg/mc	1908 Kg/mc	1964 Kg/mc	1959 Kg/mc	1982 Kg/mc	1974 Kg/mc	
	η a 30 rpm = 530 mPa*s	398 mPa*s	185 mPa*s	490 mPa*s	385 mPa*s	236 mPa*s	213 mPa*s	
	$\sigma = 38$ mPa*s	27 mPa*s	11 mPa*s	70 mPa*s	37 mPa*s	21 mPa*s	36 mPa*s	
VISCOSITA'	η a 60 rpm = 460 mPa*s	366 mPa*s	163 mPa*s	449 mPa*s	350 mPa*s	220 mPa*s	219 mPa*s	
	$\sigma = 28$ mPa*s	24 mPa*s	11 mPa*s	41 mPa*s	25 mPa*s	0 mPa*s	37 mPa*s	
	η a 30 rpm = 615 mPa*s	471 mPa*s	209 mPa*s	585 mPa*s	459 mPa*s	236 mPa*s	181 mPa*s	
	$\sigma = 87$ mPa*s	45 mPa*s	10 mPa*s	115 mPa*s	63 mPa*s	6 mPa*s	34 mPa*s	
MEDIA	η a 60 rpm = 555 mPa*s	422 mPa*s	180 mPa*s	455 mPa*s	390 mPa*s	226 mPa*s	195 mPa*s	
	$\sigma = 35$ mPa*s	20 mPa*s	7 mPa*s	7 mPa*s	49 mPa*s	2 mPa*s	42 mPa*s	
	$\eta = 495$ mPa*s	382 mPa*s	174 mPa*s	469 mPa*s	368 mPa*s	228 mPa*s	216 mPa*s	
	$\sigma = 49$ mPa*s	23 mPa*s	16 mPa*s	29 mPa*s	25 mPa*s	11 mPa*s	4 mPa*s	
	$\eta = 585$ mPa*s	446 mPa*s	194 mPa*s	520 mPa*s	424 mPa*s	231 mPa*s	188 mPa*s	
	$\sigma = 42$ mPa*s	34 mPa*s	20 mPa*s	92 mPa*s	49 mPa*s	7 mPa*s	10 mPa*s	

Tabella E.2 Viscosità delle boiacche.

a/c	0,39			0,39		
Superfluidificante	0,90%			0,00%		
Aerante	0,12%			0,12%		
Tempo [min]	viscosità [mPa*s]	Temp. [°C]	spindle	viscosità [mPa*s]	Temp. [°C]	spindle
0	299		LV2	860	23,2	LV3
5	285			700	23,3	
10	290			470	23,3	
15	289			575	23,4	
20	288			435	23,4	
25	296			670	23,4	
30	295			460	23,5	
45	303			810	23,7	
60	309			770	23,8	
90	341			615	23,9	
120	385			845	23,8	
150	403			1055	23,8	
180	454	23,9		955	24,2	
210	450	24,4		1380	24,6	
240	490	24,7	825	24,9		
270	535	24,8	2275	25,3		
300	670	25,1	1575			
330	1000	25,5	LV3		LV4	
360	1485					
390	1230					
420	1075			LV4		

Tabella E.3 Viscosità nel tempo della boiacca.

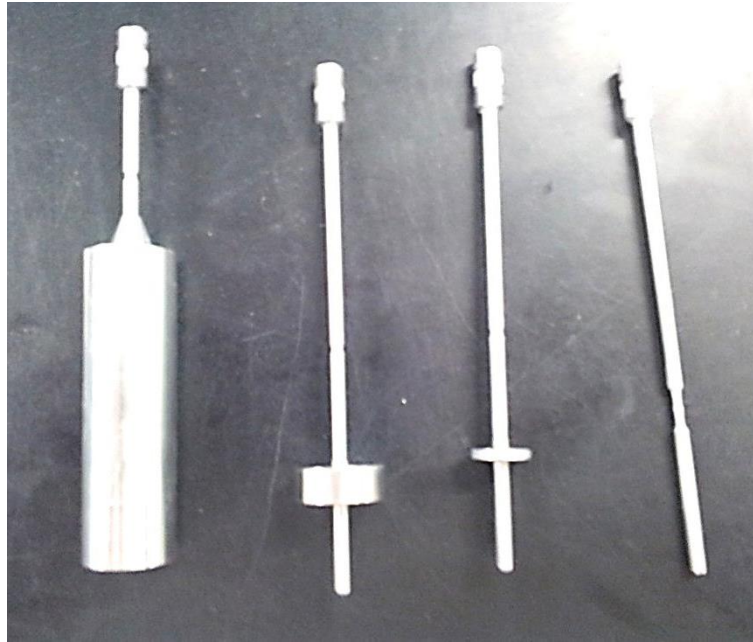


Figura E.1 Spindle della serie LV del viscosimetro Brookfield (da LV1 a sinistra a LV4 a destra).

BROOKFIELD FACTOR FINDER

INC. 240 CUSHING ST., STOUGHTON, MA 02072 USA
TELEPHONE: (617) 344-4310 TELEEX: 924-497

INSTRUCTIONS

This Factor Finder applies to Brookfield viscometer models LV, RV, HA and HB with standard spindles. Insert slide in sleeve as appropriate Viscometer model is visible in window. The first two letters of the model designation are shown, i.e., "LV" applies to LVO, LVF or LVT models.

To convert viscometer dial reading to centipoise (mPa·s) adjust slide until Viscometer model and spindle number being used appear in window. Multiply reading noted on Viscometer D-100 scale by factor shown beside speed at which measurement is being made.

Dial reading X Factor = Viscosity in centipoise (mPa·s)

Example: LVT Viscometer with #1 spindle at 6 rpm
Dial Reading 75 Factor 10
75 x 10 = 750 centipoise (mPa·s)

Full scale viscosity range for any speed and spindle combination is equal to the factor X 100.
Factor X 100 = Full scale range

	LV							
	1	2	3	4				
80M	.3	200	.3	1M	.3	4M	.3	20M
40M	.5	100	.5	500	.5	2M	.5	10M
20M	1.5	40	1.5	200	1.5	800	1.5	4M
	3	20	3	100	3	400	3	2M
	6	10	6	50	6	200	6	1M
	12	5	12	25	12	100	12	500
	30	2	30	10	30	40	30	200
	60	1	60	5	60	20	60	100

BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, INC. 240 CUSHING ST., STOUGHTON, MA 02072 USA
TELEPHONE: (617) 344-4310 TELEEX: 924-497

Figura E.2 Fattori di conversione per il calcolo della viscosità in funzione del tipo di spindle e della sua velocità di rotazione nel viscosimetro Brookfield

Appendice F

Malte

Spandimento

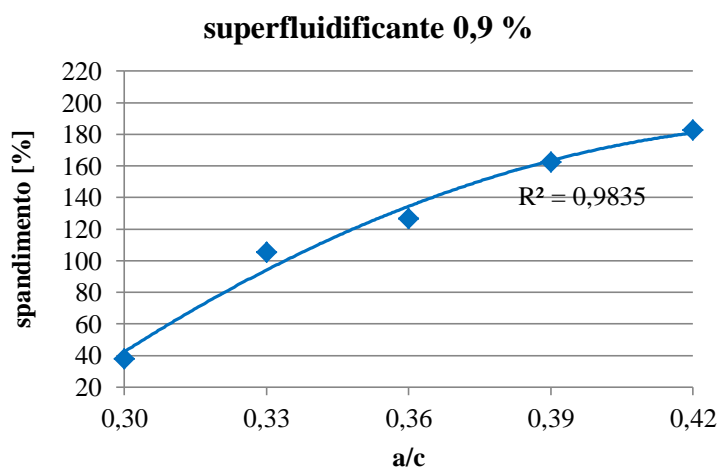


Grafico F.1 Spandimento delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 0,9 %.

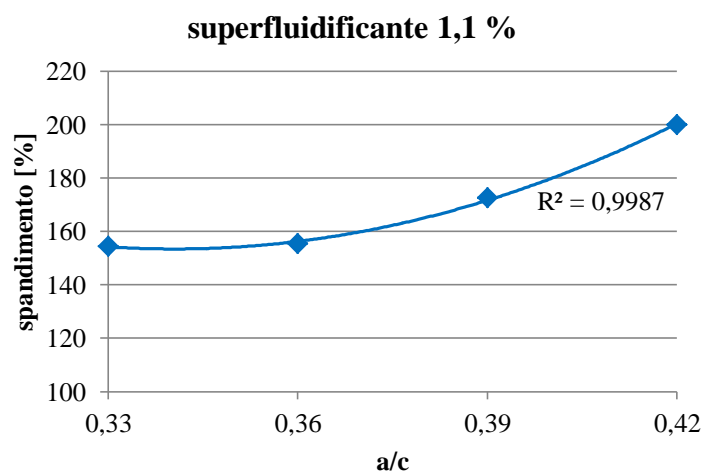


Grafico F.2 Spandimento delle malte della serie acqua/cemento con superfluidificante 1,1 %.

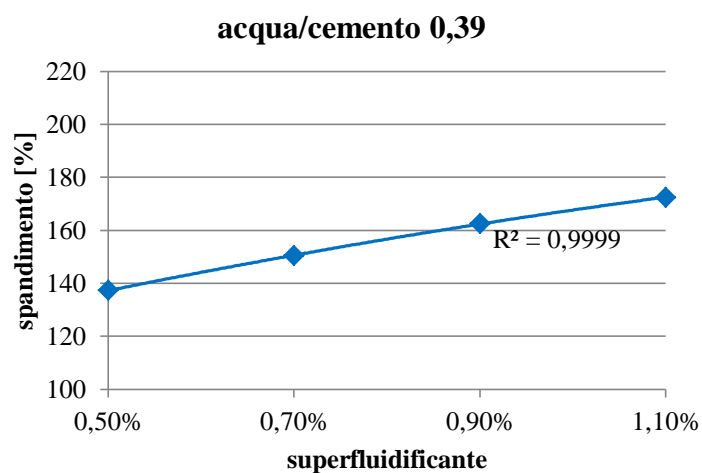


Grafico F.3 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,39.

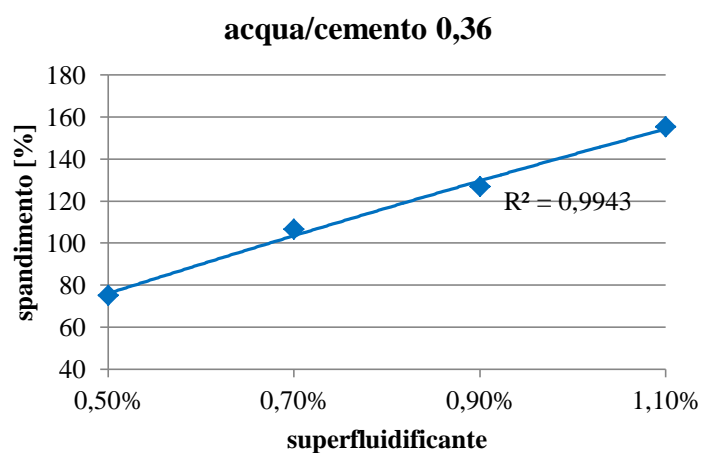


Grafico F.4 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,36.

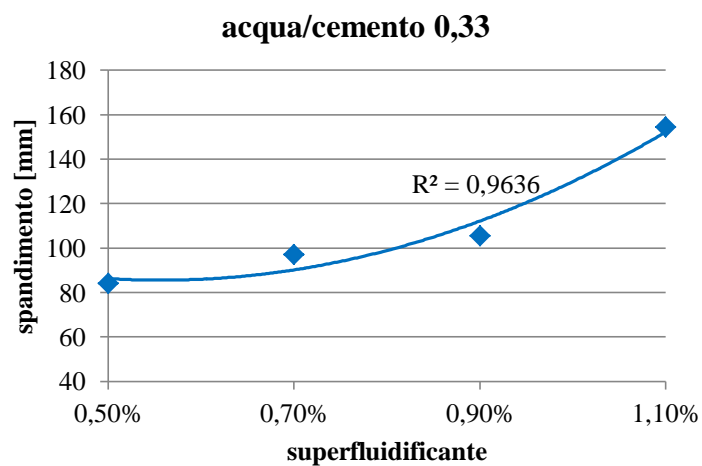


Grafico F.5 Spandimento delle malte della serie superfluidificante con acqua/cemento 0,33.

Data e ora		17/06/14	17/06/14	18/06/14	18/06/14	18/06/14	19/06/14	26/06/14	26/06/14	07/07/14	07/07/14	07/07/14	07/07/14	07/07/14	07/07/14	08/07/14	08/07/14	08/07/14	24/07/14
		15:30	16:30	15:00	15:20	15:40	12:10	12:25	13:10	12:00	12:30	14:40	15:20	15:20	12:40	13:15	12:40	13:15	11:50
		26/06/14	27/06/14	27/06/14	30/06/14	01/07/14	01/07/14	27/06/14	27/06/14	08/07/14	08/07/14	09/07/14	09/07/14	09/07/14	09/07/14	09/07/14	09/07/14	09/07/14	24/07/14
		15:10	12:40	13:20	16:40	14:00	15:20	16:10	16:45	15:30	16:10	11:50	12:30	12:30	13:00	16:00	13:00	16:00	15:30
		04/07/14		30/06/14	04/07/14		04/07/14	15/07/14	04/07/14				15/07/14						
		11:05		13:50	11:40		16:20	12:30	10:40				12:55						
MALTA	N.	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16			
	kg/mc																		
CEMENTO	Classe	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL
	kg/mc	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R	42.5R
ACQUA	kg/mc	0	0	0.36	0.36	0.36	0.36	0.33	0.42	0.33	0.33	0.33	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.42
SABBIA 0/2	%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
SABBIA 0/4	%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
SUPERFLUID.	%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	0.90%	1.10%	0.90%	0.90%	0.50%	0.70%	1.10%	0.50%	0.70%	1.10%	1.10%	0.70%	1.10%	1.10%
AERANTE	%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%
M.V. fresco	kg/mc	2115	2263	2265	2097	2027	1978	2052	1958	2181	2108	2239	2062	2170	2308	2270	2170	2308	2270
M.V. fresco	kg/mc	2012	2233	2264	2273	2092	2255	2158	2303	2185	2137	2272	2010	2113	2290	2234	2010	2290	2234
M.V. fresco	kg/mc	2178	2273	2273	2090	2090	2256	2137	2200	2185	2137	2272	2010	2113	2290	2234	2010	2290	2234
Spand. medio	%	126.7	162.5	38.0	75.0	106.5	155.3	105.3	182.7	84.0	97.0	154.5	137.3	150.5	172.5	200.0	150.5	172.5	200.0
	σ	24.0	10.6	20.7	35.6	4.9	18.5	11.2	19.2	1.4	9.9	0.7	6.7	0.7	3.5	0.0	0.7	3.5	0.0
M.V. 3gg	kg/mc	2090	2230	2277	2117	2043	1980	2050	2020	2180	2078	2219	2043	2148	2277	2238	2148	2277	2238
M.V. 7gg	kg/mc	1960	2226	2273	2074	2113	2238	2156	2277	2187	2101	2266	2023	2121	2308	2250	2121	2308	2250
M.V. 3gg	kg/mc	2168	2293	2281	2121	2062	2230	2129	2203	2187	2101	2254	2016	2176	2339	2277	2176	2339	2277
M.V. 7gg	kg/mc	2171	2293	2281	2121	2062	2230	2129	2203	2187	2101	2254	2016	2176	2339	2277	2176	2339	2277
M.V. 7gg	kg/mc	2004	2238	2258	2129	2133	2273	2195	2320	2195	2121	2297	2043	2137	2168	2215	2137	2168	2215
M.V. 7gg	kg/mc	2199	2305	2305	2109	2109	2246	2176	2215	2195	2121	2297	2043	2137	2168	2215	2137	2168	2215
M.V. 28gg	kg/mc	2160	2285	2300	2129	2066	2027	2105	2012	2219	2125	2273	2113	2215	2328	2258	2215	2328	2258
M.V. 28gg	kg/mc	2008	2250	2301	2140	2109	2293	2219	2285	2234	2176	2300	2066	2152	2281	2266	2152	2281	2266
M.V. 28gg	kg/mc	2199	2312	2312	2109	2109	2308	2152	2223	2234	2176	2300	2066	2152	2281	2266	2152	2281	2266
Rcfm 3gg	MPa	7.1	8.3	9.9	7.5	8.1	7.9	8.5	8.2	8.1	8.0	9.7	6.9	7.7	8.8	9.3	7.7	8.8	9.3
Rcfm 7gg	MPa	1.9	1.6	0.2	0.7	1.3	0.0	0.4	0.6	0.0	0.1	0.6	0.3	0.9	0.2	1.0	0.9	0.2	1.0
Rcfm 7gg	MPa	10.6	10.5	11.5	9.3	9.0	10.0	9.0	9.9	10.8	9.5	11.1	7.8	9.0	10.2	10.0	9.0	10.2	10.0
Rcfm 28gg	MPa	0.5	0.3	0.3	0.4	0.2	0.9	1.2	0.4	0.6	0.7	0.7	0.5	0.7	0.9	0.2	0.7	0.9	0.2
Rcfm 28gg	MPa	10.0	11.8	13.1	9.9	9.0	12.1	10.2	10.9	11.2	10.1	11.9	8.6	9.4	11.5	9.5	8.6	9.4	11.5
Rcfm 3gg	MPa	0.1	0.2	1.1	0.9	0.4	0.5	0.7	0.2	0.2	0.1	0.0	0.3	1.0	0.4	0.4	1.0	0.4	0.4
Rcfm 3gg	MPa	32.1	35.3	43.7	26.4	26.2	35.0	29.6	29.0	31.7	29.6	38.5	20.7	26.2	34.5	31.1	26.2	34.5	31.1
Rcfm 7gg	MPa	1.2	2.2	2.5	2.0	2.0	2.2	2.4	4.6	1.1	1.0	2.5	2.5	0.4	1.0	1.1	0.4	1.0	1.1
Rcfm 7gg	MPa	35.2	40.6	47.2	33.1	30.1	38.8	32.1	34.8	43.6	41.1	42.8	23.4	36.2	39.5	34.5	36.2	39.5	34.5
Rcfm 28gg	MPa	1.2	1.5	2.6	7.9	1.5	0.7	3.2	3.6	7.0	9.0	3.5	2.5	7.2	2.5	1.6	7.2	2.5	1.6
Rcfm 28gg	MPa	39.0	45.2	53.6	31.8	31.8	43.5	37.9	42.5	41.8	38.5	46.6	28.2	37.3	49.6	39.6	37.3	49.6	39.6
E 3gg	GPa	2.4	1.2	0.8	2.4	2.7	0.8	5.9	4.4	1.6	2.0	2.3	1.2	0.5	2.2	3.8	0.5	2.2	3.8
E 7gg	GPa	24.3	27.9	30.2	23.2	22.8	26.6	23.7	24.9	24.9	23.7	29.2	20.2	24.2	27.1	27.1	24.2	27.1	27.1
E 28gg	GPa	26.7	30.0	31.3	25.0	24.2	29.0	26.0	26.9	27.6	25.2	30.8	22.3	25.2	29.7	28.2	25.2	29.7	28.2
E 28gg	GPa	28.5	31.9	33.3	26.0	24.9	30.9	25.5	25.6	29.0	26.8	31.3	23.9	27.0	32.0	30.3	27.0	32.0	30.3

Figura F.1 Risultati delle prove sulle malte.

Appendice G

Risultati cassero sperimentale

Valutazione prima stesa

LASTRA 1A						
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont.	Altezza cordolo	Abbassamento (cm)	Finitura
1	60	-	-	8	1	Bassa
2	60	-	-	8,8	0,2	Bassa
3	60	-	-	8,4	0,6	Bassa
4	60	-	-	8,7	0,3	Media
5	60	-	-	9	0	Media
6	60	-	-	8,4	0,6	
7	NC	-	-			
8	NC	-	-			
9	NC	-	-			
10	NC	-	-			
11	NC	-	-			
Valor medio	60,0	-	-	8,6	0,5	

Tabella G.1 Valutazione lastra 1A.

LASTRA 1B							
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont.	Altezza cordolo	Abbassamento	Finitura (40x20)	Finitura (20x20)
1	60,5	0,7	-	9,8	-0,8	Media	Bassa
2	60,6	0,8	-	9,4	-0,4	Media	Bassa
3	60,6	0,8	-	8,8	0,2	Bassa	Bassa
4	60,2	0,7	-	9	0	Bassa	Bassa
5	60,6	0,5	-	8,8	0,2	Media	Bassa
6	60,5	0,8	-	8,4	0,6	Media	Bassa
7	60,5	0,4	-	8,7	0,3	Elevata	Media
8	60,4	0,5	-	8,8	0,2	Elevata	Media
9	60,5	0,4	-	8,5	0,5	Media	Media
10	60,4	0,5	-	8,7	0,3	Elevata	strappo
11	60,2	0,5	-	NC	-		
Valor medio	60,5	0,6		8,9	0,2		

Tabella G.2 Valutazione lastra 1B.

LASTRA 1C							
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont	Altezza cordolo	Abbassamento	Finitura (40x20)	Finitura (20x20)
1	64,4	1,5	-	chiuso	-	Media	Bassa
2	64,4	3	-	chiuso	-	Media	Media
3	64,9	2,5	-	chiuso	-	Elevata	Media
4	64,9	2,3	-	chiuso	-	Elevata	Media
5	65,3	2,3	-	chiuso	-	Elevata	Media
6	63,5	2,3	-	chiuso	-	Elevata	Media
7	63,4	1,6	-	chiuso	-	Elevata	Elevata
8	63,8	1,6	-	chiuso	-	Elevata	Elevata
9	63,8	1,8	-	chiuso	-	Elevata	Media
10	63,7	2	-	12	-	Elevata	Media
11	64	2	-	11,5	-		
Valor medio	64,2	2,1					

Tabella G.3 Valutazione lastra 1C.

Valutazione seconda stesa

LASTRA 2A						
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont	Altezza cordolo	Abbassamento	Finitura
1	62	1,3	-	8,3	0,7	Bassa
2	60,5	0,8	-	8,8	0,2	Bassa
3	60,2	0,9	-	8,9	0,1	Bassa
4	60	0,3	-	9,1	-0,1	Bassa
5	60,3	0,2	-	9	0	Bassa
6	60,2	0,7	-	9,1	-0,1	Bassa
7	60	0,8	-	9,2	-0,2	Bassa
8	60	0,8	-	9,1	-0,1	Bassa
9	60	0,6	-	9	0	Bassa
10	59,9	0,4	-	9	0	Bassa
11	60,2	0,8	-	8,9	0,1	Bassa
Valor medio	60,3	0,7	-	8,9	0,0	

Tabella G.4 Valutazione lastra 2A.

LASTRA 2B							
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont	Altezza cordolo	Abbassamento	Finitura (40x20)	Finitura (20x20)
1	61	0,8	-	9,2	-0,2	Bassa	Bassa
2	60	-0,2	-	8,8	0,2	Strappo sx	Strappo sx
3	60,3	0,8	-	8,3	0,7	Strappo sx	Strappo sx
4	60,2	0,3	-	8,5	0,5	Strappo sx	Strappo sx
5	60	0,2	-	8,5	0,5	Bassa	Bassa
6	60	0,4	-	8,4	0,6	Strappo sx	Strappo sx
7	59,7	0,4	-	8,7	0,3	Strappo sx	Strappo sx
8	59,5	-	-	NC	-	Strappo dx	Strappo dx
9	-	-	-	NC	-	Strappo dx	Strappo dx
10	60	1	-	NC	-	Pessima	Pessima
11	59,9	0	-	8,8	0,2		
Valor medio	60,1	0,4		8,7	0,4		

Tabella G.5 Valutazione lastra 2B.

Valutazione terza stesa

LASTRA 3B							
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont	Altezza cordolo	Abbassamento	Finitura (40x20)	Finitura (20x20)
1	60	0,3	-	8,6	0,4	Strappo	Bassa
2	59,8	0,2	-	8,7	0,3	Bassa	Bassa
3	-	-	-	NC	-	Pessima	Strappo
4	59,9	0,8	-	8,2	0,8	Bassa	Bassa
5	59,9	0,6	-	8,4	0,6	Strappo	Bassa
6	60	0,8	-	8,2	0,8	Strappo	Pessima
7	60,2	0,1	-	8,8	0,2	Strappo	Pessima
8	-	0,4	-	8,4	0,6	Bassa	Strappo
9	60	0,7	-	8,5	0,5	Strappo	Bassa
10	-	0,2	-	8,3	0,7	Strappo	Bassa
11	-	0,2	-	8,4	0,6		
Valor medio	60,0	0,4		8,5	0,6		

Tabella G.6 Valutazione lastra 3B.

LASTRA 3C							
Picchetto	Lunghezza (cm)	Slump verticale	Slump orizzont	Altezza cordolo	Abbassamento	Finitura (40x20)	Finitura (20x20)
1	60,9	1,3	-	8,8	0,2	Pessima	Strappo
2	-	-	-	NC	-	Bassa	Strappo
3	-	-	-	NC	-	Media	Strappo
4	60,6	1,1	-	8,8	0,2	Bassa	Bassa
5	60,7	1	-	8,7	0,3	Media	Bassa
6	60,8	0,8	-	8,8	0,2	Bassa	Bassa
7	61	1	-	9,8	-0,8	Strappo	Media
8	60,6	0,9	-	9,2	-0,2	Bassa	Media
9	60,4	0,1	-	8,8	0,2	Bassa	Elevata
10	60	0,4	-	8,8	0,2	Bassa	Strappo
11	60	-	-	NC	-		
Valor medio	60,5	0,8		9,0	0,2		

Tabella G.7 Valutazione lastra 3C.

Metodo di valutazione e principali difetti



Figura G.1 Esclusione del primo tratto di stesa dalla valutazione.

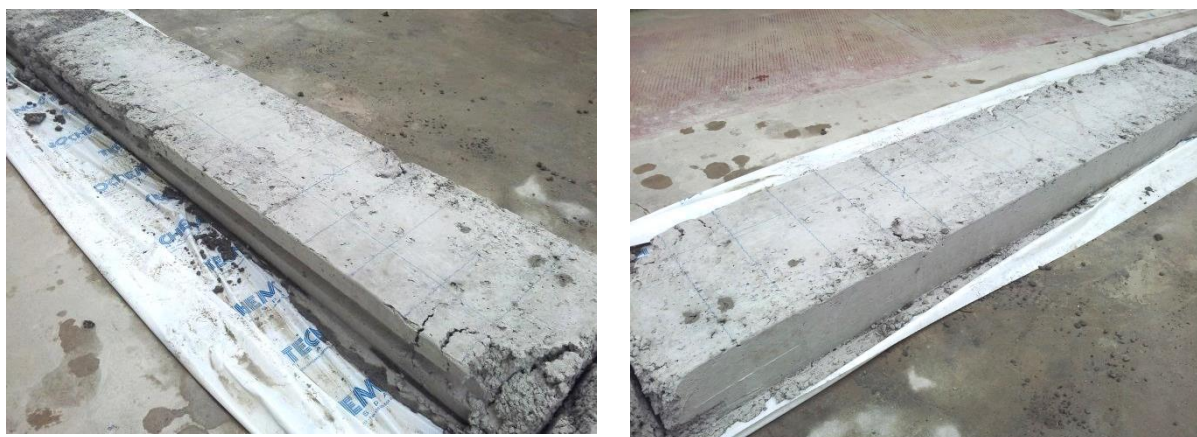


Figura G.2 Suddivisione della lastra per la valutazione



Figura G.3 Difetto di instabilità con finitura ondulata causata da miscela troppo fluida.



Figura G.4 Cordolo ben realizzato (a sinistra) e cordolo richiuso (a destra).



Figura G.5 Abbassamento del cordolo (a sinistra) e strappi nel cordolo (a destra).



Figura G.6 Finitura superficiale della lastra elevata (a sinistra) e buona (a destra), entrambe valide per l'utilizzo in slip-form con apparati di finitura.



Figura G.7 Finitura superficiale bassa della lastra (a sinistra) e finitura superficiale pessima (a destra).



Figura G.8 Difetto di vibrazione intervenuto tra la prima e la seconda parte della lastra (a sinistra) e insufficienza di vibrazione per la finitura del cordolo a quella consistenza del calcestruzzo (a destra).

Reologia idonea per slip-form



Figura G.9 Prova di abbassamento al cono di Abrams con risultato 1,5 cm



Figura G.10 Prova di spandimento su tavola a scosse con risultato 27,5 cm



Figura G.11 Indice di compattabilità con risultato 1,23

Bibliografia

D.M. 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

C.S.LL.PP. Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale (ed. 2008)

UNI EN 196-1:2005 Metodi di prova dei cementi – Determinazione delle resistenze meccaniche

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

UNI EN 206:2014 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

UNI EN 933-3:2012 Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della forma dei granuli - Indice di appiattimento

UNI EN 933-4:2008 Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della forma dei granuli - Indice di forma

UNI EN 933-8:2012 Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Valutazione dei fini - Prova dell'equivalente in sabbia

UNI EN 934-2:2012 Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura

UNI EN 1097-2:2010 Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione

UNI EN 1097-6:2013 Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua

UNI 7044:1972 Determinazione della consistenza delle malte cementizie mediante l'impiego di tavola a scosse

UNI 8520:2005 Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620

UNI 11104:2004 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1

UNI EN 12350-2:2009 Prova sul calcestruzzo fresco – Prova di abbassamento al cono

UNI EN 12350-4:2009 Prova sul calcestruzzo fresco – Indice di compattabilità

UNI EN 12350-5:2009 Prova sul calcestruzzo fresco – Prova di spandimento su tavola a scosse

UNI EN 12350-6:2009 Prova sul calcestruzzo fresco – Massa volumica

UNI EN 12350-7:2009 Prova sul calcestruzzo fresco – Contenuto d'aria – Metodo per pressione

UNI EN 12390-3:2012 Prova sul calcestruzzo indurito – Resistenza alla compressione dei provini

UNI EN 12390-7:2012 Prova sul calcestruzzo indurito – Massa volumica del calcestruzzo indurito

UNI EN 12504-4:2005 Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici

UNI EN 12620:2013 Aggregati per calcestruzzo

ASTM C33:2013 Standard Specification for Concrete Aggregates

ACI 309 R-96, *Guide for Consolidation of Concrete*

ACI 309.1 R-93 (Reapproved 1998), *Behavior of Fresh Concrete During Vibration*

AFCESA/CES, *Engineering Technical Letter (ETL) 97-5: Proportioning Concrete Mixtures with Graded Aggregates for Rigid Airfield Pavements*, 1997

Abiy Bekele, *Implementation of the AASHTO Pavement Design Procedures into MULTI-PAVE*, Master Degree Project, 2011

P. Ferrari, F. Giannini, *Ingegneria stradale vol. II - Corpo stradale e pavimentazioni*, Isedi, 1979

- AIPCR - XXVI Convegno Nazionale Stradale, *Linee guida per la redazione di un capitolato prestazionale per pavimentazioni stradali in calcestruzzo*, Ottobre 2010
- P. Di Mascio, F. Miseri, L. Moretti, *Pavimentazioni stradali. Approfondimenti sulle pavimentazioni in calcestruzzo*, Federbeton, 2010
- L. Moretti, *Modello di analisi strutturale, funzionale ed economica di pavimentazioni stradali in calcestruzzo*, Tesi di dottorato, 2012
- PennDOT, *Section 500 - Rigid pavement*, Pub408/94
- Prof. Ing. Maurizio Crispino, *Aspetti innovativi di recenti interventi su infrastrutture aeroportuali*, Ottobre 2013
- Paracchini G., *Aeroporto Milano Malpensa – Riqualifica pista 17L / 35 R*, Ottobre 2013
- Lev Khazanovich, *Dowel and tie bars in concrete pavement joints: theory and practice*, University of Minnesota, 2011
- Peter C. Taylor, Steven H. Kosmatka, Gerald F. Voigt, et al., *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual*, 2006
- Risser Bob, *Understanding Slip-form Pavers*, 1995
- University of Minnesota, *Minnesota Concrete Flatwork Specifications*, 2012
- Wirtgen, *Manuale per il getto in opera del calcestruzzo con finitrici a casseforme scorrevoli*
- M. Collepari, S. Collepari, R. Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, V ed., Tintoretto, 2009
- M. Collepari, *Gli additivi per calcestruzzo*, Tintoretto, 2012
- L. Bertolini, *Materiali da costruzione*, vol. I, CittàStudi edizioni, 2010
- J. L. Lafrenz, *Aggregate gradation control for PCC Pavement*, AFCESA/CES
- D. Citrini, G. Nosedà, *Idraulica*, II ed., CEA, 1987
- M. De Bonis, *Automazione della produzione del calcestruzzo: mescolazione, trasporto e scarico*, Tesi di laurea, 2004
- C. Ferraris, *Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report*, National institute of standards and technology Gaithersburg, 1996

Iowa State University, *Self-Consolidating Concrete – Application for Slip-Form Paving: Phase I*, Rapporto finale, Novembre 2005

Iowa State University, *Self-Consolidating Concrete – Application for Slip-Form Paving: Phase II*, Rapporto finale, Maggio 2011

National Concrete Pavement Technology Center, *Iowa State University, Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA) – Guide Specifications for Highway Concrete Pavements: Commentary*, Ottobre 2012

Internationale Journal of Pavement Engineering, *Guidelines for design, testing, production and construction of semi-flowable SCC for slip-form paving*, Settembre 2011