



**Studio delle proprietà reologiche
di miscele di riempimento da utilizzarsi
per il consolidamento dell'ex cava di gesso
in località Carale del comune di S. Brigida**

Responsabile:
Prof. Luca Bertolini

Milano, 31 Dicembre 2006



Politecnico di Milano

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"

Ricerca

**Studio delle proprietà reologiche
di miscele di riempimento da utilizzarsi
per il consolidamento dell'ex cava di gesso
in località Carale del comune di S. Brigida**

Il responsabile della ricerca

Prof. Luca Bertolini

Il Direttore del Dipartimento

Prof. Alberto Cigada

Milano, 31 Dicembre 2006

Questa relazione fa riferimento agli incarichi per prestazioni tecniche di consulenza per verifica delle proprietà reologiche di miscele di riempimento di cavità nelle aree ex estrattive di gesso ad alto rischio idrogeologico, ai sensi della L. 267/1998 – L. 183/1989 – L. 179/2002, conferiti dal comune di Santa Brigida, rispettivamente con le delibere n°148 del 14 giugno 2005 e n°139 del 20 giugno 2006, al Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”.

Il responsabile scientifico è:

Prof. Ing. Luca Bertolini
Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G. Natta”
via Mancinelli, 7 - 20131 Milano
Tel. 02 2399 3138 - Fax. 02 2399 3180
E-mail: luca.bertolini@polimi.it

I lavori sono stati seguiti dal Prof. Luca Bertolini e dall’Ing. Maddalena Carsana.

Il presente rapporto non può essere riprodotto parzialmente senza autorizzazione esplicita.



Indice

1. PREMESSA	pag. 3
2. REQUISITI	pag. 4
3. PROVE DI LABORATORIO	pag. 6
3.1 Materiali utilizzati	pag. 6
3.1.1 Cemento	pag. 6
3.1.2 Pozzolana	pag. 6
3.1.3 Terreni	pag. 6
3.1.4 Aggregati	pag. 8
3.1.5 Additivi	pag. 9
3.1.6 Acqua	pag. 10
3.2 Fasi del lavoro	pag. 11
3.3 Prove per la caratterizzazione delle miscele	pag. 11
3.3.1 Consistenza	pag. 11
3.3.2 Aria inglobata e massa volumica	pag. 14
3.3.3 Colabilità	pag. 14
3.3.4 Resistenza meccanica a compressione	pag. 15
3.3.5 Microscopia elettronica a scansione ambientale (ESEM)	pag. 17
3.3.6 Resistività elettrica	pag. 20
4. FASE PRELIMINARE	pag. 21
4.1 Miscela proposta e modifiche	pag. 21
4.2 Miscele fluidificate	pag. 24
4.3 Miscele CLSM	pag. 26
4.4 Scelta del tipo di miscela	pag. 27
5. DEFINIZIONE DELLA MISCELA	pag. 28
5.1 Variabilità del terreno	pag. 28
5.2 Riproducibilità	pag. 35
5.3 Impiego di sabbia	pag. 40
5.4 Sistema di miscelazione	pag. 44
5.5 Perdita di lavorabilità	pag. 45
5.6 Immersione in acqua solfatica	pag. 49
5.7 Impiego di acqua solfatica nelle miscele	pag. 51
5.8 Condizioni ambientali	pag. 52
5.8.1 Proprietà allo stato fresco	pag. 52
5.8.2 Variazione di massa	pag. 58
5.8.3 Prestazioni meccaniche	pag. 59
5.8.4 Resistività elettrica	pag. 62
5.8.5 Osservazioni ESEM	pag. 63



6. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	pag. 73
6.1 Fluidità	pag. 73
6.2 Lavorabilità nel tempo	pag. 79
6.3 Resistenza meccanica	pag. 83
6.3.1 Parametri di composizione	pag. 83
6.3.2 Condizioni ambientali	pag. 86
7. PROCEDURA DI GETTO E PROPORZIONAMENTO DELLE MISCELE	pag. 91
8. PROVE IN CAMPO	pag. 94
8.1 Descrizione dell'intervento	pag. 94
8.2 Prima prova in cantiere	pag. 95
8.3 Seconda prova in cantiere	pag. 96
8.4 Verifica della resistenza a compressione	pag. 106
8.4.1 Miscele confezionate nel luglio 2006	pag. 106
8.4.2 Miscele confezionate ad agosto 2006	pag. 108
CONCLUSIONI	pag. 111
RIFERIMENTI	pag. 114
ALLEGATO A	pag. 115
ALLEGATO B	pag. 120



1. PREMESSA

Il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G. Natta” del Politecnico di Milano è stato incaricato dal comune di Santa Brigida (in provincia di Bergamo) di proseguire lo studio delle proprietà reologiche di miscele di riempimento da utilizzarsi per il consolidamento dell'ex miniera in frazione Carale, a monte del centro abitato nell'omonimo comune. Il territorio comunale di Santa Brigida è stato interessato in passato da attività estrattiva in sotterraneo per l'asportazione di gesso e anidrite. Per tale ragione nel sottosuolo (sino a profondità di 40-50 m dal piano campagna) sono presenti, su quattro livelli, gallerie di notevoli dimensioni (con un diametro di circa 6 metri). Dalla relazione geologica tecnica redatta dallo studio associato di geologia Spada [1], emerge che, sia per la particolare natura geologica del territorio comunale (con presenza di gessi e notevoli depositi argillosi di alterazione in superficie) sia in seguito all'attività estrattiva, la zona presa in esame è interessata fenomeni di dissesto, franamento e sprofondamenti. A questo si aggiunge il fatto che le gallerie (tre delle quali sotto il livello di falda) sono quasi completamente allagate; la venuta di notevoli quantità di acqua causa la dissoluzione del gesso, provocando conseguentemente l'accumulo di depositi fangosi sul fondo delle gallerie. Per rimediare ai rischi conseguenti a questa situazione [1-3], si è previsto di valutare la possibilità di riempire tali gallerie con materiali cementizi al fine di consolidare la zona della Cava Carale.

Questa relazione riporta il secondo stato di avanzamento dello studio delle proprietà reologiche di miscele cementizie da utilizzare per il riempimento della cava Carale.

Si è considerato come punto di partenza di questo studio il precedente lavoro condotto dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIS) del Politecnico di Milano sotto la guida del Prof. R. Nova. Sulla base delle considerazioni e osservazioni emerse dalla caratterizzazione della miscela, confezionata con cemento, acqua, pozzolana e terreno, e indicata nella relazione, redatta dal DIS il 5 aprile 2005 [4], come potenzialmente idonea dal punto di vista delle proprietà meccaniche al consolidamento della cava Carale, sono state verificate le possibili modifiche da apportare alla composizione della miscela, in parte suggerite nella prima relazione [5]. A tale scopo, sono state confezionate diverse miscele sottoposte a diverse prove che hanno permesso di valutarne sia il comportamento reologico sia le proprietà meccaniche.

Nel paragrafo 2 si riepilogano i requisiti richiesti alla miscela da studiare, tenendo presente le problematiche idrogeologiche e le condizioni reali di intervento.



Nel paragrafo 3 si descrivono le prove effettuate in laboratorio mentre nei capitoli 4 e 5 si riportano i risultati sperimentali relativi rispettivamente alla fase *preliminare*, effettuata per verificare le proprietà della miscela suggerita da precedenti studi, e a quella *definitiva* che ha permesso di individuare la tipologia di miscela e le proporzioni secondo cui devono essere miscelati i diversi costituenti al fine di ottenere un impasto che soddisfi i diversi requisiti.

I paragrafo 6 e 7 riportano rispettivamente la discussione dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali e le osservazioni conclusive sulla tipologia di miscela e la procedura di iniezione proposte per il consolidamento delle gallerie della cava Carale. Il paragrafo 8 fa riferimento ai risultati delle prove di caratterizzazione delle miscele confezionate in cantiere nell'ambito del primo progetto di intervento pilota che ha interessato la parte terminale dell'ultimo livello delle miniere.

Si riportano, inoltre, in allegato gli andamenti delle resistenze meccaniche a compressione in funzione del tempo per tutte le miscele confezionate in laboratorio e i dati della composizione di tali miscele.

2. REQUISITI

Nelle riunioni preliminari, alla presenza del Sig. Giovanni Giuseppe Regazzoni (Sindaco del comune di Santa Brigida), del Dott. Mario Spada, del Dott. Gian Marco Orlandi e dell'Ing. Luca Budelli (per lo Studio associato di geologia Spada), del Prof. Roberto Nova e dell'Ing. Riccardo Castellanza (del Dipartimento di Ingegneria Strutturale) e del Prof. Luca Bertolini e dell'Ing. Maddalena Carsana (del Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica), sono stati definiti i requisiti per la miscela da studiare, tenendo presente le problematiche idrogeologiche e le condizioni reali di intervento [1-3].

Le gallerie, disposte su quattro livelli, sono quasi completamente allagate e presentano sul fondo depositi fangosi (spessi anche oltre 50-60 cm) derivanti dalla dissoluzione del gesso e dell'anidrite di cui sono costituite [1]. Inoltre, si pone il problema della scarsa accessibilità delle gallerie. Si deduce, quindi, la necessità di definire una miscela caratterizzata da un comportamento reologico di tipo colabile in modo che possa essere introdotta dall'alto attraverso fori di iniezione. Inoltre, la miscela deve essere coesiva e stabile in acqua e deve potersi indurire a contatto con le acque solfatiche, pur garantendo i minimi requisiti prestazionali necessari per garantire un adeguato consolidamento dal punto di vista geotecnico. Alla miscela si richiede, inoltre, una ridotta massa volumica.

In considerazione del fatto che il volume totale di miscela da iniettare nelle gallerie è attorno a 60000 m³, è stato richiesto di minimizzare i costi utilizzando, per la percentuale maggiore della miscela, materiali a basso costo.

Per poter garantire i requisiti definiti per la miscela di riempimento si dovranno considerare le condizioni di messa in opera e la logistica dell'intervento.

Si prevede che l'intervento, in fase preliminare, venga effettuato con iniezioni praticate nella parte terminale dell'ultimo livello che rappresenta la zona più facilmente accessibile per la realizzazione delle iniezioni, oltre ad essere anche quella più prossima all'abitato. In una fase successiva potranno essere praticati altri fori, anche con finalità di controllo dell'intervento di riempimento.

Le prove di questo lavoro hanno inizio con la caratterizzazione delle proprietà di lavorabilità di una miscela analoga a quella che, un precedente studio condotto dal Dipartimento DIS del Politecnico di Milano [4], ha proposto per il riempimento delle gallerie, sulla base di preliminari risultati. Tale lavoro ha riguardato solo la caratterizzazione meccanica di alcune miscele di cui si riportano in Tabella 2.1 le composizioni. Alcune di queste miscele (indicate con la sigla 1 e 2) sono state confezionate con acqua, cemento e pozzolana mentre altre aggiungendo anche il terreno. Le miscele si differenziano, inoltre, per il rapporto acqua/cemento e per il dosaggio di cemento. I risultati delle prove meccaniche e di permeabilità di questo lavoro hanno evidenziato come la miscela denominata 5 (Tabella 2.1), e in parte la miscela 6, abbiano mostrato caratteristiche meccaniche compatibili con le esigenze di consolidamento delle gallerie (0.5-1 MPa).

Tabella 2.1 - Composizione e denominazione delle miscele cementizie studiate nell'ambito di un lavoro di ricerca condotto dal DIS [4].

Sigla miscela	Cemento (kg/m ³)	Terreno (kg/m ³)	Acqua (kg/m ³)	Pozzolana (kg/m ³)	Rapporto a/c	Densità (kg/m ³)
1	32	-	505	1262	16	1798
2	14	-	474	1355	35	1843
3	27	904	470	452	17,3	1853
4	37	918	459	459	12,5	1872
5	80	998	399	499	5	1975
6	142	887	443	443	3,1	1915



In particolare, è stato suggerito di orientare lo studio a favore della miscela 5, in quanto rappresenterebbe un buon compromesso fra le prestazioni meccaniche e le esigenze economiche.

3. PROVE DI LABORATORIO

Sono state effettuate diverse prove sperimentali volte allo sviluppo di una miscela cementizia che fosse in grado di soddisfare i requisiti precedentemente riportati. La caratterizzazione delle miscele confezionate ha riguardato sia le proprietà allo stato fresco sia quelle allo stato indurito. In questo paragrafo si riportano le differenti metodologie di prova.

3.1 Materiali utilizzati

Per il confezionamento delle miscele cementizie studiate sono stati utilizzati i materiali descritti di seguito.

3.1.1 Cemento

Si è utilizzato inizialmente un cemento tipo CEM II/B-LL 32.5R, ovvero un cemento Portland al calcare con una percentuale di calcare compresa fra 21 e 35% fornito da Tecnocem.

Ad una successiva fornitura, si è impiegato un cemento (CEM II/B-M (L-S) 32.5R fornito da Holcim (con aggiunta di calcare e loppa di altoforno).

3.1.2 Pozzolana

Si è utilizzata una pozzolana prelevata dai terreni della cava “Rossolera” del comune di Borgo Priolo (Pavia). La Figura 3.1 è relativa ad un campione tal quale di pozzolana. Per il confezionamento delle miscele la pozzolana è stata vagliata con un setaccio di apertura pari a 4.75 mm.

3.1.3 Terreni

Sono stati considerati quattro diversi tipi di terreno, due dei quali provenienti dal comune di Santa Brigida (indicati con la sigla *Arg1* e *Arg1**) di colore chiaro, mentre altri due (*Arg2* ed *Arg2**) prelevati a Dossena (località vicino a Santa Brigida) e di colore più scuro.



Figura 3.1 - Campione tal quale di pozzolana (a) e del terreno sciolto (*Arg1*) proveniente da Santa Brigida (b).

Si tratta di materiali sciolti costituiti, secondo percentuali variabili, da argilla, limo e sabbia, e in quantità minori da frammenti più grossolani. La distribuzione granulometrica dei terreni *Arg1*, *Arg1** e *Arg2*, effettuata dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIS) del Politecnico di Milano su campioni precedentemente vagliati a 2 mm, è riportata in Figura 3.2. Si osservano per i terreni *Arg1* e *Arg2* distribuzioni granulometriche simili, con diametri mediani (d_{50}) rispettivamente pari a 9 e 15 μm . Il terreno *Arg1**, più grossolano, presenta un d_{50} di 70 μm .

In Tabella 3.1 si sono riportate le composizioni di ciascun terreno e le loro principali caratteristiche di coesione, espresse in termini di limiti di Atterberg. Si osserva che il terreno *Arg1* è costituito in prevalenza da limo (48%) e in quantità inferiori da argilla e sabbia (rispettivamente pari a 30% e 22%). Il terreno *Arg1** è prevalentemente sabbioso (50%) e presenta una quantità di limo (36%) confrontabile con quella del terreno *Arg1*. Diversamente, il terreno *Arg2* è prevalentemente limoso (70%) e ha contenuti di sabbia e argilla rispettivamente pari a 12 e 18%. Il terreno *Arg2**, prelevato in una fase successiva, appare, all'analisi visiva sostanzialmente simile all'*Arg2*, solo un po' meno omogeneo e con una maggiore presenza di residui organici.

In termini di plasticità, il terreno *Arg1* ha il valore di indice plastico più elevato (26%), seguito dal terreno *Arg2* (17%) e da *Arg1** (8%).

In modo analogo alla pozzolana, una parte dei terreni *Arg1* e *Arg1** sono stati essiccati e sottoposti a vagliatura mediante un setaccio con apertura pari a 4.75 mm. Per il confezionamento delle miscele, il terreno *Arg1* è stato utilizzato sia vagliato sia tal quale. Il terreno *Arg2* è stato utilizzato umido senza essere sottoposto ad alcuna vagliatura (Figura

3.3); allo stesso modo, il terreno *Arg2** è stato utilizzato umido, ma dopo averlo sottoposto ad una vagliatura manuale, utilizzata per eliminare i frammenti lapidei più grossolani, ovvero con dimensioni maggiori di 1 cm di diametro.

3.1.4 Aggregati

Per il confezionamento di una miscela si è utilizzato anche un aggregato frantumato calcareo proveniente dalle cave di Zandobbio, distinto in tre diverse frazioni granulometriche (indicate, in ordine crescente di dimensioni, con *Polv*, *Calc1* e *Calc2*) (Figura 3.4).

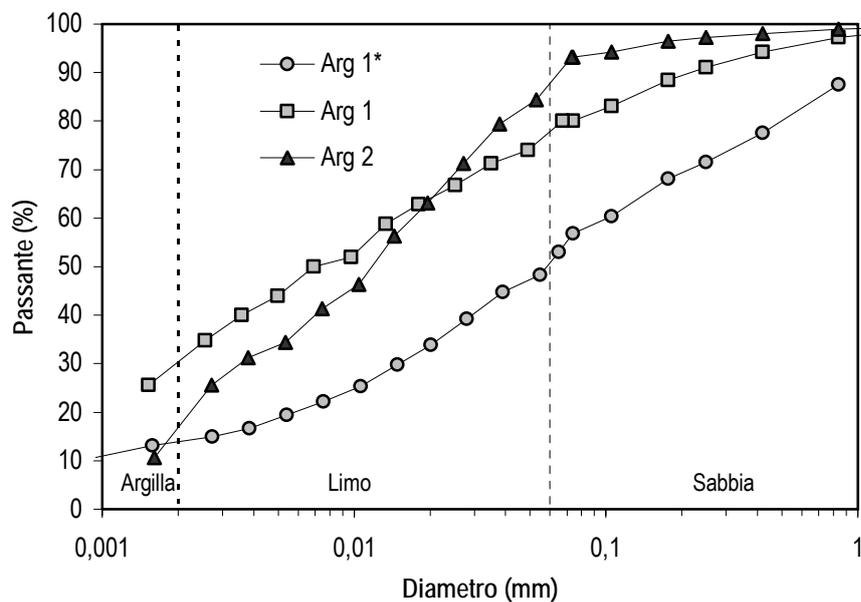


Figura 3.2 - Distribuzione granulometrica della pozzolana e di tre dei terreni utilizzati (*Arg1*, *Arg1** e *Arg2*) per confezionare le miscele cementizie.



Figura 3.3 - Campione tal quale del terreno (*Arg2**) proveniente da Dossena.

Tabella 3.1 - Riepilogo delle principali caratteristiche dei terreni (prove effettuate dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale).

<i>Materiali</i>	<i>Terreno S. Brigida</i>	<i>Terreno S. Brigida*</i>	<i>Terreno Dossena</i>
Denominazione	Arg1	Arg1*	Arg2
Sabbia (%) ($2 > d > 0.06$ mm)	22	50	12
Limo (%) ($0.06 > d > 0.002$ mm)	48	36	70
Argilla (%) ($d < 0.002$ mm)	30	14	18
Limite liquido (%)	50	24	42
Limite plastico (%)	24	17	25
Indice di plasticità (%)	26	8	17

Figura 3.4 - Frazioni granulometriche dell'aggregato calcareo: *Polv*, a), *Calc1* b) e *Calc2* c).

Nella Figura 3.5 si riportano le curve di distribuzione granulometrica degli aggregati calcarei impiegati; per confronto si è anche mostrata la curva di Fuller e quella risultante dalla combinazione delle diverse distribuzioni granulometriche, secondo le seguenti percentuali: 53% di polvere, 26% di *Calc1* e 21% di *Calc2*.

Per un'altra miscela si è utilizzato un aggregato tondeggianti (di origine alluvionale proveniente dal Po) prodotto da Sataf, suddiviso in diverse frazioni (Figura 3.6).

3.1.5 Additivi

Si è utilizzato l'additivo superfluidificante Dynamon SP3, a base acrilica prodotto dalla Mapei; come aerante, invece, è stato utilizzato l'additivo in polvere Mapeplast LA, fornito da Mapei.

Gli additivi sono stati aggiunti ad alcuni impasti secondo le dosi indicate dai produttori.

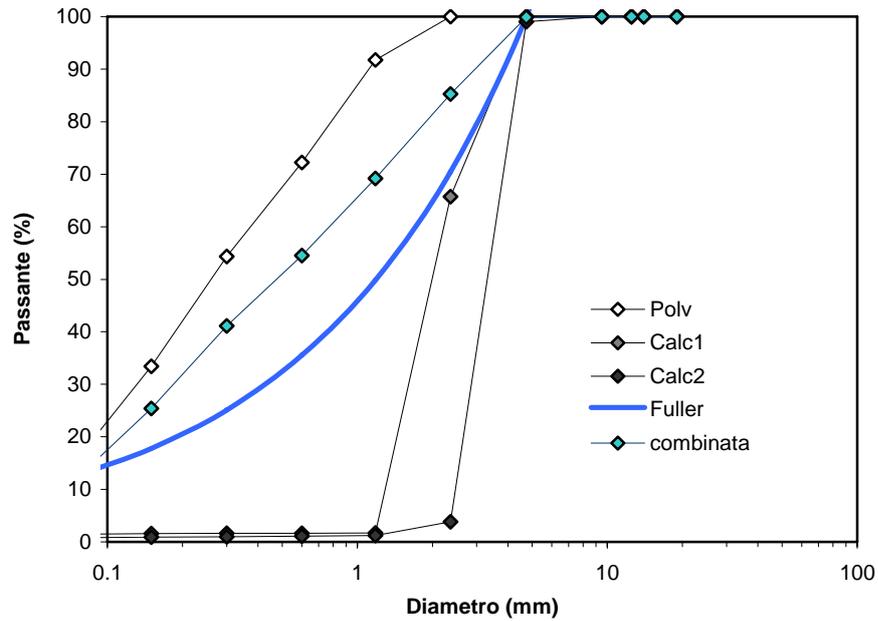


Figura 3.5 - Distribuzione granulometrica degli aggregati calcarei frantumati.

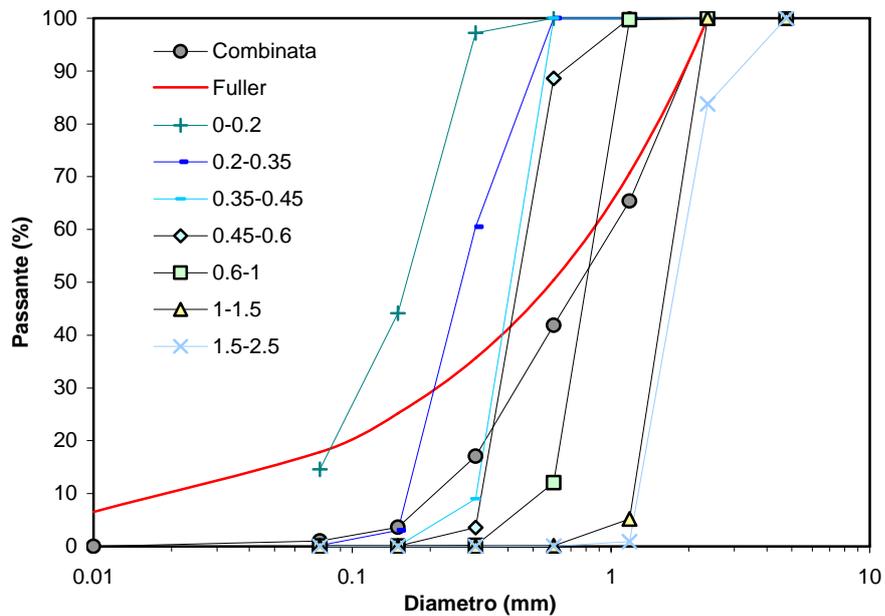


Figura 3.6 - Distribuzione granulometrica degli aggregati tondeggianti.

3.1.6 Acqua

Per il confezionamento della maggior parte delle miscele è stata utilizzata acqua potabile prelevata direttamente dalla rete idrica dell'acquedotto di Milano; solo per alcune miscele si è impiegata acqua solfatica, attinta dalle gallerie di S. Brigida, al fine di valutare l'effetto dei solfati sulle proprietà delle miscele.

3.2 Fasi del lavoro

Il lavoro sperimentale si è articolato in diverse fasi:

- una *fase preliminare* per verificare le proprietà della miscela, suggerita da precedenti studi, in relazione alle esigenze di iniettabilità; in base ai risultati ottenuti è stato, quindi, possibile individuare le modifiche da apportare al mix design;
- una *seconda fase* che ha permesso di individuare la tipologia di miscela e le proporzioni secondo cui devono essere miscelati i diversi costituenti al fine di ottenere un impasto che soddisfacesse i requisiti di lavorabilità;
- una *terza fase* in cui si è utilizzato, per il confezionamento della miscela, un unico tipo di terreno (*Arg2**) e si è valutato l'effetto di differenti dosaggi di cemento (da 100 a 250 kg/m³) nonché dell'acqua solfatica, sulle proprietà del materiale allo stato indurito.

Sulla base dei requisiti stabiliti nel precedente studio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale si è deciso di confezionare miscele cementizie sostituendo la pozzolana con il terreno. La miscela, costituita da acqua, cemento e terreno, viene ottenuta mescolando nell'ordine terreno con acqua, sino ad ottenere un impasto omogeneo, e aggiungendo solo successivamente il cemento.

In Tabella 3.2 sono riepilogati i getti delle miscele cementizie con la loro denominazione e la data di confezionamento. Inoltre, sono indicati i materiali utilizzati per il confezionamento delle miscele ed il rapporto acqua/cemento.

3.3 Prove per la caratterizzazione delle miscele

Le miscele sono state caratterizzate sia allo stato fresco (con prove di lavorabilità e misure di aria inglobata e densità) sia allo stato indurito (mediante prove meccaniche di resistenza a compressione, misure di densità e di resistività elettrica, nonché osservazioni al microscopio elettronico a scansione).

3.3.1 Consistenza

La lavorabilità delle miscele è stata misurata mediante la prova di spandimento o prova alla tavola a scosse che consiste nel misurare il diametro medio dello spandimento dopo aver posto la miscela in un apposito stampo tronco-conico e sottoposta a 15 colpi, secondo quanto stabilito dalla norma UNI 7044-72 (Figura 3.7).



Tabella 3.2 - Riepilogo dei getti effettuati e loro denominazione.

<i>Fase di lavoro</i>	<i>Sigla di getto</i>	<i>Data getto</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Condizione del terreno</i>	<i>Rapporto a/c</i>
I	M85	17/06/2005	Pozzolana, acqua, terreno <i>Arg1</i> e cemento	Secco, passante a 4.75 mm	5
	M85-A				5.8
	M85-B				7
	M85-C		Pozzolana, acqua, terreno <i>Arg1</i> , cemento e additivi (fluidificante e aerante).	Secco, passante a 4.75 mm	7
	M86		Aggregato frantumato, acqua cemento e additivo aerante.	-	1.5
	M88	05/07/2005	Aggregato tondeggiate, acqua Cemento (circa 100 kg/m ³) e additivo aerante.	-	1.5
	M87-1		Acqua, terreno <i>Arg1</i> e cemento (circa 150 kg/m ³).	Secco, passante a 4.75 mm	5.6
	M87-2				2.7
	M87-3	07/07/2005			3.6
	M89-7	07/07/2005	Acqua, terreno <i>Arg2</i> e cemento (circa 130 kg/m ³).	Umido, no vagliatura	4.2
II	M90-7	20/07/2005	Acqua, terreno <i>Arg1</i> e cemento (circa 140 kg/m ³). Getto in acqua	Secco, passante a 4.75 mm	4.3
	M90-8	20/07/2005			4.7
	M91-11	27/07/2005	Acqua, terreno <i>Arg2</i> e cemento (circa 160 kg/m ³). Getto in acqua	Umido, no vagliatura	3.9
	M92-5	23/09/2005	Acqua, terreno <i>Arg1</i> * e cemento (circa 150 kg/m ³)	Secco, no vagliatura	3.8
	M93-7	05/10/2005		Secco, passante a 4.75 mm	3.9
	M93-8	05/10/2005			4.4
	M94-9	02/11/2005	Acqua, terreno <i>Arg2</i> e cemento (circa 150 kg/m ³)	Umido, no vagliatura	4.9
	M95-3 ^				
	M96-8	17/11/2005	Acqua, terreno <i>Arg2</i> , aggregato frantumato e cemento (circa 150 kg/m ³).		
	M97-6	24/11/2005	Acqua, terreno <i>Arg1</i> * e cemento (circa 150 kg/m ³)	Umido, passante a 4.75 mm	3.65
	M98-2	02/12/2005	Acqua, terreno <i>Arg2</i> e cemento (circa 150 kg/m ³)	Umido, no vagliatura	4.7

<i>Fase di lavoro</i>	<i>Sigla di getto</i>	<i>Data getto</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Condizione del terreno</i>	<i>Rapporto a/c</i>
III	M99-9	25/01/2006	Acqua deionizzata, terreno Arg2* e cemento (150 kg/m ³) Lavorabilità nel tempo, V-Funnel	Umido, no vagliatura	4.7
	M100-6	01/03/2006	Acqua deionizzata, terreno Arg2* e cemento (150 kg/m ³)		4.4
	M101-5	17/03/2006	Acqua solfatica, terreno Arg2* e cemento (circa 150 kg/m ³).		4.3
	M102-6^^	25/03/2006	Acqua, terreno Arg2* e cemento (circa 150 kg/m ³)	Umido, passante a 4.75 mm	4.7
	M104-2	12/05/2006	Acqua, terreno Arg2* e cemento (100 kg/m ³)	Umido, vagliatura manuale	7
	M105-2		Acqua, terreno Arg2* e cemento (150 kg/m ³)		4.6
	M107-2	16/05/2006	Acqua, terreno Arg2* e cemento (100 kg/m ³)		3.4
	M108-2		Acqua, terreno Arg2* e cemento (250 kg/m ³) Lavorabilità nel tempo		2.7
	M110-2	19/05/2006	Acqua solfatica, terreno Arg2* e cemento (100 kg/m ³)		7
	M111-2		Acqua solfatica, terreno Arg2* e cemento (150 kg/m ³) Lavorabilità nel tempo		4.6
	M113-2	26/05/2006	Acqua solfatica, terreno Arg2* e cemento (200 kg/m ³)		3.4
	M114-2		Acqua solfatica, terreno Arg2* e cemento (250 kg/m ³)		2.7

^ La miscela M95-3 è stata confezionata senza aggiunte progressive di acqua, ma considerando direttamente il dosaggio totale di acqua.

* Fase relativa all'impiego di Arg2*

^^La miscela è stata confezionata impiegando inizialmente solo la frazione di terreno passante al vaglio 4.75 mm successivamente si è aggiunto anche il trattenuto.



(a)



(b)

Figura 3.7 - Valutazione della lavorabilità di una miscela mediante prova con tavola scossa (a) e misura dello spandimento (b).

La consistenza, espressa in percentuale, viene calcolata in base alla relazione

$$C = \frac{d_m - d}{d} \cdot 100, \text{ dove } d_m \text{ è la media dei diametri di spandimento misurati su due direzioni}$$

ortogonali fra loro e d è il diametro inferiore dello stampo.

3.3.2 Aria inglobata e massa volumica

La percentuale di aria inglobata è stata valutata utilizzando un porosimetro per malte, il cui funzionamento si basa sulla variazione di volume della colonna d'aria che esercita una certa pressione su un campione di miscela; sullo strumento si legge direttamente la percentuale di aria presente. La massa volumica della miscela allo stato fresco è stata ottenuta mediante pesatura di un contenitore di volume noto, dopo averlo riempito con un campione di miscela.

3.3.3 Colabilità

Per verificare che la miscela abbia caratteristiche di colabilità, si è simulata in scala ridotta, la fase di riempimento delle gallerie (Figura 3.8) che verrà effettuata attraverso fori di iniezioni. A tal scopo si è versata la miscela all'interno di un contenitore mediante un tubo trasparente (con diametro pari a 50 mm) da un'altezza di 1.50 m.



(a)



(b)

Figura 3.8 - Valutazione della colabilità di una miscela gettata dall'alto mediante un tubo all'interno di un contenitore (a) ed esempio di risultato (b).

La miscela deve poter fluire all'interno del tubo evitando fenomeni di intasamento. Al fine di valutare la mobilità della miscela nelle gallerie anche in presenza di acqua, la miscela è stata gettata, ponendo il tubo nel contenitore sia parzialmente riempito sia colmo di acqua.

Un ulteriore parametro di misura della colabilità della miscela è il tempo di svuotamento di un imbuto (Figura 3.9) con capacità 1.1 litri, con un diametro inferiore pari a 40 mm ed un diametro superiore pari a 180 mm nonché un'inclinazione delle pareti di 23° rispetto al suo asse. Il tempo di svuotamento diminuisce all'aumentare della fluidità della miscela.

3.3.4 Resistenza meccanica a compressione

Per le prove di caratterizzazione meccanica sono stati confezionati provini prismatici di dimensioni 40x40x160 mm (Figura 3.10a). La massa volumica del materiale indurito è stata calcolata mediante pesatura dei provini prismatici. Le misure sono state eseguite subito dopo lo scasso e prima di ogni prova di compressione (Figura 3.10b) a diversi tempi di stagionatura a umido (1, 7, 28 e 90 giorni). Le prove sono state effettuate, mediante una pressa elettromeccanica, in controllo di carico, imponendo una velocità di sollecitazione di 2400 N/s.

Si è determinata la forza massima di compressione che il provino riesce a sopportare prima di rompersi. La resistenza a compressione è stata calcolata come $R_c = \frac{F}{A}$, dove F è la forza applicata e A è l'area della superficie sollecitata durante la prova (1600 mm²).

Alcune delle miscele, colate all'interno dei contenitori riempiti d'acqua per simulare il riempimento delle gallerie, sono state carotate a diversi tempi di stagionatura per prelevare carote con diametro di 44 mm (Figura 3.11).

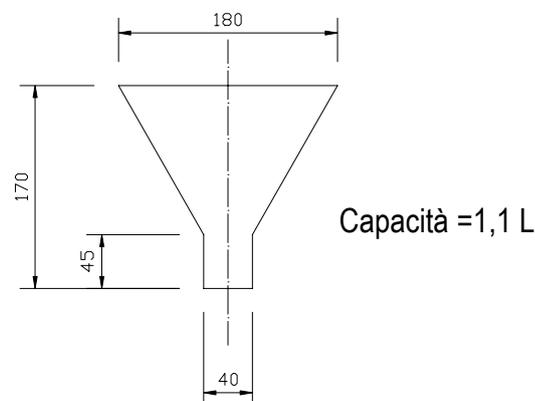


Figura 3.9 - Imbuto impiegato nella misura del tempo di svuotamento (dimensioni in millimetri).



(a)



(b)

Figura 3.10 - Cassero per confezionare provini prismatici (a) utilizzati per la prova di resistenza a compressione (b).



Figura 3.11 – Carotaggio della miscela.

Successivamente alla rettifica effettuata su tali carote, è stata valutata la massa volumica e la resistenza meccanica a compressione (R_{carota}), che è stata convertita in resistenza su cubo (R_{cubo}) mediante la seguente relazione:

$$R_{cubo} = \frac{2.3}{1.5 + \frac{1}{\lambda}} \cdot R_{carota}$$

dove λ sta ad indicare la snellezza, ovvero il rapporto fra l'altezza e il diametro della carota.

Per valutare gli effetti delle condizioni ambientali nelle quali verrà effettuato il getto, sulle proprietà della miscela si sono esposti i provini prismatici confezionati con le miscele gettate dal 12/05/2006 al 26/05/2006 (Tabella 3.2) in diversi ambienti di prova simulanti differenti condizioni.

Dopo 7 giorni di stagionatura a umido (a 20°C ed umidità relativa del 100%) i provini prismatici sono stati posti in una camera climatica in controllo di temperatura a 5°C (per favorire le azioni espansive legate all'attacco solfatico). Alcuni sono stati immersi in acqua solfatica, altri in acqua potabile prelevata dalla rete idrica urbana di Milano ed altri mantenuti in condizioni asciutte.

Infine, dopo 28 giorni dal confezionamento, ovvero 21 giorni di esposizione alle condizioni descritte, un provino immerso in acqua solfatica, è stato mantenuto a 5°C, ma in condizioni asciutte (provino IX), mentre un provino, sino al quel momento mantenuto asciutto, è stato immerso in acqua solfatica (provino III).

Nelle Tabelle sono riepilogati i provini, individuati con sigle e distinti per condizioni di prova (Tabella 3.3 e Tabella 3.4). Tali provini sono stati sottoposti nel tempo a misure di massa, ed a prove di resistenza a compressione.

3.3.5 Microscopia elettronica a scansione ambientale (ESEM)

Frammenti di alcuni provini, sottoposti alla prova di compressione, sono stati conservati e successivamente osservati al microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM).

L'osservazione è stata effettuata su frammenti stagionati a 28 giorni. Il riepilogo dei campioni osservati e le relative sigle sono stati riportati nella Tabella 3.5. Per interrompere la stagionatura i frammenti di miscela sono stati immersi in acetone e asciugati con aria calda.

I campioni da osservare sono stati posizionati su un portacampione mobile, in grado di consentire una visione completa del campione sotto diverse angolazioni ed a diversi ingrandimenti. Nei punti più rappresentativi sono state effettuate delle analisi EDS. Lo strumento utilizzato per l'osservazione è un microscopio elettronico a scansione *ZEISS EVO 50EP*, corredato di spettrometro EDS a raggi X. Lo strumento permette di effettuare le osservazioni in alto vuoto. L'osservazione è stata effettuata con una pressione di aria in camera nell'intorno di 200 mPa.

Tabella 3.3 - Riepilogo dei provini prismatici confezionati con impiego di acqua potabile, esposti in camera a temperatura controllata (5°C) in diverse condizioni di prova.

<i>Sigla Getto</i>	<i>Dosaggio di cemento (kg/m³)</i>	<i>Sigla provino</i>	<i>Ambiente di esposizione</i>	<i>Tempo di esposizione (giorni)</i>
104	100	M104-2/I	5°C, Asciutto	7
		M104-2/II	5°C, Asciutto	21
		M104-2/III	5°C, Asciutto	21
		M104-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M104-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M104-2/V	5°C, saturo, acqua	53
		M104-2/VI	5°C, saturo, acqua	21
		M104-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M104-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53
		M104-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M104-2/IX	5°C, Asciutto	32
105	150	M105-2/I	5°C, Asciutto	7
		M105-2/II	5°C, Asciutto	21
		M105-2/III	5°C, Asciutto	21
		M105-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M105-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M105-2/V	5°C, saturo, acqua	53
		M105-2/VI	5°C, saturo, acqua	21
		M105-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M105-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53
		M105-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M105-2/IX	5°C, Asciutto	32
107	200	M107-2/I	5°C, Asciutto	7
		M107-2/II	5°C, Asciutto	21
		M107-2/III	5°C, Asciutto	21
		M107-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M107-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M107-2 V	5°C, saturo, acqua	53
		M107-2 VI	5°C, saturo, acqua	21
		M107-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M107-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53
		M107-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M107-2/IX	5°C, Asciutto	32



Sigla Getto	Dosaggio di cemento (kg/m ³)	Sigla provino	Ambiente di esposizione	Tempo di esposizione (giorni)
108	250	M108-2/I	5°C, Asciutto	7
		M108-2/II	5°C, Asciutto	21
		M108-2/III	5°C, Asciutto	21
		M108-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M108-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M108-2 V	5°C, saturo, acqua	53
		M108-2 VI	5°C, saturo, acqua	21
		M108-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M108-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53
		M108-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M108-2/IX	5°C, Asciutto	32

Tabella 3.4 - Riepilogo dei provini prismatici confezionati con impiego di acqua solfatica, esposti in camera a temperatura controllata (5°C) in diverse condizioni di prova

<i>Sigla getto</i>	<i>Dosaggio di cemento (kg/m³)</i>	<i>Sigla provino</i>	<i>Ambiente di esposizione</i>	<i>Tempo di esposizione (giorni)</i>
110	100	M1104-2/I	5°C, Asciutto	7
		M110-2/II	5°C, Asciutto	21
		M110-2/III	5°C, Asciutto	21
		M110-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M110-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M110-2/V	5°C, saturo, acqua	53
		M110-2/VI	5°C, saturo, acqua	21
		M110-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M110-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53
		M110-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M110-2/IX	5°C, Asciutto	32
111	150	M111-2/I	5°C, Asciutto	7
		M111-2/II	5°C, Asciutto	21
		M111-2/III	5°C, Asciutto	21
		M111-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M111-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M111-2/V	5°C, saturo, acqua	53
		M111-2/VI	5°C, saturo, acqua	21
		M111-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
M111-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53		



<i>Sigla getto</i>	<i>Dosaggio di cemento (kg/m³)</i>	<i>Sigla provino</i>	<i>Ambiente di esposizione</i>	<i>Tempo di esposizione (giorni)</i>
111	150	M111-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M111-2/IX	5°C, Asciutto	32
113	200	M113-2/I	5°C, Asciutto	7
		M113-2/II	5°C, Asciutto	21
		M113-2/III	5°C, Asciutto	21
		M113-2/III	5°C, saturo acqua solfatica	32
		M113-2/IV	5°C, Asciutto	53
		M113-2 V	5°C, saturo, acqua	53
		M113-2 VI	5°C, saturo, acqua	21
		M113-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M113-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica	53
		M113-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica	21
		M113-2/IX	5°C, Asciutto	32
		114	250	M114-2/I
M114-2/II	5°C, Asciutto			21
M114-2/III	5°C, Asciutto			21
M114-2/III	5°C, saturo acqua solfatica			32
M114-2/IV	5°C, Asciutto			53
M114-2 V	5°C, saturo, acqua			53
M114-2 VI	5°C, saturo, acqua			21
M114-2/VII	5°C, saturo acqua solfatica			21
M114-2/VIII	5°C, saturo acqua solfatica			53
M114-2/IX	5°C, saturo acqua solfatica			21
M114-2/IX	5°C, Asciutto			32

Tabella 3.5 - Elenco dei campioni osservati al microscopio elettronico a scansione.

<i>Sigla campione</i>	<i>Cemento (kg/m³)</i>	<i>Tipo di acqua d'impasto</i>	<i>Esposizione (giorni)</i>	<i>Condizioni di Esposizione</i>
M-105-2 VI	150	Acqua	21	Acqua
M-105-2 VII		Acqua		soluzione solfatica
M-111-2 VI		soluzione solfatica		Acqua
M-108-2 VI	250	Acqua		Acqua
M-108-2 VII		Acqua		soluzione solfatica
M-114-2 VI		soluzione solfatica		Acqua

3.3.6 Resistività elettrica

Il processo di idratazione che avviene nelle diverse miscele realizzate induce delle modificazioni nelle loro proprietà ed in particolare nella resistività elettrica. In base a tale considerazione si è deciso di utilizzare quest'ultima come indice della porosità della pasta

cementizie, ovvero del grado di idratazione del cemento, monitorando le sue variazioni nel tempo.

La misura è stata fatta utilizzando due piastre in rame quadrate poste su due facce opposte del provino e interponendo una spugna imbevuta d'acqua tra provino e metallo. Con un conduttivimetro si è misurata la conduttanza (G). La resistività ρ è stata calcolata con la seguente relazione:

$$\rho = \frac{K}{G}$$

dove:

$K = 1$ cm; costante di cella dipendente dalla geometria dei provini; $G =$ conduttanza (Ω^{-1} o Siemens (S)). I provini sui quali sono state effettuate le misure di resistività, sono stati lasciati stagionare immersi in una vasca d'acqua.

4. FASE PRELIMINARE

La fase preliminare ha previsto il confezionamento di diversi getti di cui si riportano nei paragrafi che seguono i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione. I getti sono stati raggruppati in funzione dello scopo per cui sono stati effettuati.

4.1 Miscela proposta e modifiche

Inizialmente è stata confezionata una miscela analoga a quella proposta dal precedente studio, che è stata successivamente sottoposta ad una serie di modifiche (§4.1). Come soluzione alternativa sono stati confezionati altri tipi di miscele, differenti per costituenti e modalità di confezionamento (§4.2 e §4.3).

Getto M85. È stata confezionata la miscela indicata con la sigla M85 di composizione analoga alla miscela 5 definita dallo precedente studio condotto presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale (Tabella 2.1). Un volume di impasto di circa 2.5 litri è stato ottenuto miscelando (Tabella 4.1): 80 kg/m^3 di cemento CEM II/B-LL 32.5R, 400 kg/m^3 di acqua, oltre a 1000 kg/m^3 di terreno *ArgI* e 500 kg/m^3 di pozzolana (entrambi vagliati con un setaccio con diametro pari a 4.75 mm). Il rapporto acqua/cemento (a/c) è pari a 5, mentre il rapporto acqua/terreno (a/t) è 0.4. L'impasto M85 non è lavorabile e non presenta alcuna fluidità.

Tabella 4.1 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti dai getti preliminari.

<i>Sigla</i>	<i>M85</i>	<i>M85-A</i>	<i>M85-B</i>	<i>M85-C</i>
Data getto	17/06/2005	17/06/2005	17/06/2005	17/06/2005
Cemento (kg/m ³)	80	75	69	69
Acqua (kg/m ³)	400	437	482	482
Pozzolana (kg/m ³)	500	469	429	429
Terreno secco <i>Arg1</i> (kg/m ³)	1000	938	858	858
Tipo di aggregato	-	-	-	-
Aggregato (kg/m ³)	-	-	-	-
Additivo superfluidificante (kg/m ³) [^]	-	-	-	26
Acqua / terreno (a/t)	0.4	0.47	0.56	0.56
Acqua / cemento (a/c)	5	5.83	7.02	7.02
Consistenza (%)	-	-	-	-
Densità fresco, kg/m ³	-	1924	-	1802
Aria (%)	-	-	-	2
R _{c, 2giorni} (MPa)	-	-	-	-
R _{c, 7giorni} (MPa)	-	0.73	-	0.32-0.34
R _{c, 28 giorni} (MPa)	-	0.86-0.90	-	0.35-0.42
R _{c, 90 giorni} (MPa)	-	-	-	0.86-0.89

[^] come additivo superfluidificante è stato impiegato il DYNAMON SP3

Tenendo conto che la miscela 5 è stata confezionata con terreno *Arg1* in condizioni umide, si è aggiunto all'impasto la quantità d'acqua persa durante l'essiccamento, effettuato prima della vagliatura.

Il modesto aumento del dosaggio d'acqua (437 kg/m³ rispetto a 400 kg/m³) non ha sostanzialmente modificato le caratteristiche allo stato fresco dell'impasto, indicato in Tabella 4.1, con la sigla M85-A. La Figura 4.1 evidenzia la scarsa lavorabilità dell'impasto M85-A a causa della quale si sono complicate le operazioni di confezionamento e costipazione dei provini prismatici destinati alle prove di resistenza a compressione.

Al medesimo impasto si è, quindi, aggiunta altra acqua incrementandone il dosaggio sino a 482 kg/m³ e raggiungendo un rapporto *a/c* pari a 7 (M85-B). La scarsa lavorabilità dell'impasto non ha comunque permesso di effettuare la prova di consistenza con la tavola a scosse (Figura 4.2).

Al fine di ottenere una miscela fluida si è tentato anche l'impiego di un additivo superfluidificante. All'impasto M85-C si è aggiunto l'additivo superfluidificante per calcestruzzi Dynamon SP3, secondo i dosaggi massimi consigliati dal produttore (36 kg/m^3). Questo additivo non ha indotto sostanziali modifiche riguardo alla lavorabilità dell'impasto. Con le miscele M85-A e M85-C sono stati confezionati diversi provini prismatici stagionati a umido per 28 giorni. Dalle prove di compressione (Tabella 4.1) risulta che la miscela M85-A con rapporto a/c pari a 5.83 presenta, dopo una settimana di stagionatura, resistenze a compressione medie pari a 0.73 MPa e raggiunge valori poco superiori a questo dopo 28 giorni (0.88 MPa). L'aumento del dosaggio di acqua ha incrementato il rapporto a/c divenuto per la miscela M85-C pari a circa 7. Ne consegue che la miscela indurita presenta resistenze inferiori rispetto a quelle misurate per la miscela M85-A, ridotte di circa il 50%; si sono misurate mediamente resistenze pari a 0.33 e 0.38 MPa, rispettivamente dopo 7 e 28 giorni di stagionatura.



Figura 4.1 - Confezionamento di provini prismatici con la miscela M85-A.



(a)



(b)

Figura 4.2 - Impasto M85-C (a) sottoposto alla prova di consistenza con la tavola a scosse (b).

4.2 Miscele fluidificate

Tra le modifiche da apportare alla miscela di riferimento si è considerata anche la completa sostituzione della pozzolana con del terreno. La granulometria grossolana della pozzolana utilizzata, infatti, non è in grado di garantirne la reattività pozzolanica. Pertanto essa si comporterebbe come aggiunta sostanzialmente inerte.

Si sono effettuati, quindi, diversi getti per verificare la possibilità di confezionare impasti realizzati con solo cemento, acqua e terreno. Per poter realizzare miscele di questo tipo [7-11] è necessario fluidificare inizialmente terreno con acqua e, solo quando si è ottenuto un impasto omogeneo e fluido, si è effettuata l'aggiunta di cemento.

Getto M87. Un primo impasto (denominato M87-1) è stato ottenuto partendo dal terreno *Arg1* precedentemente essiccato e vagliato con un setaccio di apertura di 4.75 mm.

Si sono pesati 2 kg di terreno secco e si è progressivamente aggiunta acqua tenendo l'impasto sotto miscelazione. Quando si sono aggiunti 930 g di acqua si è ottenuto un impasto sufficientemente fluido. Considerando una densità di 2.7 kg/l per l'argilla secca e di 1 kg/l per l'acqua, si è ottenuto un volume di 1.67 litri. Si sono quindi aggiunti 167 g di cemento (CEM II/B-LL 32.5R). Considerando una densità di 3.15 kg/l per il cemento, si è calcolata la composizione volumetrica dell'impasto che è risultata pari a 1160 kg/m³ di terreno essiccato, 540 kg/m³ di acqua e 97 kg/m³ di cemento (Tabella 4.2). Si è così ottenuto un rapporto acqua/cemento (*a/c*) pari a 5.5 ed un rapporto acqua/terreno (*a/t*) di 0.47; si è, quindi, misurata la lavorabilità della miscela con la tavola a scosse e si è rilevato uno spandimento medio di 170 mm corrispondente a una consistenza del 70%. Con questa miscela sono stati confezionati provini prismatici sottoposti a prove di compressione dopo diversi periodi di stagionatura. Per la miscela, che indurita presenta una densità media di 1656 kg/m³, si sono misurate resistenze a compressione modeste nei primi giorni di stagionatura; dopo 2 giorni la resistenza media a compressione è pari a 0.11 MPa. Con il procedere dell'idratazione la resistenza è aumentata e ha raggiunto 1 MPa dopo 3 mesi di stagionatura.

A parità di rapporto acqua/terreno (*a/t* = 0.47) e tipo di terreno, si sono confezionate due miscele (M87-3 e M87-2) con un contenuto di cemento superiori a M87-1 (pari rispettivamente a 146 e 195 kg/m³) e un rapporto acqua/cemento (*a/c*) rispettivamente pari a 3.64 e 2.68.

Tabella 4.2 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M86, M87, M88 e M89.

<i>Sigla</i>	<i>M87-1</i>	<i>M87-2</i>	<i>M87-3</i>	<i>M89-7</i>	<i>M88</i>
Data getto	05/07/2005	05/07/2005	07/07/2005	07/07/2005	05/07/2005
Cemento (kg/m ³)	97	195	146	129	145
Acqua (kg/m ³)	540	524	531	649	218
Aggregato (kg/m ³)	-	-	-	-	1900
Tipo di aggregato	-	-	-	-	tondeggiante
Tipo di terreno	<i>Arg1</i>	<i>Arg1</i>	<i>Arg1</i>	<i>Arg2</i>	-
Umidità terreno (%)	0	0	0	26.8	-
Vagliatura	passante a 4.75 mm	passante a 4.75 mm	passante a 4.75 mm	no	-
Terreno secco (kg/m ³)	1160	1119	1142	836	-
Acqua / terreno (a/t)	0.47	0.47	0.47	0.78	-
Acqua / cemento (a/c)	5.57	2.68	3.64	5	1.5
Volume (litri)	1.7	1	3.1	4	4
Spandimento D ₁ (mm)	170	175	165	153	160
Spandimento D ₂ (mm)	170	175	165	153	165
Consistenza (%)	70	75	65	53	62.5
Densità fresco (kg/m ³)	-	-	1824	1552	1606
Aria (%)	-	-	2.2	1	28
Densità indurito (kg/m ³)	1773	1835	1835	1522	1554
R _{c,2 giorni} (MPa)	0.11	0.37-0.38	-	-	0.33-0.38
R _{c,7giorni} (MPa)	0.26	0.60-0.61	0.55-0.58	0.75-0.80	0.50-0.66
R _{c,28 giorni} (MPa)	0.72-0.76 ^(^)	0.70-0.71 ^(^)	0.78-0.90	1.19-1.28 ^(^)	1.12-1.13
R _{c,90 giorni} (MPa)	0.99-1.01	0.92-0.99	-	1.32-1.66	-

([^]) Prova di resistenza effettuata fra la terza e quarta settimana di stagionatura a umido.

La miscela M87-1 è stata confezionata con un volume di 1.7 litri, M87-2 con un volume di 1 litro ed M87-3 con un volume maggiore pari a 3 litri.

Le miscele M87-3 e M87-2 hanno mostrato una lavorabilità simile alla M87-1; si sono misurate consistenze di 65-75%. La diminuzione del rapporto *a/c* ha evidenziato un leggero aumento delle prestazioni meccaniche soprattutto alle brevi stagionature (7 giorni), alle quali si sono misurate resistenze a compressione medie pari a 0.26, 0.57 e 0.61 MPa, rispettivamente per le miscele M87-1, M87-3 e M87-2 (Tabella 4.2).

Getto M89. Per valutare la possibilità di fluidificare un diverso tipo di terreno, si è confezionata, in maniera analoga al getto M87, una miscela con il terreno *Arg2* (non vagliato e utilizzato in condizioni umide). Per effettuare il getto M89 si sono inizialmente miscelati 4.23 kg di terreno *Arg2* con 0.935 litri di acqua, ottenendo un impasto di terreno fluidificato (M89-4) con consistenza pari a 32.5%. Non avendo l'impasto un'adeguata lavorabilità, si è aggiunta altra acqua alla miscela che ha conferito una consistenza di 77.5% (M89-6).

Per raggiungere una lavorabilità confrontabile con quella delle miscele M87, confezionate con un diverso tipo di terreno (*Arg2*), è stato necessario utilizzare, prima ancora di aggiungere cemento, un quantitativo di acqua superiore. A questo punto, dopo l'aggiunta di cemento, la miscela finale è composta da 129 kg/m³ di cemento, 836 kg/m³ di terreno secco e 649 kg/m³ di acqua, per un volume finale di 4 litri (Tabella 4.2).

Malgrado la miscela M89-7 presenti un rapporto acqua/cemento superiore ($a/c = 5.02$, $a/t = 0.77$) a quello della miscela M87-2, le prestazioni meccaniche già dopo 7 giorni di stagionatura sono leggermente superiori; si misurano, infatti, valori di resistenza a compressione di 0.77 MPa che raggiungono 1.23 e 1.49 MPa rispettivamente dopo 1 e 3 mesi di stagionatura. Questo migliore comportamento potrebbe essere attribuito al diverso tipo di terreno utilizzato (*Arg2*).

4.3 Miscele CLSM

In base ai requisiti di lavorabilità richiesti si è considerata anche l'ipotesi di confezionare un diverso genere di miscela che, secondo la classificazione proposta dall'American Concrete Institute [12], vengono denominate CLSM (Controlled Low Strength Materials). Si tratta di miscele cementizie caratterizzate da un'elevata fluidità e da proprietà autolivellanti che consentono la messa in opera senza alcuna compattazione, anche in condizioni di geometria complessa o di difficile accessibilità (ad esempio in minitunnel) [13]. La resistenza meccanica di tali materiali deve essere bassa, viene intenzionalmente mantenuta attorno a 1-2 MPa, per consentire un'eventuale rimozione. Per confezionare miscele di CLSM si ricorre a un modesto contenuto di cemento, a rapporti a/c elevati (fino a 2-2,5 in peso) e all'impiego di additivi aeranti che permettono di introdurre una elevata percentuale di aria inglobata e, quindi, ridurre la densità del materiale. L'aria inglobata contribuisce anche ad aumentare la fluidità della miscela fresca (per cui l'aerante può di fatto sostituire il fluidificante).

Getto M88. Si è deciso di confezionare un impasto di CLSM con un aggregato tondeggiate (Tabella 4.2), e un additivo aerante in polvere (0.5 kg/m^3 di Mapeplast) per un volume finale di 2 litri. In particolare per tale miscela si è utilizzato l'aggregato tondeggiate prodotto da Sataf, suddiviso in diverse frazioni impiegate nelle seguenti percentuali: 9% della frazione con diametro massimo pari a 0.2 mm, 14% della frazione con particelle con diametro compresa fra 0.2 e 0.35 mm, 9% della frazione granulometrica compresa fra 0.2 e 0.35 mm, 9% della frazione granulometrica compresa fra 0.35 e 0.45 mm, 10% della frazione compresa fra 0.45 e 0.60 mm, 18% della frazione compresa fra 0.60 e 1 mm, 17% della frazione compresa fra 1 e 1.5 mm e 23% della frazione con diametro inferiore a 2.5 mm.

La miscela M88 ha inglobato il 28% di aria e ha presentato una densità di 1606 kg/m^3 . Con la prova di lavorabilità, mediante la tavola a scosse, si è misurato uno spandimento medio di 165 mm, ovvero una consistenza pari a 63%. Le prove di resistenza a compressione hanno mostrato resistenze medie a compressione pari a 0.35, 0.58 e 1.13 MPa, rispettivamente dopo 2, 7 e 22 giorni di stagionatura.

4.4 Scelta del tipo di miscela

Le prove descritte nei §4.2. e §4.3. hanno consentito di individuare il tipo di miscela più adatta al riempimento delle gallerie. Per la miscela di riempimento si è escluso l'utilizzo di pozzolana, in quanto i risultati di caratterizzazione delle miscele M85 hanno evidenziato che tale aggiunta, non essendo sufficientemente fine, non manifesta le sue potenziali caratteristiche pozzolaniche e, conseguentemente, non ha alcun effetto benefico sulle proprietà della miscela. Inoltre, diversamente dal terreno prelevato dagli scavi edili, la pozzolana ha un costo significativo e il suo impiego inciderebbe significativamente sul costo della miscela. La sostituzione di pozzolana con terreno consente, quindi, di minimizzare i costi di confezionamento della miscela. Anche la soluzione alternativa di impiegare il CLSM come miscela di riempimento è stata scartata a causa dei maggiori costi di produzione e approvvigionamento dei materiali necessari per il confezionamento del CLSM (soprattutto della sabbia). In base a tali considerazioni si è deciso di proseguire lo studio sperimentale approfondendo, mediante prove di lavorabilità e di caratterizzazione meccanica, il comportamento di miscele confezionate con solo cemento, terreno e acqua. I risultati in termini di prestazioni meccaniche ottenuti dalle miscele M87 e M89 suggeriscono di confezionare miscele cementizie con un

dosaggio di cemento intorno a 150 kg/m^3 , così da ottenere resistenze a lungo termine di almeno 1 MPa.

5. DEFINIZIONE DELLA MISCELA

I getti M87 e M89 hanno permesso di verificare la possibilità di confezionare miscele cementizie con cemento, acqua e terreno. Tuttavia, per utilizzare questo genere di miscela per il riempimento delle gallerie oggetto di studio, è necessario valutare le proporzioni con cui miscelare i diversi costituenti in relazione ai requisiti di lavorabilità richiesti per le modalità di iniezione. Riguardo alla disponibilità delle materie prime, per definire la composizione della miscela di riempimento si è innanzitutto valutata la possibilità di utilizzare sia terreni di diversa provenienza, sia l'acqua solfatica presente all'interno delle gallerie, a parità di caratteristiche finali della miscela. Inoltre, si è verificata la riproducibilità dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione delle diverse miscele, anche in relazione al sistema di miscelazione. Infine sono stati valutati gli effetti delle condizioni in cui avverrà il riempimento (presenza di acqua solfatica in galleria) sulle proprietà delle miscele.

In questo paragrafo si illustrano i risultati delle prove effettuate per valutare il ruolo dei diversi fattori, che saranno poi discussi nel paragrafo 5.

5.1 Variabilità del terreno

Sono stati effettuati alcuni getti (M90–M93) per verificare come i diversi parametri di progetto della miscela (in particolare rapporto acqua/terreno (a/t) e tipo di terreno) influenzano la lavorabilità dell'impasto. Sono stati effettuati impasti ottenuti da diversi terreni, con diversi gradi di umidità iniziali, ai quali sono state aggiunte quantità progressivamente crescenti di acqua. Ad ogni aggiunta di acqua si è misurata la lavorabilità con la tavola a scosse. Quando si è raggiunta una fluidità sufficientemente elevata (in genere superiore a 100%) si è aggiunto il cemento e si è di nuovo misurata la consistenza.

I risultati di consistenza ottenuti da tale prova sono stati valutati in funzione del rapporto a/t . In particolare, la Figura 5.1 riporta per ogni getto (M90 sino a M93) l'andamento della consistenza in funzione del rapporto a/t per le miscele di acqua e terreno ($Arg1$, $Arg1^*$, $Arg2$) e per quelle ottenute con l'aggiunta di cemento. Nel seguito le miscele di terreno progressivamente fluidificate verranno indicate con la sigla del getto e un numero progressivo che indica le variazioni di composizione dell'impasto in seguito alle aggiunte di acqua e di cemento.

Nell'allegato B sono riportati tutti i dati relativi alla composizione delle miscele, alle aggiunte progressive di materiale ed alle misure di lavorabilità effettuate in fase di confezionamento.

Getto M90. Per il getto M90 si è partiti da 8.23 kg di terreno *Arg1* essiccato, che è stato miscelato con progressive aggiunte di acqua, in concomitanza alle quali è stata effettuata la prova di lavorabilità alla tavola a scosse. Si osserva in Figura 5.1 come, all'aumentare del contenuto d'acqua (quindi del rapporto a/t) si misura un incremento lineare della consistenza. Una prima prova di lavorabilità è stata effettuata dopo aver aggiunto 2.88 kg di acqua (miscela M90-1), così da ottenere un rapporto a/t di 0.35. Si è ottenuta una consistenza di 47%. Con cinque ulteriori aggiunte d'acqua (miscela M90-6) si è giunti ad un rapporto a/t di 0.6 (con una quantità d'acqua totale di 4.94 kg). La consistenza ha raggiunto un valore di 130%. Al fine di verificare che questa consistenza fosse adatta al tipo di applicazione, la miscela è stata colata dall'alto in un contenitore, mediante un tubo. Si è osservato che il materiale fluisce rapidamente nel tubo, riempiendo completamente il contenitore (Figura 3.8). A questo punto si sono aggiunti 1.15 kg di cemento, così da ottenere la seguente composizione (miscela M90-7): 985 kg/m³ di terreno, 591 kg/m³ di acqua, 138 kg/m³ di cemento ($a/t = 0.6$; $a/c = 4.3$) per un volume totale di circa 9 litri. L'aggiunta di cemento alla miscela ha reso meno fluido l'impasto (M90-7) che ha presentato, infatti, una consistenza del 90%.

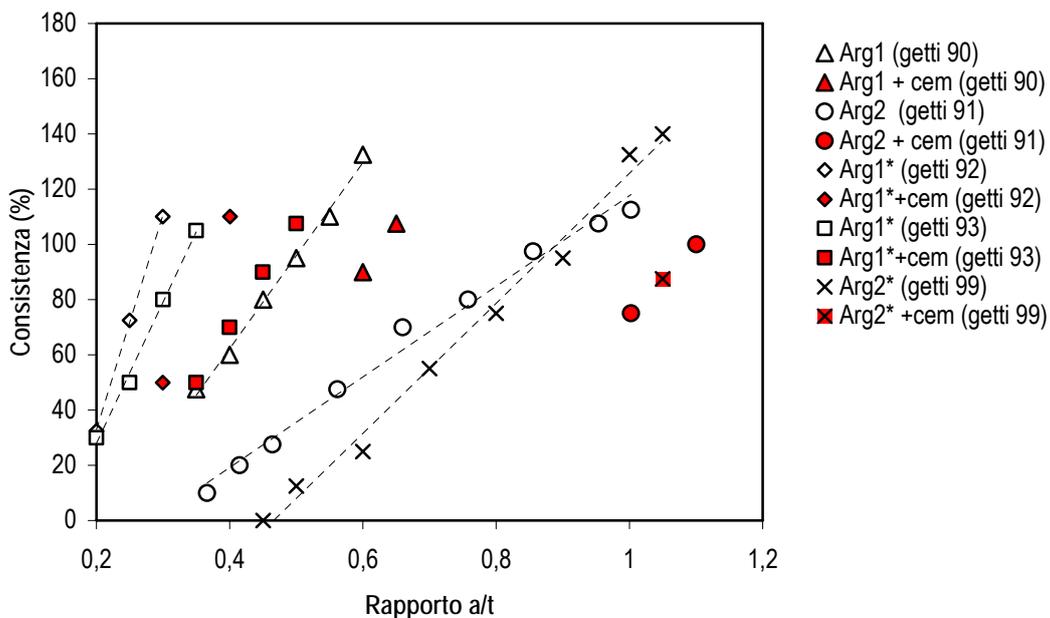


Figura 5.1 - Andamento della consistenza delle miscele (M90, M91, M92, M93 e M99) in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t).

Ripetendo la prova di colabilità sulla miscela M90-7 si è osservato che il materiale si fermava dentro il tubo e quindi tale consistenza non è sufficiente per poter iniettare il materiale all'interno delle gallerie. Successivamente si è aggiunta altra acqua (miscela M90-8) portando il rapporto a/t a 0.65 e il rapporto $a/c = 4.65$; conseguentemente il dosaggio di cemento si è ridotto a 131 kg/m^3 (Tabella 5.1). Questa miscela ha mostrato una consistenza pari a 108% ed ha superato la prova di colabilità; in questo caso, inoltre, la miscela è stata gettata sul fondo di un contenitore parzialmente riempito di acqua per verificarne, anche la mobilità in presenza di acqua. Il tubo è stato immerso nell'acqua e sollevato di soli 5 cm dal fondo, in modo che la miscela cadesse sul fondo del contenitore, simulando la condizione di getto prevista all'interno delle gallerie parzialmente allagate (vedi §7). Si è osservato che tale consistenza consente alla miscela di scorrere all'interno del tubo. Inoltre la miscela si è depositata sul fondo del contenitore creando un cumulo che si è accresciuto sollevando l'acqua. Con gli impasti M90-7 e M90-8 sono stati confezionati dei travetti che sono stati sottoposti alla prova di compressione dopo diversi periodi di stagionatura in camera umida (Tabella 5.1).

Tabella 5.1 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M90, M91, M92 e M93.

<i>Sigla</i>	<i>M90-7</i>	<i>M90-8</i>	<i>M91-11</i>	<i>M92-5</i>	<i>M93-7</i>	<i>M93-8</i>
Data getto	20/07/2005	20/07/2005	27/07/2005	23/09/2005	05/10/2005	05/10/2005
Cemento (kg/m^3)	138	131	163	131	133	125
Acqua (kg/m^3)	591	610	709	498	519	545
Tipo di terreno	<i>Arg1</i>	<i>Arg1</i>	<i>Arg2</i>	<i>Arg1*</i>	<i>Arg1*</i>	<i>Arg1*</i>
Umidità terreno (%)	0	0	26.8	0.1	0.1	0.1
Vagliatura	passante a 4.75 mm	passante a 4.75 mm	No	No	passante a 4.75 mm	passante a 4.75 mm
Terreno secco (kg/m^3)	985	939	645	1244	1154	1091
Acqua / terreno (a/t)	0.60	0.65	1.1	0.4	0.45	0.5
Acqua / cemento (a/c)	4.29	4.65	4.34	3.80	3.91	4.35
Volume (litri)	8.3	8.8	12.7	6.2	8.7	9.2
Spandimento D_1 (mm)	190	210	200	210	190	205
Spandimento D_2 (mm)	190	205	200	210	190	210
Consistenza (%)	90	107	100	110	90	107
Densità fresco (kg/m^3)	1844	1706	1564	1914	1818	1716
Densità indurito (kg/m^3)	1691	1668	1465	1833	1815	1764
$R_{c, 2\text{giorno}}$ (MPa)	0.16	0.11-0.12	0.26-0.28	-	0.19-0.20	0.14-0.15
$R_{c, 7\text{giorni}}$ (MPa)	0.35-0.36	0.24-0.25	-	0.30-0.33	0.29-0.33	0.24-0.25
$R_{c, 28\text{giorni}}$ (MPa)	-	-	-	0.51-0.56	0.54-0.58	0.40-0.41
$R_{c, 90\text{giorni}}$ (MPa)	0.75-0.78	0.56	1.20-1.39	0.41-0.42	-	0.35-0.37

La miscela M90-8 con il maggior rapporto a/c ha mostrato resistenze inferiori; ad esempio a 90 giorni di stagionatura si sono ottenuti 0.56 MPa di resistenza a compressione, rispetto a 0.75-0.78 per la miscela M90-7.

Getto M91. Il getto M91 è stato effettuato per valutare la correlazione fra la consistenza e il rapporto acqua/terreno (a/t) quando si utilizza il terreno proveniente da Dossena (*Arg2*). Anche in questo caso i risultati delle prove di consistenza hanno confermato un legame lineare fra consistenza e rapporto a/t . Tuttavia si è evidenziata la diversa lavorabilità che si può ottenere a seconda del terreno utilizzato. Confrontando l'andamento relativo alla miscela ottenuta impastando acqua e terreno *Arg1* (getto M90) con quello ottenuto dal getto M91 (Figura 5.1), si deduce che l'impiego del terreno *Arg2* porta ad una minore lavorabilità dell'impasto a parità di rapporto a/t ; è necessario, quindi, impiegare un dosaggio superiore di acqua per ottenere la medesima consistenza. In effetti, per ottenere un impasto colabile, con consistenza superiore al 100%, sono stati miscelati 728 kg/m³ di terreno *Arg2* con 730 kg/m³ di acqua (M91-9); si è ottenuta, quindi, una miscela con rapporto a/t pari a 1 che ha fornito una consistenza di 112.5%. A questa miscela si è aggiunto del cemento fino ad ottenere la seguente composizione: 688 kg/m³ di terreno, 690 kg/m³ di acqua, 174 kg/m³ di cemento (miscela M91-10) per un totale di circa 12.7 litri, che ha dato una consistenza di solo 75%. Per raggiungere una consistenza del 100% è stata necessaria un'ulteriore aggiunta d'acqua con la quale si è ottenuto l'impasto M91-11 (Tabella 5.1), caratterizzato da un rapporto a/t pari a 1.1 e a/c di 4.35. In seguito al processo di stagionatura in ambiente umido, le prestazioni meccaniche raggiunte da provini prismatici confezionati con questa miscela risultano superiori a quelle della miscela con terreno *Arg1*, a parità di rapporto a/c (M90-7). Dopo 2 giorni di stagionatura si è misurato un valore medio di resistenza a compressione di 0.27 MPa che si è incrementato a 1.3 MPa dopo 3 mesi. Tale miscela cementizia è stata gettata in un tubo immerso in un contenitore completamente riempito di acqua; la prova ha evidenziato come, la miscela sia in grado di riempire il contenitore dal fondo e conseguentemente far fuoriuscire l'acqua che inizialmente era contenuta in esso.

Per verificare le conseguenze del getto sott'acqua, si è conservata la miscela gettata sul fondo del contenitore riempito d'acqua e, a indurimento avvenuto, sono state prelevate delle carote. In Tabella 5.2 si riepilogano le proprietà delle diverse carote prelevate dalla miscela gettata in acqua.

In seguito al carotaggio, si osserva che, nella parte più superficiale a contatto con l'acqua, le carote si presentano meno compatte rispetto al resto, in generale per uno spessore variabile fra 5 e 10 mm (Tabella 5.2). Dalla Figura 5.2 si osserva come la carota al suo interno, a parte lo strato più superficiale, si presenta alquanto compatta e priva di vuoti.

Dopo aver tagliato le carote per rimuovere lo strato superficiale e per creare una geometria cilindrica, se ne è misurata la massa volumica e la resistenza alla compressione assiale. La resistenza su carota è stata convertita in resistenza su cubo mediante la formula riportata nel paragrafo 3.3.4.

La prova a compressione è stata effettuata subito dopo il carotaggio, quindi in condizioni sature, ottenendo una resistenza media su cubo di 0.14 MPa, inferiore di circa 85% rispetto alle resistenze ottenute sui prismi confezionati con la stessa miscela (1.20-1.39 MPa). Altre carote sono state provate dopo circa una settimana di esposizione in laboratorio allorché avevano perso parte dell'acqua, passando da una densità media di 1434 kg/m³ a densità nettamente inferiori (748 kg/m³). L'asciugatura ha comportato un aumento della resistenza fino a valori variabili fra 0.19 e 0.81 MPa con un valore medio di 0.4 MPa.

Getto M92. Il getto M92 è stato effettuato con il terreno *Arg1** che le analisi preliminari hanno evidenziato essere differente, in termini di composizione e distribuzione granulometrica, da *Arg1*, seppure entrambi provenienti da Santa Brigida (§3.1.3).



Figura 5.2 – Carota prelevata dalla miscela M91-11 gettata e mantenuta in acqua per 3 mesi.

Tabella 5.2 – Proprietà delle carote prelevate dalla miscela cementizia M 91-11 gettata e mantenuta in acqua per circa 3 mesi.

<i>Sigla Carota M91-11</i>	<i>Strato superficiale (mm)</i>	<i>Tempo di prova (giorni)</i>	<i>Condizione carota</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Rc carota (MPa)</i>	<i>Rc cubo (MPa)</i>
1	6-8	92	saturo	107.41	1414	-	-
2	8-9	92	saturo	109.06	1435	0.14	0.13
3	9-10	92	saturo	110.43	1453	0.16	0.15
<i>Valore medio</i>					1434	0.15	0.14
4	0	100	secca	76.13	835	0.81	0.84
5	5-7	100	secca	52.79	695	0.20	0.20
6	6-7	100	secca	54.62	719	0.27	0.26
7	6-8	100	secca	52.60	692	0.19	0.18
8	6-8	100	secca	60.68	798.5	0.52	0.51
<i>Valore medio</i>					748	0.40	0.40

Il terreno è stato utilizzato tal quale, senza subire alcun processo di vagliatura. Al momento del getto il terreno è risultato praticamente in condizioni secche (solo 0.1% di umidità). Essendo il terreno *ArgI** prevalentemente sabbioso, è più grossolano rispetto agli altri.

Ne è conseguita, a parità di rapporto a/t , una migliore lavorabilità dell'impasto. È stato sufficiente un rapporto a/t di 0.3 per ottenere una consistenza di 110% (M92-3).

L'aggiunta di cemento (M92-4) ha portato la consistenza a 50%. È quindi stata necessaria un'ulteriore aggiunta d'acqua per ottenere la miscela M92-5 (con un volume totale di 6.2 litri) di Tabella 5.1, con $a/t = 0.4$ e $a/c = 3.8$ che ha la seguente composizione: 131 kg/m³ di cemento, 498 kg/m³ di acqua e 1244 kg/m³ di terreno secco. Per questa miscela si è misurata una consistenza del 110%. Le prestazioni meccaniche di tale miscela hanno raggiunto valori modesti, pari a 0.32 e 0.54 MPa rispettivamente dopo 7 e 28 giorni di stagionatura.

Getto M93. Visto che per il getto M90 si è utilizzato solo il passante a 4.75 mm del terreno *ArgI*, per effettuare un corretto confronto con tale getto, si è ripetuto il getto M92 utilizzando il terreno *ArgI**, dopo che questo è stato sottoposto alla medesima vagliatura. Per quanto riguarda le proprietà allo stato fresco, dalla Figura 5.1 si deduce che la rimozione delle particelle grossolane ha portato a una richiesta d'acqua leggermente maggiore rispetto alla miscela M92. Una consistenza superiore a 100% è stata raggiunta miscelando acqua con il passante del terreno *ArgI**, in proporzioni (a/t) pari a 0.35 (M93-3). Confrontando i risultati relativi al getto M92 rispetto a quelli del getto M93, si osserva quindi che, a parità di

lavorabilità, l'impiego del solo passante a 4.75 mm comporta una maggiore richiesta di acqua. Anche per la miscela M93 si è osservata una diminuzione di consistenza in seguito all'aggiunta di cemento (si è passati da 105% a 50% con la miscela M93-4, vedi Figura 5.1); con diverse aggiunte d'acqua si è giunti alla miscela M93-8, che, con un volume pari a 9.2 litri, possiede rapporti a/t pari a 0.5 e a/c di 4.35 e una consistenza di 107%. Nella Figura 5.1 si osserva, anche dopo l'aggiunta di cemento, come l'aumento di consistenza segua un andamento lineare con a/t e come questo sia sostanzialmente parallelo all'andamento tracciato prima di aggiungere il cemento. Per le miscele cementizie M92-5 e M93-8, che presentano consistenze simili (110% e 108%), si sono ottenute prestazioni meccaniche confrontabili (Tabella 5.3), solo leggermente inferiori per la miscela M93-8 confezionata con un rapporto a/c superiore (4.35 invece di 3.80 della miscela M92-5).

Anche la miscela M93-8 è stata gettata in acqua e dopo 50 giorni di stagionatura si sono realizzate prove di compressione su carote riepilogate in Tabella 3.12.

Anche per le carote M93-8 si è riscontrato, in maniera analoga alle carote del getto M91-11, uno strato corticale di pochi millimetri avente una modesta resistenza rispetto al resto della carota che si presenta compatta. Le misure di resistenza a compressione e di massa, sono state effettuate sulle carote nel momento in cui hanno raggiunto la condizione asciutta (massa costante). Seppure in tali condizioni, si è ottenuta per le carote del getto M93, dopo 50 giorni di stagionatura, una resistenza media su cubo modesta, ovvero di soli 0.09 MPa.

Getto M99. Con la miscela M99 si è utilizzato un diverso tipo di terreno chiamato *Arg2** con umidità iniziale del 31% e si sono effettuate diverse aggiunte d'acqua, fino ad arrivare ad un rapporto a/t di 1.05 (M99-8) con il quale si è ottenuta una consistenza di 140% (Figura 5.1).

Tabella 5.3 - Riepilogo dati derivanti dalle carote effettuate il 24/11/2005 sulla miscela M93-8 confezionata con *Arg1**.

Sigla Carota M93-8	Strato superficiale (mm)	Tempo di prova (giorni)	Condizione Carota	Massa (g)	Densità (kg/m ³)	Rc carota (MPa)	Rc cubo (MPa)	
1	5	50	Secca	86.63	1839	0.07	0.05	
2	5	50	Secca	106.36	2499	0.11	0.08	
3	5	50	Secca	72.68	1196	0.11	0.10	
4	5	50	Secca	102.72	1690	0.15	0.14	
<i>Valore medio</i>						1845	0.11	0.09

Questi valori di consistenza indicano una somiglianza del terreno *Arg2** con il terreno *Arg2*. Infatti, si osserva in Figura 5.1 che l'andamento della consistenza in funzione del rapporto a/t per la miscela M99-9 è confrontabile con quello del getto M91.

5.2 Riproducibilità

Per verificare la riproducibilità dei risultati ottenuti, sono stati ripetuti alcuni dei precedenti getti. In Tabella 5.4 si riportano i risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M94, M95, M96, M97 e M98.

Getto M94. Il getto M94 è stato effettuato impiegando il terreno *Arg2* e procedendo in maniera analoga a quanto fatto per il getto M91. La Figura 5.3 conferma una discreta ripetibilità dei risultati ottenuti dalle prove di consistenza. Come per il getto M91, è possibile ottenere miscele con consistenze superiori a 100% solo con elevati rapporti a/t (superiori a 0.8). Le miscele cementizie M91-11 e M94-9, confezionate rispettivamente con un rapporto a/t pari a 1.1 e 1.04 ed un rapporto a/c pari a 4.34 e 4.96, presentano una consistenza analoga (100%). In termini di prestazione meccaniche, per la miscela M94-9, confezionata con rapporto a/c superiore rispetto a quello della miscela M91-11, si ottengono già a 2 giorni prestazioni leggermente migliori, circa il doppio (0.27 MPa) in confronto alla miscela M91.

Getto M95. Si è ripetuto il getto M94 con la sola differenza che acqua e terreno sono stati miscelati direttamente nei dosaggi finali (pari rispettivamente a 704 kg/m^3 e 678 kg/m^3 , Tabella 5.4), senza le aggiunte progressive. Si è osservata una difficoltà iniziale di miscelazione, che ha richiesto un tempo notevolmente superiore per ottenere un impasto uniforme. Tuttavia non si sono notate in termini di lavorabilità sostanziali differenze, sia prima, sia dopo l'aggiunta di cemento (Figura 5.3). La resistenza a compressione è risultata leggermente inferiore a tutte le stagionature. Le difficoltà in fase di confezionamento sono prevalentemente connesse al sistema di miscelazione utilizzato in laboratorio che è inadeguato per impastare, fin da subito, una miscela con un rapporto a/t pari circa a 1; un dosaggio di acqua uguale a quello del terreno rende, infatti, più difficoltoso lo "sminuzzamento" di quest'ultimo, in quanto l'elevata quantità d'acqua facilita lo scorrimento degli agglomerati di terreno e non ne favorisce la rottura, come invece avviene quando la miscelazione inizia con un dosaggio minore d'acqua.

Tabella 5.4 – Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M94, M95, M96, M97 e M98.

<i>Sigla</i>	<i>M94-9</i>	<i>M95-3</i>	<i>M96-8</i>	<i>M97-6</i>	<i>M98-2</i>
Data getto	02/11/2005	02/11/2005	17/11/2005	24/11/2005	02/12/2005
Cemento (kg/m ³)	142	142	150	150	150
Acqua (kg/m ³)	704	704	604	547	670
Tipo di terreno	Arg2	Arg2	Arg2	Arg1*	Arg2
Umidità terreno (%)	18.2	18.2	18.2	0.1	18.2
Vagliatura	No	No	No	passante a 4.75 mm	No
Terreno secco (kg/m ³)	678	678	513	1094	762
Sabbia (kg/m ³)	-	-	420	-	-
Acqua / terreno (<i>a/t</i>)	1.04	1.04	0.65	0.50	0.88
Acqua / cemento (<i>a/c</i>)	4.96	4.96	4.02	3.65	4.47
Volume (litri)	12.5	12.5	10.7	5.1	22.2
Spandimento D ₁ (mm)	210	207	200	190	180
Spandimento D ₂ (mm)	190	210	200	190	180
Consistenza (%)	100	109	100	90	80
Densità fresco (kg/m ³)	1525	1536	1749	1771	1701
Densità indurito (kg/m ³)	1544	1511	1700	1773	1589
R _{c,2giorni} (MPa)	0.11	0.06-0.07	0.07	0.11	0.23
R _{c,7giorni} (MPa)	0.34-0.35	0.20	0.33	0.31	0.61
R _{c,28 giorni} (MPa)	0.52-0.54	0.32-0.34	0.58	0.43-0.46	0.78-0.90
R _{c,90 giorni} (MPa)	0.62-0.68	0.43	0.8	-	1.08-1.11
R _{c,6-7 mesi} (MPa)	-	0.54	0.93	-	-

Questo risultato sottolinea la necessità di individuare un adeguato sistema di miscelazione da adottare in cantiere al fine di raggiungere in tempi rapidi e senza aggiunte progressive d'acqua, la fluidificazione del terreno. La Figura 5.4 riporta l'andamento della resistenza a compressione per le miscele confezionate con il terreno *Arg2*, in funzione del tempo di stagionatura e del rapporto *a/c*. Si osserva come, a parità di stagionatura, i risultati ottenuti per le miscele M91-11 (*a/c* = 4.34), M98-2 (*a/c* = 4.47) e M94-9 (*a/c* = 4.96) si dispongano lungo uno stesso andamento (le linee indicano i valori minimi). Viceversa per il getto M95-3, miscelato in una sola volta, a parità di *a/c* si ottengono valori inferiori e non in linea con i precedenti. Da questi risultati si deduce che una non adeguata miscelazione ha un effetto negativo sulle proprietà finali del materiale.

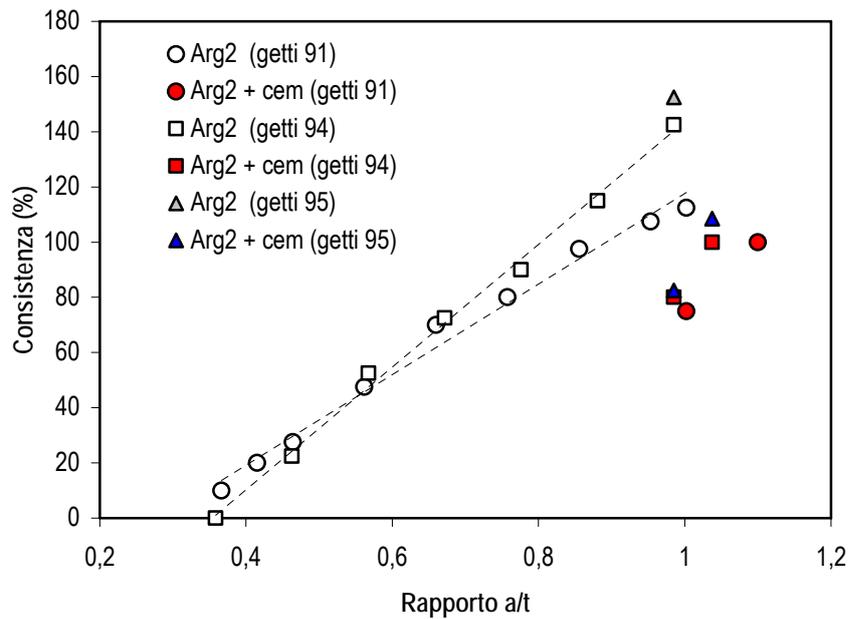


Figura 5.3 - Andamento della consistenza delle miscele (M91-M94-M95) confezionate con Arg2 in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t), per verificarne la riproducibilità.

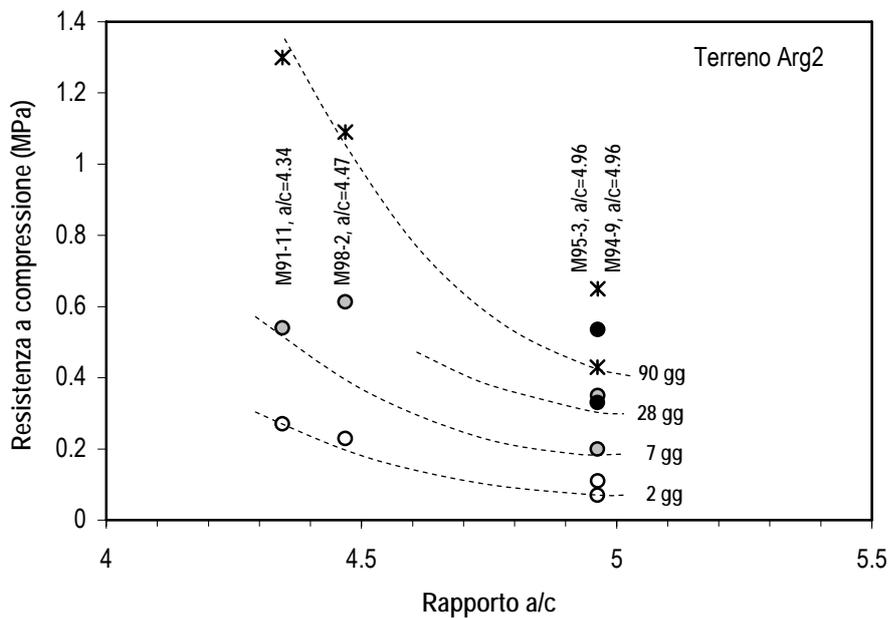


Figura 5.4 - Andamento della resistenza a compressione delle miscele cementizie, confezionate con terreno Arg2, in funzione del rapporto acqua/cemento (a/c) (a diversi tempi di stagionatura: 2, 7, 28 e 90 giorni). Le linee indicano i valori minimi ottenuti.

Anche per la miscela M95 gettata in acqua, sono state effettuate prove di compressione a differenti tempi di stagionatura. Dopo 33 giorni si è misurata per la carota in condizioni umide una resistenza media a compressione su cubo pari a 0.25 MPa, ovvero il 25% in meno

della resistenza misurata su provini prismatici confezionati con la stessa miscela (0.31 MPa) a parità di stagionatura.

Al procedere della stagionatura in condizioni umide per altre tre settimane, si è misurato un modesto incremento di resistenza meccanica che si porta mediamente a 0.32 MPa (Tabella 5.5).

Getto M97. Il getto M97 è stato effettuato come verifica del getto M93; si è, quindi, utilizzato il terreno *Arg1**, vagliato ad un setaccio con apertura pari a 4.75 mm. Confrontando i risultati ottenuti con quelli del getto M93, si osserva che, a parità di rapporto a/t , le miscele presentano la medesima lavorabilità. Si è, quindi, deciso di provare a raggiungere una maggiore fluidità. Progressive aggiunte di acqua hanno permesso di confezionare una miscela omogenea con consistenze sino al 160% (Figura 5.5), ben superiore a quanto è stato possibile ottenere, a parità di rapporto a/t , da miscele confezionate con gli altri terreni (*Arg1* e *Arg2*). Nonostante l'elevata fluidità, la miscela è rimasta coesiva e non è segregata durante la miscelazione. Quando a questo impasto si è aggiunto il cemento (nel dosaggio di 150 kg/m^3), la consistenza si è ridotta a 90% (miscela M97-6, Tabella 5.4). Questa lavorabilità è stata comunque sufficiente per superare la prova di colabilità (§ 3.3.3).

In termini di prestazioni meccaniche, per la miscela M97-6 si sono ottenuti mediamente valori di resistenza a compressione pari a 0.11 MPa dopo 2 giorni di stagionatura, 0.31 MPa dopo una settimana e 0.44 MPa dopo 28 giorni (Tabella 5.4).

Per la miscela gettata in acqua si sono realizzate le carote riportate in Tabella 5.6, le quali hanno fornito resistenze meccaniche in condizioni umide dopo 28 giorni di stagionatura pari a 0.17 MPa, inferiori del 60% rispetto a provini prismatici di pari stagionatura.

Tabella 5.5 - Riepilogo dati derivanti dalle carote prelevate dalla miscela M95-3 confezionate con *Arg2*.

<i>Sigla Carota M95-3</i>	<i>Tempo di prova (giorni)</i>	<i>Condizione carota</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Densità (kg/m^3)</i>	<i>Rc carota (MPa)</i>	<i>Rc cubo (MPa)</i>
1	33	umida	298.87	1586	0.22	0.25
6	50	umida	234.34	1640	0.24	0.29
7	50	umida	239.84	1610	0.29	0.35
8	50	umida	225.71	1614	0.27	0.31
<i>Valore medio dopo 50 giorni di stagionatura</i>				1622	0.27	0.32

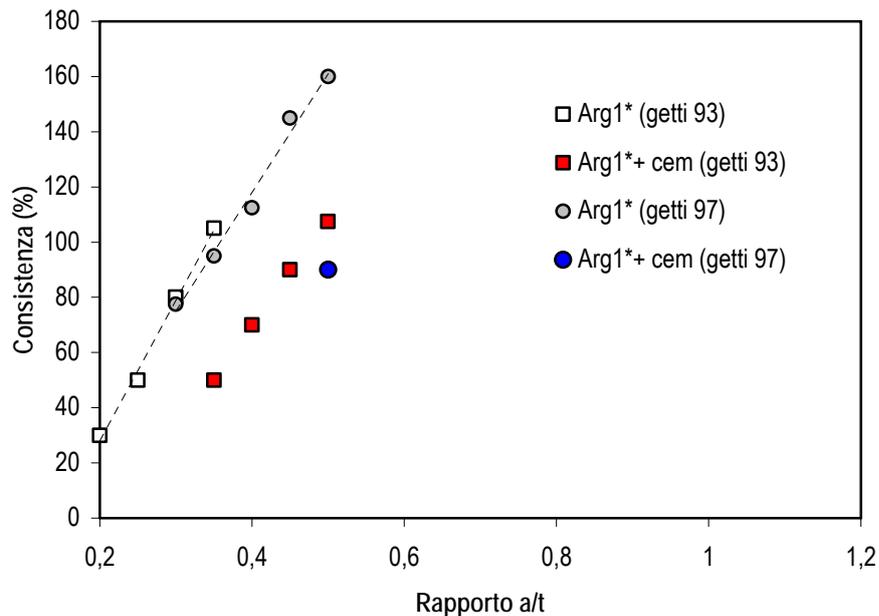


Figura 5.5 - Andamento della consistenza delle miscele (M93-M97) confezionate con *Arg1** in funzione del rapporto acqua/terreno (*a/t*), per verificarne la riproducibilità.

Tabella 5.6 - Riepilogo dati derivanti dalle carote prelevate dalla miscela M97-6 confezionato con *Arg1**.

Sigla Carota M97-6	Strato superficiale (mm)	Tempo di prova (giorni)	Condizione Carota	Massa (g)	Densità (kg/m ³)	Rc carota (MPa)	Rc cubo (MPa)
1	5-7	28	Umida	168.34	1910		
2				112.54	1949		
3				129.7	2032	0.20	0.18
4				159.36	1872		
5				125.60	1797		
6				150.27	1939	0.17	0.17
7				161.38	1831		
<i>Valore medio</i>					1904	0.18	0.17

Getto M102. Il getto M102 è stato effettuato come verifica della variabilità del terreno *Arg2**, senza utilizzare acqua solfatica nell'impasto, bensì acqua prelevata direttamente dall'acquedotto.

Si è inizialmente impiegato il terreno *Arg2**, con un setaccio con apertura pari a 4.75 mm (M102-1); successivamente, a seguito di un'eccessiva fluidità, si è aggiunto anche il trattenuto. Il getto è composto da 935 kg/m³ di terreno secco, 608 kg/m³ di acqua e 144 kg/m³ di cemento, per un volume totale di circa 15 litri, con un'umidità del terreno quasi assente (2.21%) (Tabella 5.8).

A differenza della miscela M99, per raggiungere medesimi valori di consistenza (circa 100%), si impiega meno acqua per fluidificare il terreno (Figura 5.6); tale variabilità presente nel terreno *Arg2** è dovuta probabilmente alla presenza di frammenti lapidei all'interno del terreno, presenti in quantità maggiore in questa porzione di terreno utilizzato. Data la minore presenza d'acqua, vengono registrate differenze sostanziali anche nella valutazione della resistenza a compressione ($a/c = 4.22$); come si è già osservato in Figura 5.4, per minori rapporti a/c , la resistenza a compressione è maggiore; infatti, si nota (Tabella 5.8) come le resistenze siano maggiori rispetto al getto M99-9 ($a/c = 4.69$), a tutti i tempi di stagionatura. Si rilevano valori di 1.45 MPa a 28 giorni di stagionatura per il getto M102 contro i 0.97 MPa del getto M99.

5.3 Impiego di sabbia

È stato osservato che per le miscele confezionate con terreno *Arg2* è necessario utilizzare un maggiore dosaggio di acqua per ottenere una lavorabilità confrontabile con quella di miscela con terreno *Arg1**. Il minore contenuto di frazione sabbiosa del terreno *Arg2* implica, infatti, una maggiore richiesta di acqua. Conseguentemente, nel caso si utilizzi terreno *Arg2*, è necessario aumentare anche la quantità di cemento in modo da garantire lo stesso rapporto a/c .

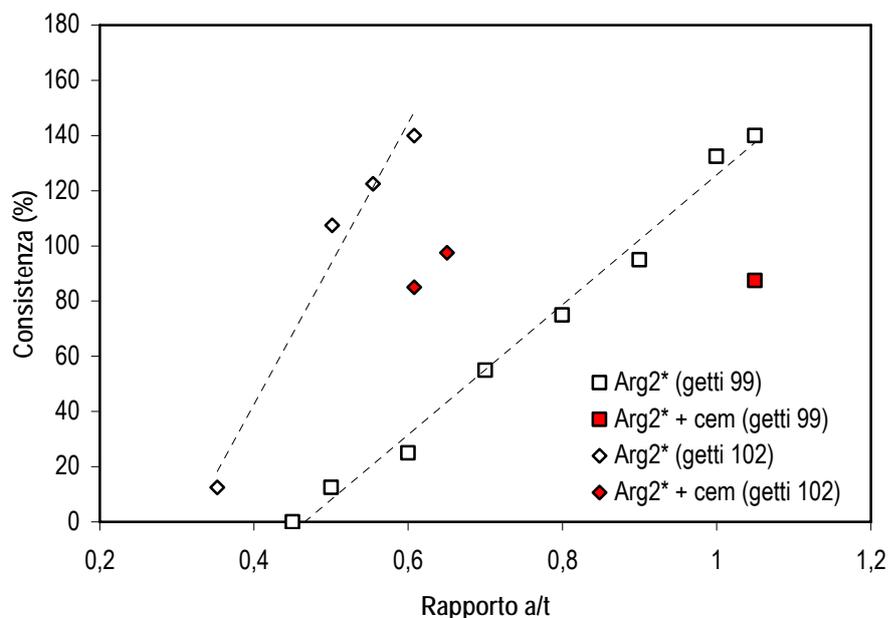


Figura 5.6 - Andamento della consistenza delle miscele (M99-102) confezionate con *Arg2** in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t).

L'utilizzo di terreni diversi incide, quindi, sui costi di confezionamento della miscela. Un terreno con distribuzione granulometrica confrontabile con quella del terreno *Arg1** appare economicamente più conveniente.

Si è, quindi, verificata la possibilità di ottenere una distribuzione granulometrica più favorevole aggiungendo sabbia ai terreni con una maggiore frazione argillosa e limosa.

Getto M96. In previsione di una maggiore disponibilità del terreno *Arg2*, si è valutata la possibilità di combinare tale terreno con l'aggregato frantumato di Zandobbio per ottenere un materiale con distribuzione granulometrica confrontabile con quella del terreno *Arg1** (Figura 5.7). Essendo il terreno *Arg2* costituito in prevalenza da limo e argilla, lo si è combinato con l'aggregato di Zandobbio, distinto in diverse frazioni granulometriche (vedi § 3.1.4). Dalla Figura 5.7 si ricava che per ottenere un materiale con distribuzione granulometrica analoga a quella del terreno *Arg1** si deve impiegare il terreno *Arg2* e l'aggregato frantumato rispettivamente in percentuali pari a 55% e 45%.

Con questo materiale, avente distribuzione analoga al terreno *Arg1**, è stato confezionato il getto M96. I risultati in termini di lavorabilità ottenuti da tale getto sono stati confrontati con quelli del getto M92 confezionato con *Arg1** con un dosaggio di cemento confrontabile.

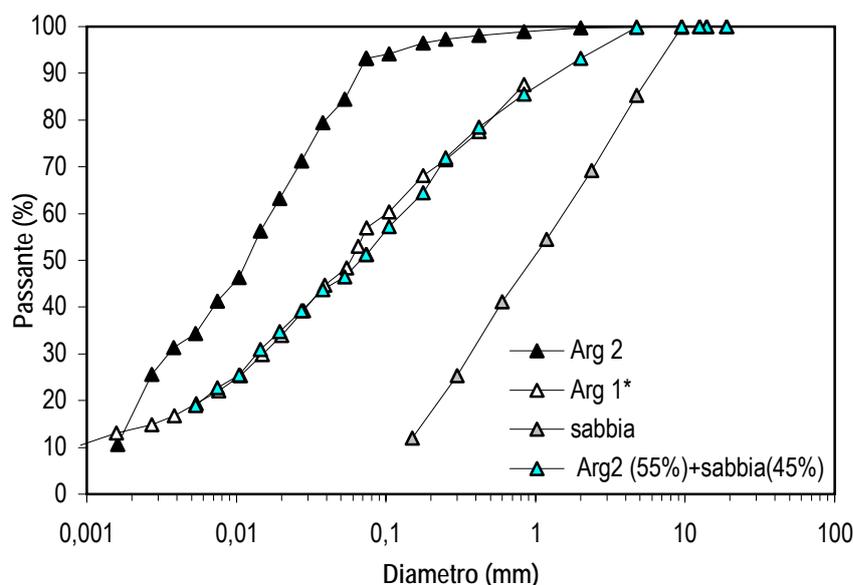


Figura 5.7 – Distribuzione granulometrica della combinazione dell'aggregato frantumato con il terreno *Arg2*.

Dalla Figura 5.8 si osserva che per la miscela fluidificata di terreno e sabbia M96 l'andamento della consistenza in funzione del rapporto a/t non è confrontabile con quello ottenuto con il getto confezionato con *Arg1** (M92), bensì con quello del getto M90 confezionato con *Arg1*. Comunque con il materiale ottenuto combinando *Arg2* con l'aggregato frantumato si è confezionata una miscela con consistenza fluida (intorno a 100%) già per rapporti a/t inferiori a quelli adottati nel caso in cui si sia utilizzato il solo terreno *Arg2*. Inoltre, in Figura 5.8 si osserva che l'utilizzo combinato di sabbia e terreno *Arg2* consente di confezionare miscele con consistenze pari anche a 140%, con rapporti a/t pari a 0.65, ben inferiori a quelli adottati per confezionare con il solo terreno *Arg2* miscele di pari lavorabilità (Figura 5.3).

Come si è verificato nei precedenti getti, l'aggiunta di cemento ha consentito di confezionare una miscela cementizia (M96-8) con un volume finale di 10.7 litri, composta da 513 kg/m³ di terreno secco, 420 kg/m³ di sabbia, 604 kg/m³ di acqua totale e con 150 kg/m³ di cemento.

In termini di resistenza a compressione sui travetti si ottengono valori pari a 0.07 MPa dopo 1 giorno di stagionatura e 0.33 MPa dopo una settimana (Tabella 5.4). Avendo effettuato anche un getto in un contenitore con dell'acqua, sono state prelevate alcune carote, che, dopo circa un mese di stagionatura davano valori di resistenza a compressione compresi fra 0.14 e 0.20 MPa, tranne per la carota 7 (Tabella 5.7), per la quale si è ottenuto un valore nettamente superiore (0.35 MPa).

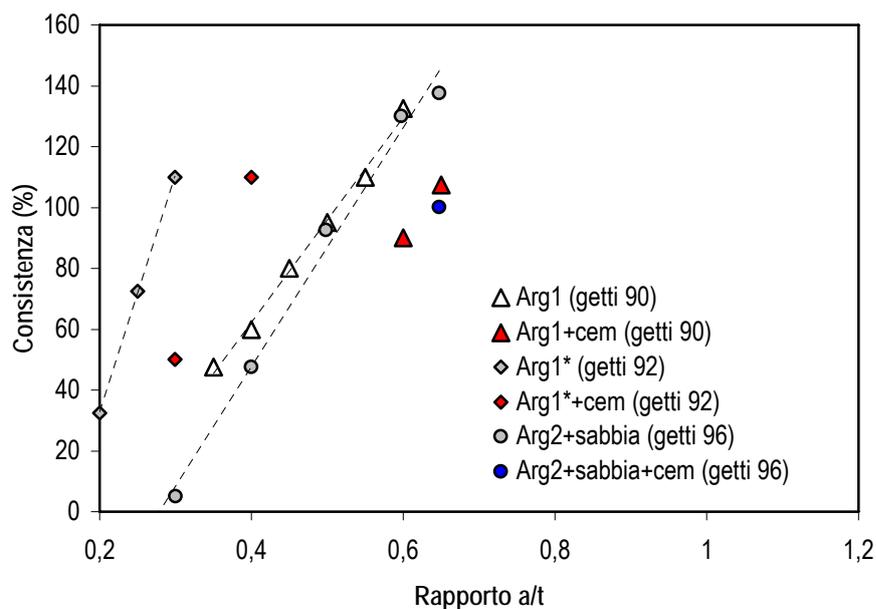


Figura 5.8 - Andamento della consistenza delle miscele (M90-M92-M96) confezionate con diversi tipi di terreno in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t).

L'osservazione di tale carota ha in effetti evidenziato, rispetto alle analoghe, un eccesso di aggregato frantumato, probabilmente per effetto della segregazione, come mostra la Figura 5.9.

A parte questo valore anomalo, la resistenza ottenuta sulle carote è mediamente inferiore di più del 50% del valore ottenuto (a parità di stagionatura) sui prismi confezionati con la medesima miscela (0.58 MPa, vedi Tabella 5.4).



Figura 5.9 – Particolare della carota M96-8, in cui si nota la presenza di aggregati calcarei.

Tabella 5.7 - Riepilogo dati derivanti dalle carote prelevate dalla miscela M96-8 confezionata con Arg2.

<i>Sigla Carota M96-8</i>	<i>Tempo (giorni)</i>	<i>Condizione carota</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Rc carota (MPa)</i>	<i>Rc cubo (MPa)</i>
1	18	umida	227.89	1685	-	-
2	18	umida	247.28	1808	-	-
3	28	umida	248.91	1883	0.17	0.20
4	35	umida	245.91	1839	0.15	0.17
5	35	umida	178.8	1705	0.13	0.14
6	18	umida	232.65	1740	-	-
7	28	umida	148.78	1780	0.35	0.35
8	35	umida	197.67	1626	0.14	0.15
<i>Valore medio</i>				1758	0.19	0.20

5.4 Sistema di miscelazione

Tenendo conto delle reali condizioni di getto, si è evidenziata l'importanza di valutare un'adeguata procedura e sistema di miscelazione effettuando un getto di volume superiore rispetto a quelli sinora considerati e adottando un sistema di miscelazione diverso. In precedenza, si è avuto modo di vedere per il getto M95 che, miscelando fin dal principio l'intero dosaggio d'acqua previsto, non si otteneva lo stesso risultato rispetto a quanto osservato con progressive aggiunte d'acqua; infatti, l'elevata quantità d'acqua facilita lo scorrimento degli agglomerati di terreno e non ne favorisce la rottura

Getto M98. Il getto M98 è stato effettuato, a differenza dei precedenti, con una betoniera da cantiere che potrebbe essere necessaria anche in laboratorio, ad esempio, quando i volumi di impasto sono superiori a quelli dei getti sinora descritti (4-20 litri). Si è confezionata tale miscela con del terreno *Arg2* secondo un rapporto a/t pari a 0.88. Questo tipo di miscelatore si è rivelato assolutamente inadeguato, in quanto non permette di ottenere un impasto omogeneo e ben miscelato. Si è dovuto, quindi, riutilizzare il precedente sistema di miscelazione che ha richiesto tempi molto più lunghi per ottenere un impasto di acqua e terreno con caratteristiche reologiche confrontabili con quelle delle miscele ottenute con i getti M94 e M95 (Figura 5.10).

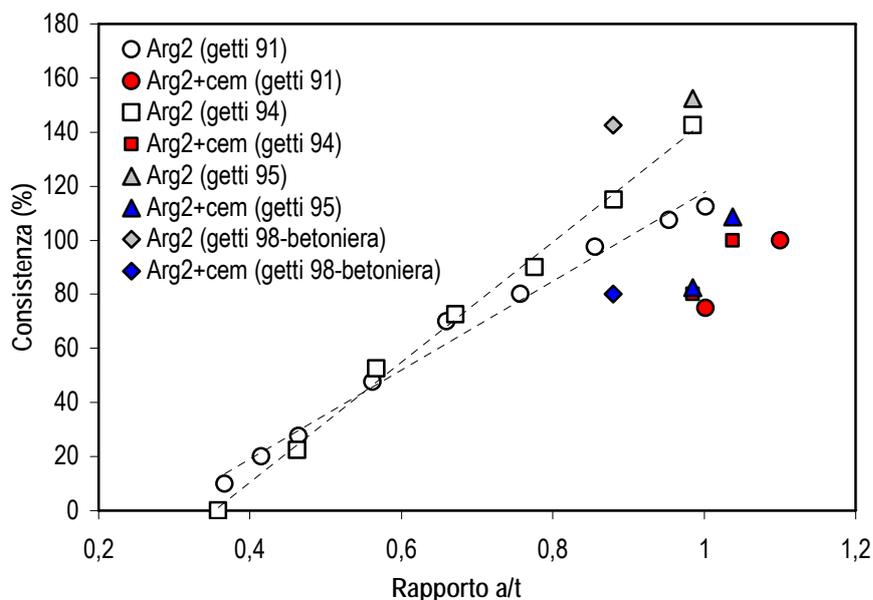


Figura 5.10 - Andamento della consistenza delle miscele (M91-M94-M95-M98) confezionate con Arg2, in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t).

Successivamente alle miscele di terreno fluidificato si è aggiunto cemento ottenendo un impasto composto da 762 kg/m^3 di terreno secco, 670 kg/m^3 di acqua e 150 kg/m^3 di cemento, con rapporto a/c pari a 4.47. Tale miscela cementizia mostra resistenze meccaniche pari a 0.23 e 0.61 MPa, rispettivamente dopo 2 e 7 giorni di stagionatura. Con stagionature prolungate a 3 mesi si raggiungono resistenze di 1.08-1.11 MPa (Tabella 5.4).

5.5 Perdita della lavorabilità

Nell'intervallo di tempo che passa dal confezionamento della miscela alla messa in opera, la miscela tende a diminuire la sua fluidità rispetto a quella iniziale. Per definire la modalità di riempimento delle gallerie risulta necessario valutare per quanto tempo la miscela presenti una consistenza adeguata per poter essere iniettata. Si descrivono in questo paragrafo e nei successivi i risultati delle prove volte a verificare l'andamento nel tempo della lavorabilità dei getti ottenuti con il terreno *Arg2**.

Getto M99. La Miscela M99 è già stata discussa nel paragrafo riguardante la variabilità del terreno (§5.1); in tale sede si è visto come, con il terreno *Arg2**, la consistenza del solo terreno fluidificato sia simile a quelle ottenute con il terreno *Arg2*. Infatti, con un rapporto a/t di 1.05 (M99-8) si è ottenuta una consistenza di 140% (Figura 5.11); aggiungendo il cemento, si è verificata una diminuzione della consistenza, che è arrivata a 87.5%.

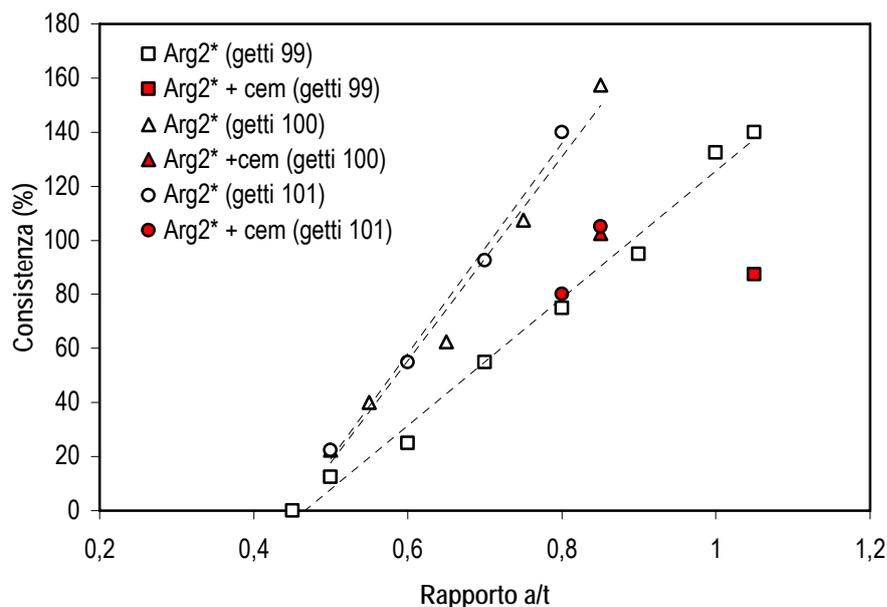


Figura 5.11 - Andamento della consistenza delle miscele (M99-M100-M101) in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t).

Si riporta la composizione di tale getto nella Tabella 5.8 confrontandola con quella di altri getti effettuati con lo stesso tipo di terreno *Arg2**. Ad ogni aggiunta d'acqua, si è misurato, oltre allo spandimento della miscela, il tempo di svuotamento di un imbuto di capacità nota (Figura 3.9). I valori di consistenza e svuotamento sono stati correlati fra loro nella Figura 5.12. Si osserva che al diminuire della consistenza aumenta il tempo di svuotamento dell'imbuto. Per elevate consistenze (superiori al 100%) si misurano, peraltro anche con difficoltà, tempi modesti di svuotamento (inferiori a 2 secondi), come mostrato nella Figura 5.12. Si osserva quindi come la prova di svuotamento dell'imbuto (semplice ed attuabile in cantiere) possa essere utilizzata per verificare che la consistenza dell'impasto sia almeno paria a 100%. È infatti sufficiente verificare che il tempo di svuotamento sia minore o uguale a 2 secondi.

Tabella 5.8 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M99, M100, M101 e M102.

<i>Sigla</i>	<i>M99-9</i>	<i>M100-6</i>	<i>M101-6</i>	<i>M102-7</i>
Data getto	25/01/2006	01/03/2006	17/03/2006	11/04/2006
Cemento (kg/m ³)	150	150	144	144
Acqua (kg/m ³)	704	663	665 [^]	608
Tipo di terreno	<i>Arg2*</i>	<i>Arg2*</i>	<i>Arg2*</i>	<i>Arg2*</i>
Umidità terreno (%)	30.89	30.11	30.11	2.21
Vagliatura	No	No	No	No
Terreno secco (kg/m ³)	671	780	782	935
Acqua / terreno (<i>a/t</i>)	1.05	0.85	0.85	0.65
Acqua / cemento (<i>a/c</i>)	4.69	4.42	4.61	4.22
Volume (litri)	18.8	16.2	16.2	15
Spandimento D ₁ (mm)	185	205	200	200
Spandimento D ₂ (mm)	190	200	210	195
Consistenza (%)	87.5	102.5	105	97.5
Densità fresco (kg/m ³)	1518	1630	1613	1697
Densità indurito (kg/m ³)	1521	1607	1591	1687
R _{c,2giorni} (MPa)	-	0.23	0.31	0.45
R _{c,7giorni} (MPa)	0.5	0.48	0.59	0.94
R _{c,28 giorni} (MPa)	0.97	1.29	0.98	1.45
R _{c,60 giorni} (MPa)	-	-	1.20	1.78
R _{c,90 giorni} (MPa)	1.34	1.92	1.37	2.03

[^] acqua di impasto solfatica

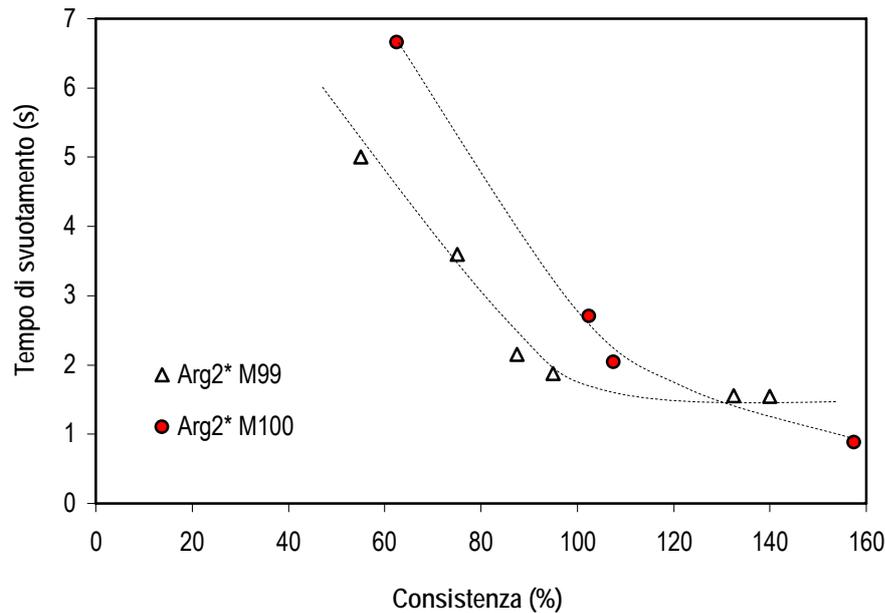


Figura 5.12 – Correlazione fra il tempo di svuotamento e la consistenza percentuale delle miscele M99 e M100.

Una volta aggiunto il cemento per un dosaggio pari a 150 kg/m^3 si è misurata, ad intervalli regolari, la consistenza nel tempo (Figura 5.13). Dopo circa un'ora la fluidità si è modificata poco, passando dal valore iniziale di circa 90%, a valori di 75-80%. Tuttavia, dopo circa 4-5 ore, l'impasto ha perso completamente la lavorabilità, raggiungendo valori di consistenza minori di 50%.

La miscela M99-9, avendo un rapporto a/c inferiore rispetto alla M94-9 (4.69 rispetto a 4.96), presenta delle proprietà allo stato indurito leggermente migliori rispetto alla miscela M94-9, sia nel breve (a 7 e 28 giorni) sia nel lungo periodo; infatti, a 90 giorni, la miscela M99-9 possiede valori di resistenza doppi rispetto a quelli misurati per la miscela M94-9 (1.34 MPa rispetto a 0.66 MPa).

Getto 100. La miscela M100 è stata realizzata con il terreno *Arg2** e, come per il precedente getto, il terreno impiegato nell'impasto non è stato vagliato, bensì utilizzato tal quale.

La Figura 5.11 mostra che, a parità di rapporto a/t , questa miscela ha fornito una fluidità leggermente superiore rispetto al getto M99, probabilmente a causa della presenza di frammenti lapidei nel terreno *Arg2**, che la mancata vagliatura ha impedito di rimuovere completamente; infatti, si nota che, con un rapporto a/t pari a 0.85, si raggiunge, per il getto M100, un valore di consistenza pari a 157.5%, mentre per il getto M99 si ha un valore

inferiore, pari a circa 85%. Si osserva, inoltre, che, a parità di consistenza (Figura 5.12), si ha per la miscela M100 un leggero innalzamento dei tempi di svuotamento dell'imbuto rispetto alla miscela M99. In particolare, si nota che per consistenze dell'ordine del 100% la miscela M100 ha tempi di svuotamento più elevati rispetto alla miscela M99 di circa 1 secondo.

Tali dati, abbastanza differenti da quelli ottenuti con il getto precedente, evidenziano una certa variabilità tra i risultati ottenibili con lo stesso terreno *Arg2**, probabilmente perché, meno omogeneo rispetto al terreno *Arg2*.

Alla miscela M100 di terreno fluidificato si è successivamente aggiunto cemento (per un dosaggio complessivo di 150 kg/m^3) che ha contribuito alla diminuzione della consistenza sino a circa 100% (Figura 5.11).

A getto completato si è misurata, circa ogni 20 minuti, la consistenza della miscela M100-6 per valutare la perdita di lavorabilità nel tempo (Figura 5.13); partendo da una consistenza pari a circa 100% si misura, dopo circa 4 ore, un valore notevolmente inferiore pari a 40%.

Il getto M100, presenta lo stesso dosaggio di cemento del getto M99-9 (150 kg/m^3), ma possiede un rapporto *a/c* inferiore (4.42 invece di 4.69 della miscela M99-9). Ciò determina più elevate resistenze a compressione, sia dopo 28 giorni di stagionatura, sia dopo tre mesi; a 90 giorni la miscela M100-6 sviluppa resistenze pari a 1.92 MPa contro 1.34 MPa del getto M99-9 (Tabella 3.17).

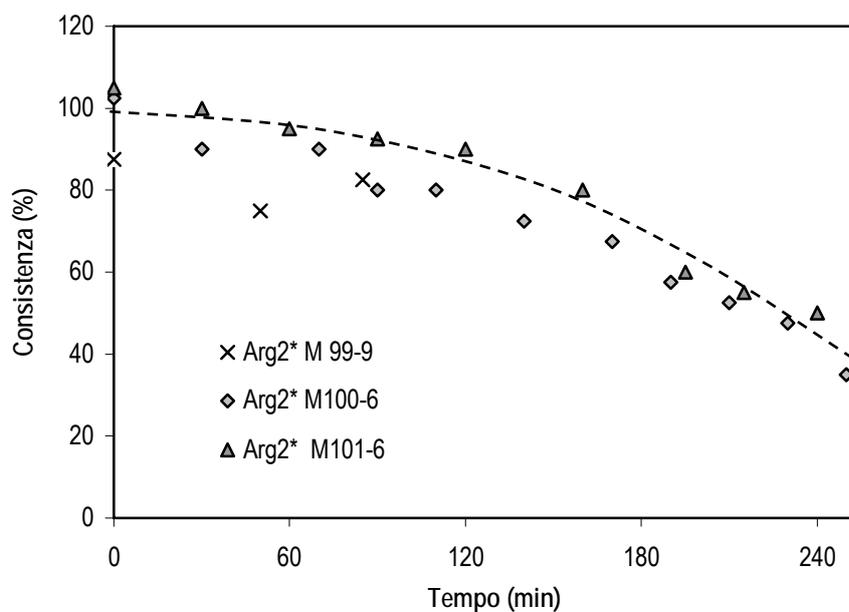


Figura 5.13 – Andamento della perdita di consistenza nel tempo per le miscele cementizie M99-9, M100-6 e M101-6.

Getto M101. Il getto in questione è analogo al getto M100 per i dosaggi dei materiali (Tabella 5.8), con l'unica differenza dell'impiego di acqua solfatica al posto dell'acqua prelevata della rete idrica. Tale scelta è giustificata dalla presenza di solfati nell'acqua che riempie le gallerie di S.Brigida.

Ad una miscela (M101-4) di terreno fluidificato (16.5 kg di *Arg2** e 6.33 kg di acqua aggiunta in più riprese) sono stati aggiunti 2.34 kg di cemento per ottenere un dosaggio dello stesso pari a 150 kg/m^3 . Purtroppo tale miscela presentava una consistenza troppo bassa, ed è stato necessario aggiungere ulteriore acqua solfatica per portare la consistenza a 105%. Questa miscela finale (M101-6) presenta la seguente composizione: 782 kg/m^3 di terreno secco, 665 kg/m^3 di acqua solfatica, e 144 kg/m^3 di cemento, per un volume totale di 16.2 litri. Dalla Figura 5.11 si osserva che l'andamento delle consistenze rispetto al rapporto a/t per le miscele M101 è confrontabile a quello delle miscele M100; non emerge, quindi, una significativa influenza dei solfati presenti nell'acqua d'impasto sulle proprietà reologiche delle miscele fluidificate di terreno.

A questo punto, analogamente al getto precedente, è stata misurata la perdita di consistenza nel tempo, che, come mostra la Figura 5.13, è simile a quella subita dal getto M100-6.

La resistenza a compressione della miscela M101-6 è maggiore nei primi giorni di stagionatura, rispetto a quella del getto M100-6, pur avendo quest'ultima un rapporto a/c minore (4.42 invece di 4.61 della miscela M101-6); si sono misurate resistenze di 0.59 MPa a 7 giorni di stagionatura per M101-6 rispetto a 0.48 MPa del getto M100-6. Tale differenza è probabilmente dovuta ai sali solfati che hanno accelerato l'idratazione del cemento. Differentemente, con il procedere della stagionatura, è il getto M100-6 ad avere le resistenze maggiori: 1.29 MPa a 28 giorni di stagionatura per la miscela M10-6 rispetto a 0.98 MPa del getto M101-6.

5.6 Immersione in acqua solfatica

Sono state effettuate delle prove per valutare l'effetto dell'immersione in acqua solfatica su provini confezionati con alcune miscele cementizie di terreno. In tale soluzione sono state immerse sia delle carote sia dei provini prismatici, in particolare si sono immersi travetti delle miscele M95-3, M96-8, M99-9, M100-6 e tre carote della miscela M97-6 gettata in acqua.

Durante il periodo di esposizione in soluzione solfatica, i provini sono stati sottoposti a misura di variazioni di massa. I dati mostrano come la variazione di massa sia minima; si

osservano, infatti, variazioni di massa modeste (inferiori a 0.5% anche dopo 5 mesi di esposizione) per tutti i provini prismatici, indipendentemente dalla composizione delle miscele con cui sono stati confezionati (Figura 5.14). Diversamente, per le carote del getto M97-6, si sono misurati incrementi iniziali fino a 3% della massa. Successivamente, con il procedere dell'esposizione, si è avuto il distacco di piccoli frammenti delle carote stesse, per cui si è misurata una diminuzione di massa. Inoltre, sempre per queste carote, si sono osservate fessure, dovute, presumibilmente, ai prodotti di espansione dei solfati (Figura 5.15).

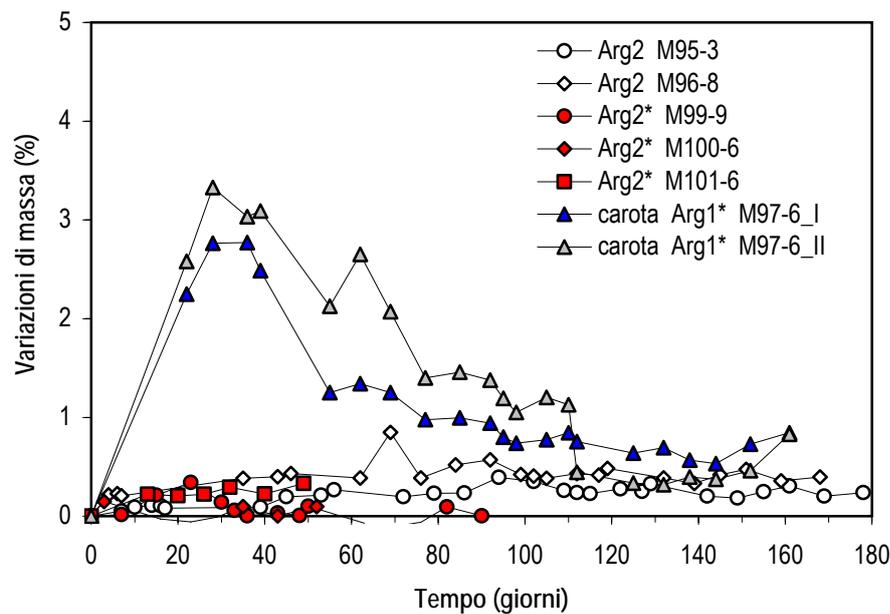


Figura 5.14 - Andamento nel tempo della variabilità di massa misurata su provini prismatici e carote confezionati con acqua solfatica.



Figura 5.15 – Particolare delle fessure della carota M97-6 immersa in acqua solfatica per 28 giorni.

Per quel che riguarda la carota M97-6_3, dopo 22 giorni di esposizione, durante misure di massa, si è notata la formazione di una fessura che, in pochi giorni, si è ampliata fino a rompere la carota stessa.

Per le altre carote le lesioni erano di entità minore e non si sono più ampliate dopo un mese di immersione. Le misure di variazione della massa per le altre due carote, si sono prolungate fino a 6 mesi dalla data di immersione in acqua solfatica.

Diverso è il comportamento dei provini prismatici che non hanno subito alterazioni visibili.

5.7 Impiego di acqua solfatica nelle miscele

Si è voluta anche valutare la possibilità di utilizzare l'acqua solfatica come acqua d'impasto per verificare gli effetti che i solfati avrebbero potuto avere sulla miscela così confezionata. A tale scopo è stato effettuato il getto M101, realizzato appunto con acqua d'impasto solfatica (Tabella 5.8). Con tale getto sono stati confezionati provini da sottoporre a misure di variazione di massa e prove di resistenza a compressione per valutarne gli effetti dei solfati sul processo di indurimento e sulle prestazioni meccaniche.

La Figura 5.16 riporta l'andamento nel tempo delle variazioni di massa misurate sui provini prismatici del getto M101-6 e mantenuti in camera a 20°C con umidità relativa pari al 100%.

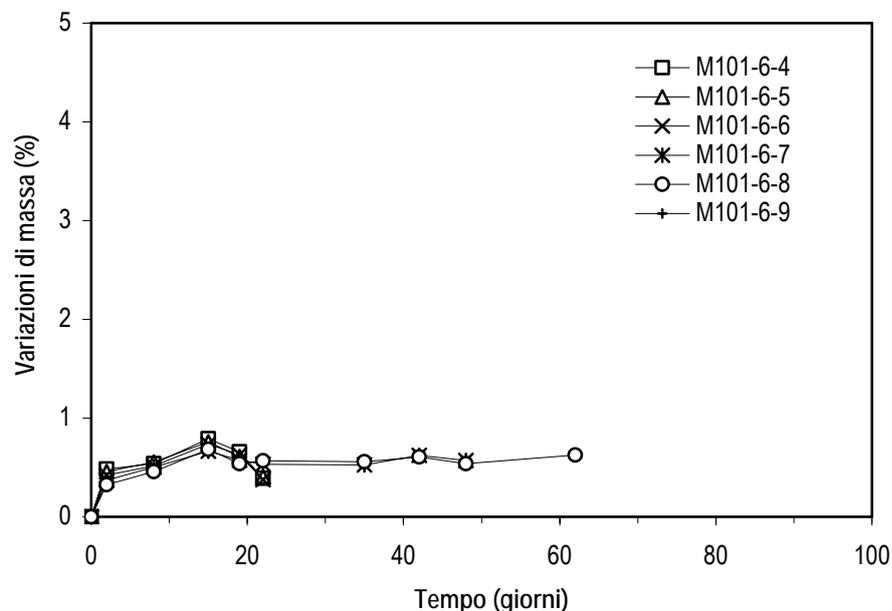


Figura 5.16 – Andamento nel tempo della variazione di massa misurata su provini prismatici M101 confezionati con acqua solfatica.

Le misure, condotte per circa 2 mesi, evidenziano come tutti i provini subiscono variazioni di massa trascurabili (pari a 0.5%) e comunque dello stesso ordine di grandezza di quelle misurate sui provini prismatici confezionati con acqua potabile e immersi in soluzione solfatica (Figura 5.14).

Le prove di resistenza a compressione del getto M101-6 mostrano come la miscela confezionata con acqua solfatica presenti resistenze di 0.98 MPa a 28 giorni di stagionatura, che aumentano fino a valori di 1.92 MPa dopo 3 mesi (Tabella 5.8).

5.8 Condizioni ambientali

L'ultima serie di miscele (che comprende i getti da M103 a M114) è stata effettuata utilizzando il terreno *Arg2** e mantenendo costante il rapporto tra la massa d'acqua totale e di terreno secco (a/t), pari a 1.

Si sono quindi realizzate miscele caratterizzate da diverso dosaggio di cemento (100, 150, 200, 250 kg/m³) al fine di verificarne l'effetto sulle proprietà delle miscele allo stato fresco ed indurito. I getti sono stati realizzati sia con acqua potabile (M104, M105, M107, M108), sia con l'acqua solfatica delle gallerie di S. Brigida (M110, M111, M113, M114).

Per ciascun getto si sono, innanzitutto, valutate le caratteristiche meccaniche dopo una stagionatura di 7 giorni in ambiente umido. Quindi i provini prismatici, stagionati per 7 giorni, sono stati posti in ambienti diversi, caratterizzati da una temperatura di 5°C. Alcuni provini sono stati immersi in acqua potabile, altri in acqua solfatica, per verificare gli effetti dell'immersione sulle loro caratteristiche meccaniche. L'elenco del tipo e durata di esposizione per ciascun provino sono riportate nelle Tabelle 3.3 e 3.4.

Dopo una descrizione delle proprietà allo stato fresco come la fluidità e il mantenimento della lavorabilità nel tempo di tutte le otto miscele, si discutono gli effetti che le diverse condizioni ambientali hanno avuto sulle proprietà allo stato indurito (massa volumica, resistenza a compressione, resistività elettrica). Alla fine saranno riportate alcune considerazioni relative all'osservazione a microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) di alcuni campioni di tali miscele.

5.81 Proprietà allo stato fresco

Degli otto getti effettuati in questa fase, i primi quattro sono stati realizzati con acqua priva di solfati.

Per confezionare tali miscele si è partiti da un impasto di solo terreno *Arg2** (denominato M103) a cui si è aggiunta progressivamente l'acqua potabile, fino a raggiungere una consistenza del 195% con il rapporto a/t finale di 1 (Figura 5.17). Questo impasto, di circa 24 litri, è stato diviso in due parti a cui sono state aggiunte quantità di cemento corrispondenti a dosaggi di 100 e 150 kg/m³. Queste due miscele sono state chiamate rispettivamente M104 e M105 (Tabella 5.9).

Si è quindi effettuato un secondo getto di solo terreno *Arg2** (denominato M106), che ha dato, con il rapporto a/t finale pari a 1, una consistenza di 225% (Figura 5.17). Anche questa miscela, di volume pari a circa 24 litri, è stata suddivisa in due parti alle quali sono state aggiunte quantità di cemento corrispondenti ai dosaggi di 200 e 250 kg/m³. Queste due miscele sono state denominate rispettivamente M107 e M108 (Tabella 5.9).

Per tutte e quattro le miscele cementizie si è avuta una diminuzione di consistenza al momento dell'aggiunta del cemento. Per le miscele con dosaggi maggiori di cemento, l'abbassamento della consistenza è stato maggiore. Infatti, come mostra la Figura 5.17, il getto M104 (con un dosaggio di cemento pari a 100 kg/m³) ha avuto una diminuzione del 70% della consistenza, mentre il getto M108, che presenta un dosaggio di cemento maggiore (250 kg/m³), ha subito un diminuzione della consistenza del 117.5%.

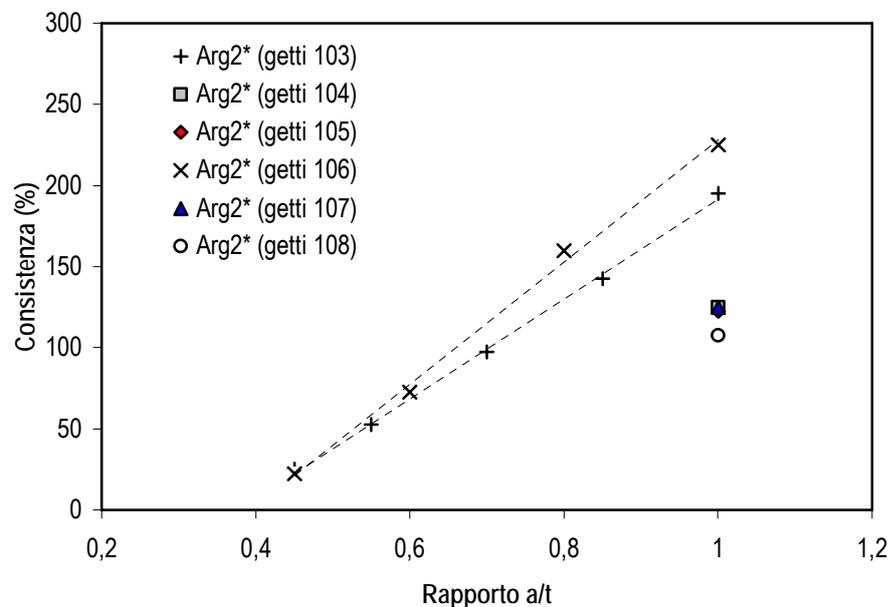


Figura 5.17 – Variazione della consistenza in funzione del rapporto a/t per le miscele (M103, M108) realizzate con *Arg2** ed acqua potabile.

Per ogni miscela cementizia si è misurata la perdita di lavorabilità nel tempo, considerando differenti temperature di esposizione (5° e 22°C) per valutarne l'influenza.

Come mostra la Figura 5.18, le miscele presentano consistenze, al momento dell'aggiunta di cemento, comprese tra 107,5% e 125%. Conservandole a temperatura di 22°C, tutte queste miscele giungono a consistenze non più adeguate alla prova di colabilità descritta in §3.3.3, vale a dire attorno al 30-50% di consistenza, in circa 90-120 minuti. Si nota che la miscela M104 (con un dosaggio di cemento pari a 100 kg/m³) mantiene più a lungo la sua lavorabilità rispetto a miscele come M107 e M108 (rispettivamente con dosaggio cemento pari a 200 e 250 kg/m³), a parità di temperatura.

Dalla Figura 5.18 si osserva, anche, che la porzione di miscela M107, conservata in ambiente a 5°C, conserva la lavorabilità per più tempo; raggiunge, infatti, il 40% di consistenza in circa 4 ore.

Per completare la serie degli otto getti che compongono questa ultima fase di sperimentazione, sono stati realizzati altri quattro getti simili, per composizione e condizioni di preparazione, alle quattro precedenti miscele, con la differenza dell'utilizzo di acqua solfatica per l'impasto.

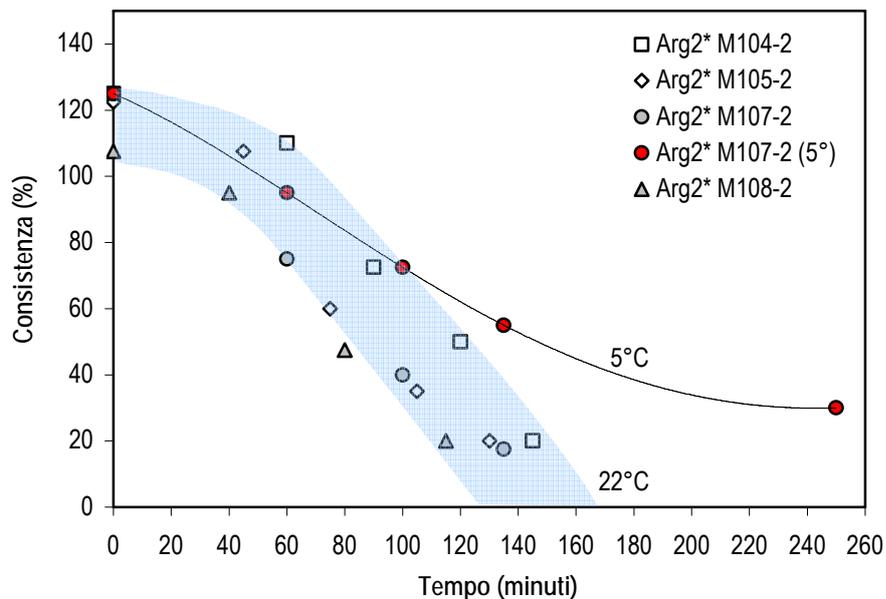


Figura 5.18 - Perdita della consistenza nel tempo per le miscele cementizie confezionate con acqua potabile: 104, M105, M07 e M108.

Tabella 5.9 - Riepilogo dei principali dati misurati sulle miscele cementizie confezionate con acqua (M104, M105, M107, M108).

<i>Sigla</i>	<i>M104-2</i>	<i>M105-2</i>	<i>M107-2</i>	<i>M108-2</i>
Data getto	12/05/2006	12/05/2006	16/05/2006	16/05/2006
Cemento (kg/m ³)	100	150	200	250
Acqua (kg/m ³)	707	695	683	672
Umidità terreno (%)	0	27.62	0	0
Vagliatura	Manuale	Manuale	Manuale	Manuale
Terreno secco (kg/m ³)	707	695	683	672
Acqua/terreno (<i>a/t</i>)	1	1	1	1
Acqua/cemento(<i>a/c</i>)	7.07	4.63	3.42	2.67
Volume (litri)	10.5	10.2	9.8	9.8
Spandimento D1 (mm)	225	220	225	210
Spandimento D2 (mm)	225	225	225	205
Consistenza (%)	125	123	125	108
Consistenza a 5°C (%)	-	122	125	-
Densità fresco (kg/m ³)	1509	1536	1563	1568
Densità indurito (kg/m ³)	1497	1522	1546	1559
Rc _{7 giorni} (MPa)	0.24	0.59	0.95	1.56

Per realizzare tali miscele si è partiti sempre da un impasto di solo terreno *Arg2** (denominato M109) a cui si è aggiunta, a più riprese, l'acqua solfatica, fino a ottenere una consistenza del 245% e un rapporto *a/t* finale di 1 (Figura 5.19).

Questo impasto, di circa 23.5 litri, è stato diviso in due parti a cui sono state aggiunte quantità di cemento corrispondenti a dosaggi di 100 e 150 kg/m³. Queste due miscele sono state chiamate rispettivamente M110 e M111 (Tabella 5.10).

Successivamente si è effettuato un ulteriore getto di solo terreno *Arg2** (denominato M112), che ha dato, per un rapporto *a/t* finale pari a 1, una consistenza di 272.5% (Figura 5.19). Anche questa miscela, realizzata con volume uguale alla miscela M109 (circa 23.5 litri), è stata suddivisa in due parti alle quali sono state aggiunte quantità di cemento corrispondenti ai dosaggi di 200 e 250 kg/m³. Queste due miscele sono state denominate rispettivamente M113 e M114 (Tabella 5.10). La diminuzione di consistenza, avvenuta al momento dell'aggiunta del cemento, ha interessato in maniera differente le quattro miscele: per le miscele con dosaggi minori di cemento, l'abbassamento della consistenza è stato minore.

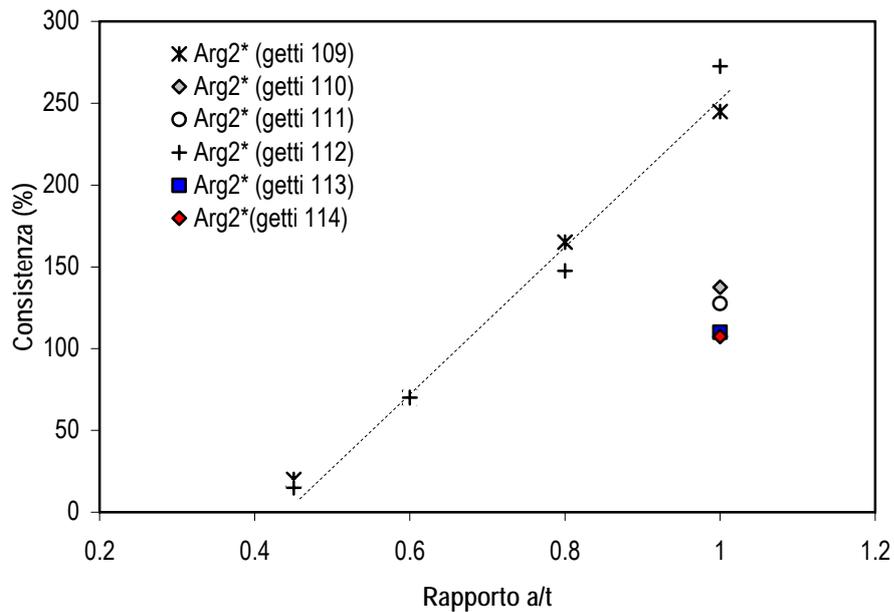


Figura 5.19 – Variazione della consistenza in funzione del rapporto a/t per le miscele (M109 e M112) realizzate con Arg2* ed acqua solfatica.

Infatti, come mostra la Figura 5.19, il getto M110 (con un dosaggio di cemento pari a 100 kg/m^3) ha subito una diminuzione del 107.5% della consistenza, mentre il getto M114, che contiene un dosaggio di cemento maggiore (250 kg/m^3), ha subito un abbassamento della consistenza del 165%. Queste diminuzioni di consistenza, per tutti e quattro i getti realizzati con acqua solfatica nell'impasto, sono maggiori, se confrontate con le rispettive miscele di simile composizione, ma contenenti acqua potabile nell'impasto (M104, M105, M107, M108; Figura 5.17). È stata misurata, per ognuna di queste miscele cementizie contenenti acqua solfatica, la perdita di lavorabilità nel tempo, sia per le miscele conservate a 22°C , sia per quelle conservate a 5°C . Come mostra la Figura 5.20, le miscele partono da consistenze, al momento dell'aggiunta di cemento, comprese tra 108% e 138%. Conservandole a temperatura di 22° tutte queste miscele giungono in 90-120 minuti, a consistenze non più adeguate alla prova di colabilità descritta in §3.3.3, vale a dire attorno al 30-50% di consistenza, in circa 90-120 minuti. Il getto M113 (con un dosaggio di cemento pari a 200 kg/m^3) arriva a 50% di consistenza in circa 70 minuti, mentre il getto M114 (con un dosaggio di cemento pari a 250 kg/m^3) impiega più di 90 minuti per arrivare alla medesima consistenza. Come nel caso precedente, dove l'acqua d'impasto delle miscele non conteneva solfati, anche con queste ultime miscele si osserva che la miscela M111, conservata in ambiente a 5°C , conserva la lavorabilità per più tempo; raggiunge il 40% di consistenza in circa 3 ore (Figura 5.20).

Tabella 5.10 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con acqua solfatica per i getti M110, M111, M113, M114.

<i>Sigla</i>	<i>M110-2</i>	<i>M111-2</i>	<i>M113-2</i>	<i>M114-2</i>
Data getto	19/05/2006	19/05/2006	26/05/2006	26/05/2006
Cemento (kg/m ³)	100	150	200	250
Acqua (kg/m ³)	707	695	683	672
Umidità terreno (%)	0	0	27.62	0
Vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale
Terreno secco (kg/m ³)	707	695	683	672
Acqua/terreno (<i>a/t</i>)	1	1	1	1
Acqua/cemento(<i>a/c</i>)	7.07	4.63	3.42	2.67
Volume (litri)	9.1	11.3	11.3	9.5
Spandimento D ₁ (mm)	235	225	210	210
Spandimento D ₂ (mm)	240	230	210	205
Consistenza (%)	138	128	110	108
Consistenza a 5°C (%)	-	128	-	-
Densità fresco (kg/m ³)	1538	1522	1548	1560
Densità indurito (kg/m ³)	1484	15097	1520	1528
Rc _{7 giorni} (MPa)	0.27	0.63	1.10	1.48

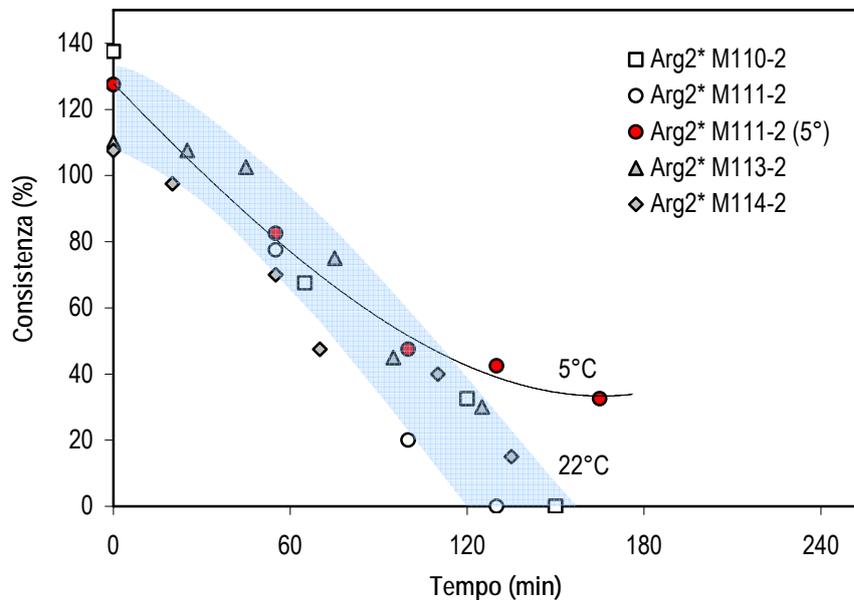


Figura 5.20 - Perdita della consistenza nel tempo per le miscele cementizie confezionate con acqua solfatica: M110, M111, M113 e M114.

5.82 Variazione di massa

Dopo 7 giorni di stagionatura in camera umida i provini prismatici ottenuti con le miscele cementizie confezionate nelle terza fase (vedi Tabella 3.2) sono stati esposti ai diversi ambienti di prova (vedi Tabelle 3.3 e 3.4).

Le Figure 5.21 e 5.22 riportano gli andamenti nel tempo delle variazioni di massa misurata per i diversi provini rispettivamente confezionati con acqua priva e con solfati.

I provini immersi in acqua a 5°C, per effetto dell'assorbimento, incrementano le loro masse fino a 6% nell'arco di 3 giorni, indipendentemente dalla composizione delle miscele. Tali valori permangono anche dopo un mese di prova.

Anche per i provini immersi in acqua solfatica si ha un comportamento analogo; si misurano tuttavia incrementi di massa leggermente inferiori (comunque non superiori a 2%) per tutto il tempo di prova.

I provini mantenuti a 5°C in condizioni asciutte subiscono una progressiva diminuzione di massa. Per i provini confezionati senza l'impiego di acqua solfatica, si osserva come, dopo due settimane di stagionatura si abbiano diminuzioni del peso di poco più di 20% con 250 kg/m³ di cemento (M108), mentre si raggiunge anche una diminuzione di circa 40% per i provini con 100 kg/m³ di cemento (M104).

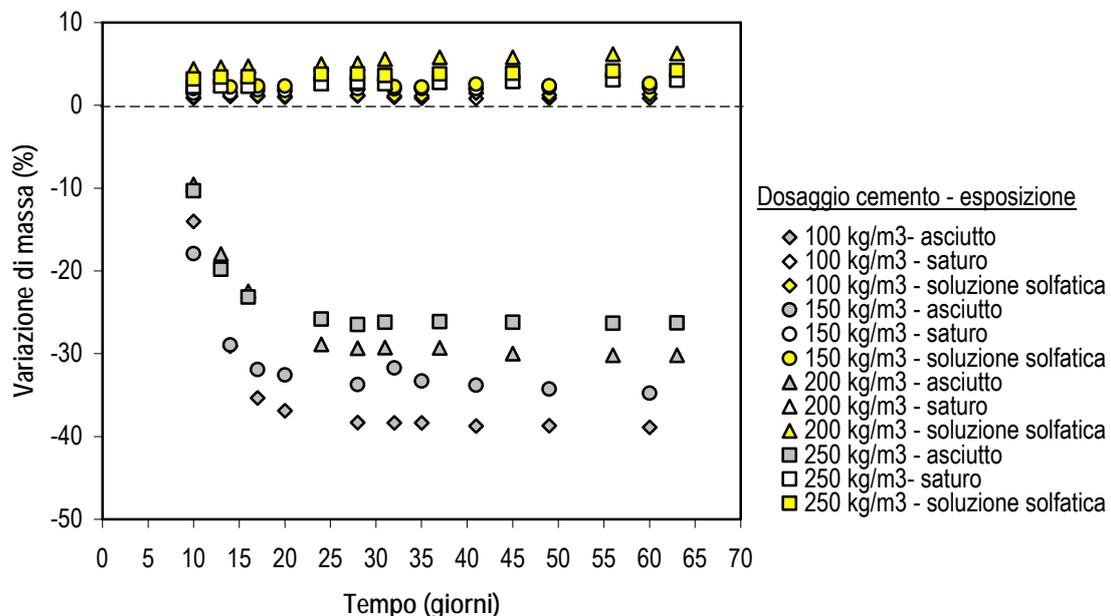


Figura 5.21 – Variazione di massa per provini confezionati con acqua potabile e differenti dosaggi di cemento (◆ 100 kg/m³; ● 150 kg/m³; ▲ 200 kg/m³; ■ 250 kg/m³), mantenuti, dopo una stagionatura di 7 giorni, alcuni in condizioni asciutte altri in acqua o in soluzione solfatica.

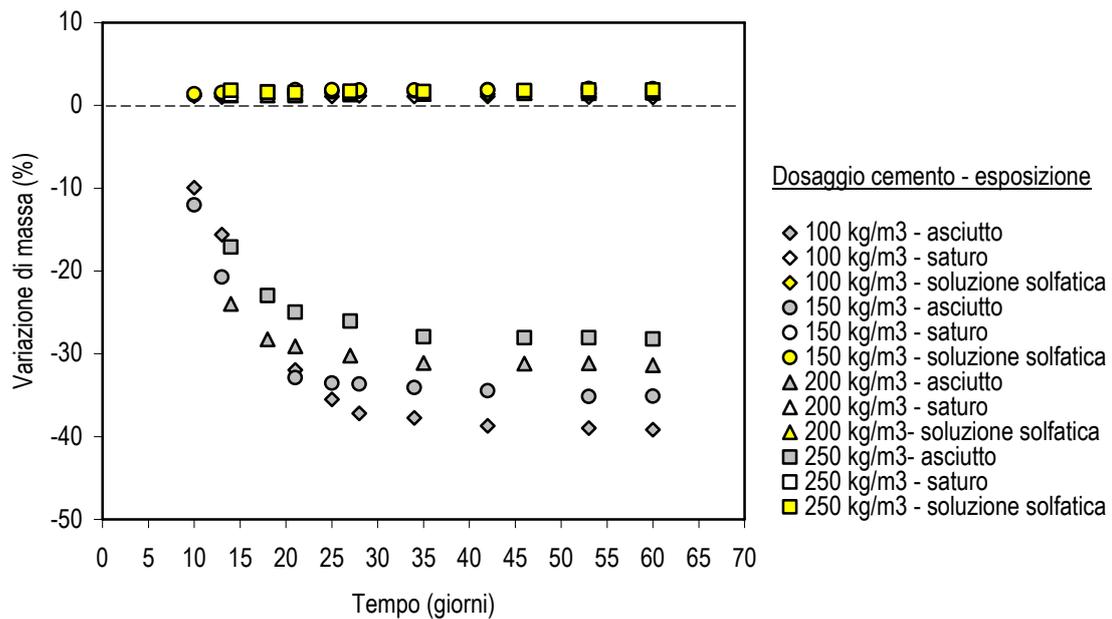


Figura 5.22 – Variazione di massa per provini confezionati con acqua solfatica e differenti dosaggi di cemento (◆ 100 kg/m³; ● 150 kg/m³; ▲ 200 kg/m³; ■ 250 kg/m³), mantenuti, dopo una stagionatura di 7 giorni, alcuni in condizioni asciutte altri in acqua o in soluzione solfatica.

Dopo 3 settimane di esposizione i valori tendono a stabilizzarsi (Figura 5.21). Analogò è il comportamento dei provini confezionati con acqua solfatica nell'impasto e conservati in diversi ambienti a 5°C (Figura 5.22).

Ad un'analisi visiva i provini, con e senza acqua solfatica nell'impasto e in qualsiasi condizione siano conservati, non presentano alterazioni. Unica eccezione è data dai provini confezionati con bassi dosaggi di cemento (100 kg/m³) e posti in ambiente asciutto che, oltre alla perdita di massa precedentemente descritta, hanno subito un ritiro evidente. La Figura 5.23 mostra il confronto tra il provino prismatico M104-2_II (100 kg/m³ di cemento) con M107-2_IV (200 kg/m³ di cemento), entrambi esposti in condizioni asciutte.

5.83 Prestazioni meccaniche

Per verificare gli effetti dell'immersione in acqua potabile ed in acqua solfatica, si è misurata la resistenza meccanica a compressione dei provini realizzati in quest'ultima fase.

Dopo 7 giorni di stagionatura a 22°C in ambiente umido i provini hanno sviluppato resistenze crescenti al diminuire del rapporto *a/c* (ovvero, al crescere del dosaggio di cemento). Come si può vedere nelle Tabelle 5.9 e 5.10, per rapporti *a/c* pari a 7.07 si hanno resistenze medie di 0.24 MPa per i provini realizzati con acqua potabile e di 0.27 MPa per i provini realizzati con acqua solfatica.

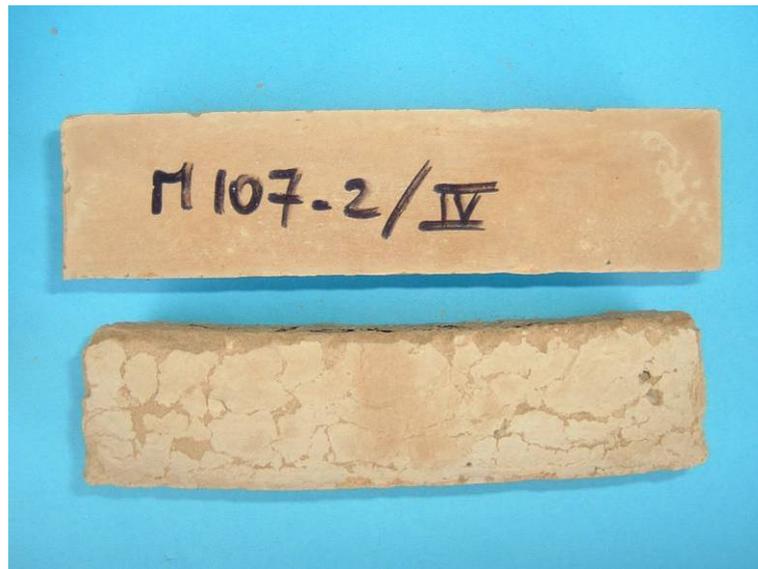


Figura 5.23 – Confronto visivo tra il provino M104-2_II e M107-2_IV entrambi esposti in condizioni asciutte.

Diminuendo il rapporto a/c fino al valore di 2.67, le resistenze aumentano notevolmente; si hanno resistenze medie di 1.56 MPa per i provini realizzati con acqua potabile e di 1.48 MPa per quelli realizzati con acqua solfatica.

Si è valutata, in seguito, la variazione della resistenza a compressione dopo 21 giorni di esposizione in vari ambienti per le diverse miscele, differenziate per rapporto a/c, tipo d'acqua di impasto e condizione di esposizione.

Per i provini immersi in acqua a 5°C, si nota che le resistenze, rispetto ai 7 giorni di stagionatura, non sono aumentate se non di qualche centinaio di kPa. Provini del getto M105 sono passati da 0.59 MPa a 7 giorni di stagionatura, a 0.66 MPa a 21 di esposizione (vedi Tabella 5.11); analogamente i provini confezionati con acqua solfatica non hanno subito incrementi evidenti di resistenza: si passa, per esempio, da 1.10 MPa a 7 giorni di stagionatura per il getto M113, a 1.30 MPa a 21 di esposizione (vedi Tabella 5.12).

Per i travetti conservati in acqua solfatica a 5°C e confezionati con acqua potabile nell'impasto, si osserva che le resistenze dopo 21 giorni di esposizione, in confronto a quelle dei provini conservati in acqua potabile precedentemente descritti, sono leggermente maggiori. In Tabella 5.11 si nota che la differenza tra questi due ambienti di esposizione sia quasi inesistente per i getti con alto rapporto a/c (0.23 MPa per provini immersi in acqua potabile, rispetto a 0.25 MPa per provini immersi in acqua solfatica), mentre è più marcata per bassi rapporti a/c (1.46 MPa per il provini immersi in acqua potabile, rispetto a 1.82 MPa per i provini immersi in acqua solfatica). Invece, i provini confezionati con acqua solfatica e

conservati in immersione a 5°C in acqua solfatica non presentano differenze rispetto a quelli con lo stesso tipo d'acqua d'impasto ma conservati in immersione in acqua potabile (Tabella 5.12).

Differente è il comportamento delle miscele mantenute a 5°C in ambiente asciutto; si nota come le resistenze rispetto a 7 giorni siano notevolmente aumentate. I provini del getto M108 sono passati da 1.56 MPa a 7 giorni di stagionatura, a 2.71 MPa a 28 giorni; allo stesso modo i provini del getto M114 sono passati da 1.48 MPa a 7 giorni di stagionatura, a 2.16 MPa a 28 giorni. Inoltre, i travetti confezionati con acqua potabile, posti in condizioni asciutte a parità di stagionatura (28 giorni) rispetto a quelli immersi, mostrano aumenti di resistenza anche dell'ordine di 80% (Tabella 5.11), mentre per i prismi confezionati con acqua solfatica, le variazioni, sono più contenute, mediamente del 50% (Tabella 5.12). Analizzando le resistenze dopo 60 giorni di stagionatura (53 giorni di esposizione in diverse condizioni) degli stessi provini precedentemente osservati (sia con acqua solfatica sia con acqua senza solfati nell'impasto), si nota una diminuzione delle resistenze meccaniche nei provini conservati a 5°C in ambiente asciutto (Tabella 5.11; Tabella 5.12); tale abbassamento di resistenza trova il suo minimo per le miscele con rapporti a/c pari a 2.68 per le quali si passa da 2.71 MPa a 21 giorni di esposizione a 2.11 MPa dopo 53 giorni.

Tabella 5.11 - Riepilogo dei valori di resistenza a compressione per le miscele cementizie confezionate con acqua prelevata dall'acquedotto di Milano.

Getto	Tipo terreno	a/c	a/t	Cemento kg/m ³	Condizioni di esposizione	Resistenze a compressione (giorni)		
						7	28	60
M104-2	Arg2*	7.07	1	100	Umido	0.24	-	-
					Asciutto	-	0.46	0.34
					Saturo	-	0.23	0.23
					Soluzione solfatica	-	0.25	0.27
M105-2	Arg2*	4.63	1	150	Umido	0.59	-	-
					Asciutto	-	1.05	0.63
					Saturo	-	0.66	0.78
					Soluzione solfatica	-	0.76	0.87
M107-2	Arg2*	3.42	1	200	Umido	0.95	-	-
					Asciutto	-	1.47	1.06
					Saturo	-	1.01	1.19
					Soluzione solfatica	-	1.14	1.41
M108-2	Arg2*	2.68	1	250	Umido	1.56	-	-
					Asciutto	-	2.71	2.11
					Saturo	-	1.46	2.14
					Soluzione solfatica	-	1.82	2.2

Tabella 5.12 - Riepilogo dei valori di resistenza a compressione per le miscele cementizie confezionate con acqua solfatica

Getto	Tipo terreno.	a/c	a/t	Cemento kg/m ³	Condizioni di esposizione	Resistenze a compressione (giorni)		
						7	28	60
M110-2	Arg2*	7.06	1	100	Umido	0.27	-	-
					Asciutto	-	0.45	0.35
					Saturo	-	0.29	0.29
					Soluzione solfatica	-	0.29	0.34
M111-2	Arg2*	4.63	1	150	Umido	0.63	-	-
					Asciutto	-	0.97	0.57
					Saturo	-	0.59	0.74
					Soluzione solfatica	-	0.62	0.82
M113-2	Arg2*	3.42	1	200	Umido	1.10	-	-
					Asciutto	-	1.74	1.22
					Saturo	-	1.3	1.37
					Soluzione solfatica	-	1.25	1.47
M114-2	Arg2*	2.69	1	250	Umido	1.48	-	-
					Asciutto	-	2.16	1.68
					Saturo	-	1.67	1.89
					Soluzione solfatica	-	1.63	1.83

Al contrario i provini immersi aumentano, nel tempo, la loro resistenza, mantenendo l'andamento descritto in precedenza (Tabella 5.11; Tabella 5.12).

5.84 Resistività elettrica

Per i provini immersi in acqua potabile sono state effettuate, nel tempo, delle misure di resistività elettrica. Tali valori indicano lo stato di idratazione dei provini nel tempo; infatti, all'aumentare del tempo di stagionatura il provino oppone maggiore resistenza al passaggio della corrente elettrica. Come mostra la Figura 5.24, che riporta l'andamento delle resistività nel tempo di diversi provini, le misure non evidenziano alcuna significativa dipendenza rispetto al dosaggio di cemento utilizzato; i valori di resistività elettrica si attestano in un campo di variabilità compreso fra 7 Ωm e 20 Ωm .

Si può notare che le miscele confezionate con acqua d'impasto contenente solfati (rappresentate in Figura 5.24 da simboli in rosso) possiedono, in generale, i valori di resistività leggermente superiori, fin dai primi giorni di esposizione. Per esempio, le miscele M113 e M114 presentano dopo 21 giorni di stagionatura valori di resistività attorno a 20 Ωm ; diversamente questo valore non è invece stato raggiunto, entro il primo mese, da nessuno dei provini analoghi, ma confezionati con acqua potabile.

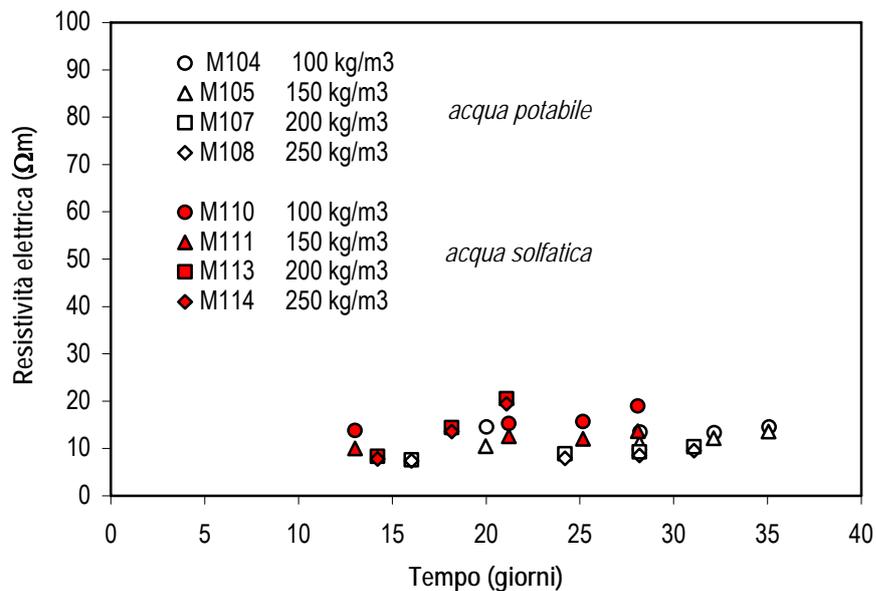


Figura 5.24 – Andamento delle resistività elettriche nel tempo per i provini confezionati, sia con acqua potabile sia con acqua solfatica con differenti dosaggi di cemento e mantenuti in condizioni sature.

5.8.5 Osservazione ESEM

Per valutare la microstruttura della miscela cementizia con terreno allo stato indurito, alcuni campioni provenienti dai diversi getti di quest'ultima fase sono stati osservati al microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM). L'elenco dei campioni osservati è riportato in Tabella 3.5.

Getto M105-2_VI

Il campione M-105-2_VI è stato confezionato con acqua e stagionato in acqua priva di solfati. Si è proceduto preliminarmente all'osservazione del campione in condizioni umide per evitare che subisse fenomeni di ritiro e, conseguentemente, variazioni microstrutturali. La Figura 5.25, la Figura 5.27 e la Figura 5.29 riportano come appare, in tali condizioni, la superficie di frattura del campione. Le osservazioni, effettuate in zone ed ingrandimenti diversi, evidenziano una morfologia della matrice sostanzialmente omogenea. L'analisi EDS media (Figura 5.28) evidenzia in prevalenza la presenza di calcio (Ca), silicio (Si), ossigeno (O) e alluminio (Al), coerente con la natura argillosa e cementizia dell'impasto. Trascurabile appare invece la presenza di magnesio (Mg) e potassio (K). Si è, quindi, osservato il medesimo campione in condizioni secche (Figura 5.30) per valutare eventuali variazioni causate da un cambiamento di umidità nell'ambiente di prova.

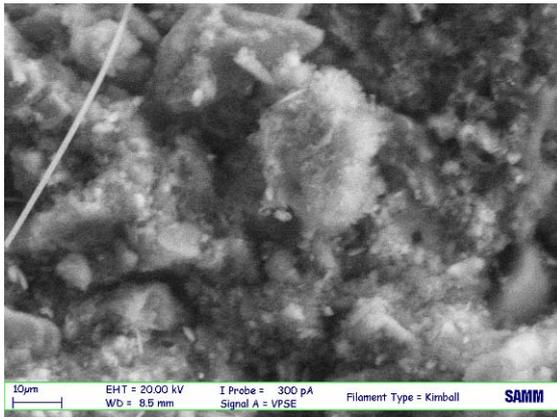


Figura 5.25 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VI, osservato in condizioni umide.

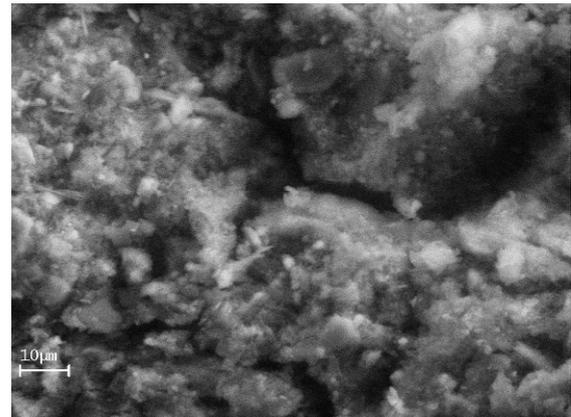


Figura 5.26 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VI, osservato in condizioni umide.



Figura 5.27 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VI, osservato in condizioni umide.

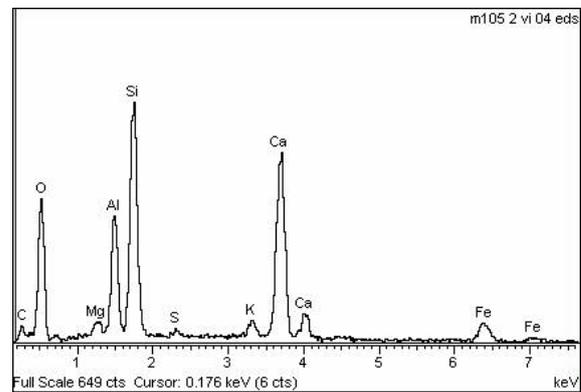


Figura 5.28 – Analisi EDS relativa alla zona indicata nella Figura 5.27.

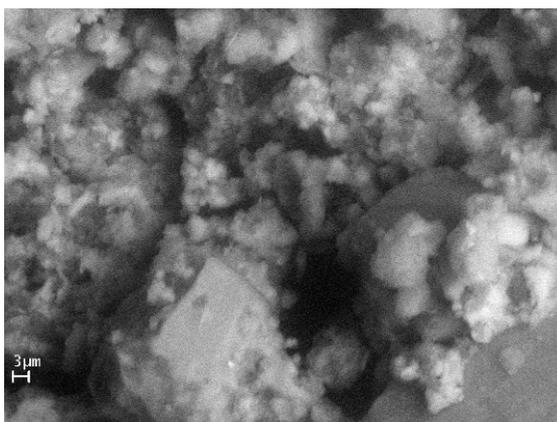


Figura 5.29 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VI, osservato in condizioni umide.

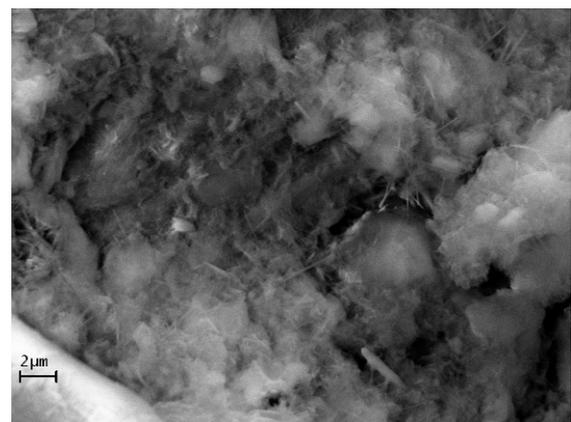


Figura 5.30 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VI, osservato in condizioni secche.

Il confronto del campione in condizioni umide rispetto a quelle secche (Figura 5.31), mantenute ad una pressione di 200 mPa, a parità di ingrandimento, non ha evidenziato sostanziali differenze a livello morfologico; visto che le immagini del campione in condizioni asciutte presentano una migliore risoluzione rispetto a quelle in condizioni umide, si è deciso di osservare gli altri campioni solo in condizioni asciutte.

Getto M111-2_VI

Successivamente si è osservato il campione di malta M111-2_VI confezionato con acqua solfatica ma esposto, una volta indurito, in acqua priva di solfati. Anche questo campione è stato inizialmente osservato in condizioni umide alla temperatura di -1°C e alla pressione di 200 mPa (Figura 5.32). In corrispondenza di due zone della superficie di frattura del campione M-111-2_VI sono state effettuate analisi EDS (rispettivamente indicate dagli spettri riportati nella Figura 5.33 e Figura 5.34). La matrice, anche in questo caso, risulta prevalentemente costituita da calcio (Ca), ossigeno (O), silicio (Si) e alluminio (Al) (Figura 5.33). La particella, che si può osservare in basso a destra nella Figura 5.32, è costituita in prevalenza da silicio, alluminio e in quantità inferiori da calcio, magnesio, ferro e potassio (Figura 5.34), e potrebbe essere un grano di argilla. Si è, quindi, proceduto ad asciugare lentamente il campione. La Figura 3.35 si riferisce al campione osservato mantenendo una pressione di 641 mPa ad una temperatura di 0°C . Si è ulteriormente diminuita la pressione (a 200 mPa) (Figura 5.36). Successivamente il campione è stato portato ad una pressione di 150 mPa e si è proceduto ad innalzare lentamente la temperatura sino a raggiungere 20°C (Figura 5.37). Si deduce, quindi, come passando dalle condizioni umide a quelle secche non si osserva alcuna variazione morfologica. La Figura 5.39 si riferisce al campione osservato in condizioni secche in una zona centrale che si presenta più porosa; in corrispondenza ad essa è stata fatta un'ulteriore analisi EDS (Figura 5.39) che conferma le precedenti osservazioni (Figura 5.34). Malgrado il campione sia stato confezionato con acqua solfatica appare modesto il contenuto di zolfo (S) evidenziato dallo spettro EDS. Si evidenziano, solo in maniera limitata, particelle di forma allungata che potrebbero essere cristalli di ettringite formatasi in seguito alla reazione dei solfati con i costituenti del cemento. Si è successivamente osservata ad ingrandimenti superiori un'altra zona (Figura 5.40) e sottoposta ad analisi EDS puntuale. Si distinguono, disperse nella matrice (indicata con 1), due particelle indicate con 2 e 3.



Figura 5.31 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VI, osservata in condizioni umide

Dall'analisi EDS effettuata in corrispondenza alla particella 3 è evidente la predominante presenza di silicio (Si), alluminio (Al) e potassio che potrebbe (Figura 5.43) suggerire che si tratta di un frammento di un aggregato siliceo. Diversamente la particella 2 è costituita soprattutto da calcio (Ca) che potrebbe far pensare alla presenza anche di aggregato calcareo (Figura 5.42).

In corrispondenza della matrice (Figura 5.41) si ritrovano silicio (Si), calcio (Ca), ossigeno (O) e alluminio (Al) ma anche ferro (Fe), potassio (K) e magnesio (Mg). La Figura 5.44 si riferisce ad un ingrandimento effettuato nella zona intermedia a quelle dove sono state effettuate le analisi EDS 1 e 2.

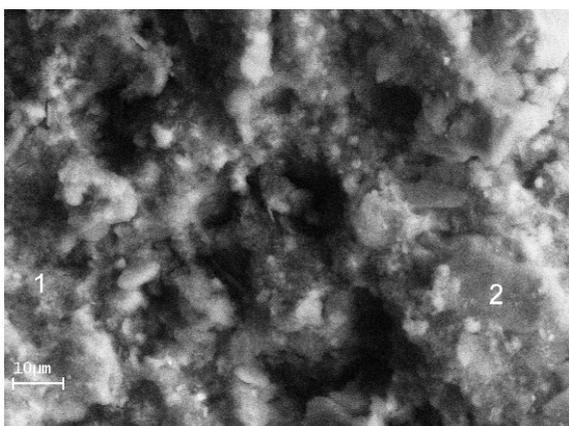


Figura 5.32 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M111-2_VI osservata in condizioni asciutte.

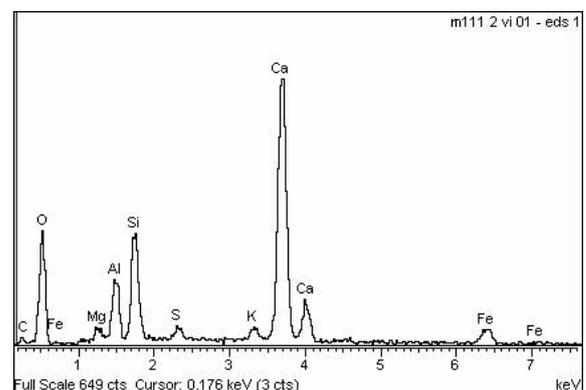


Figura 5.33 – Analisi EDS relativa alla zona indicata con "1" nella Figura 5.32 del campione M111-2_VI.

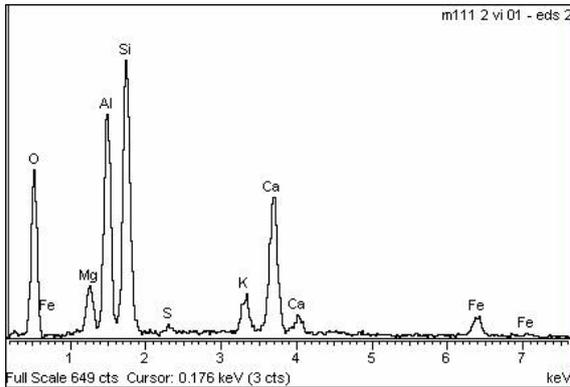


Figura 5.34 – Analisi EDS relativa alla zona “2” di Figura 5.32 del campione M111-2_VI.

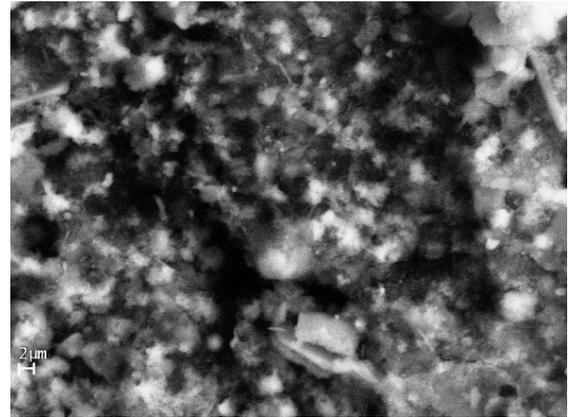


Figura 5.35 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M111-2_VI osservato in condizioni asciutte (641 mPa; 0°C).

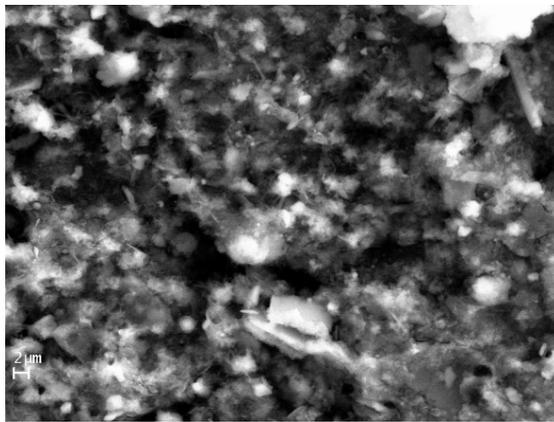


Figura 5.36 – Micrografia ESEM nella stessa zona di Figura 5.35 (200 mPa; 0°C).

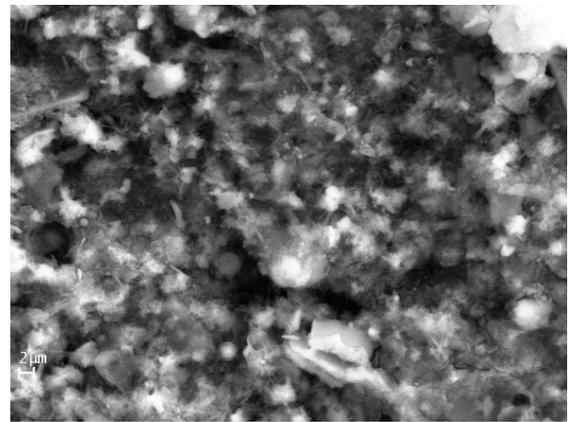


Figura 5.37 – Micrografia ESEM nella stessa zona di Figura 5.35 (150 mPa; 20°C).

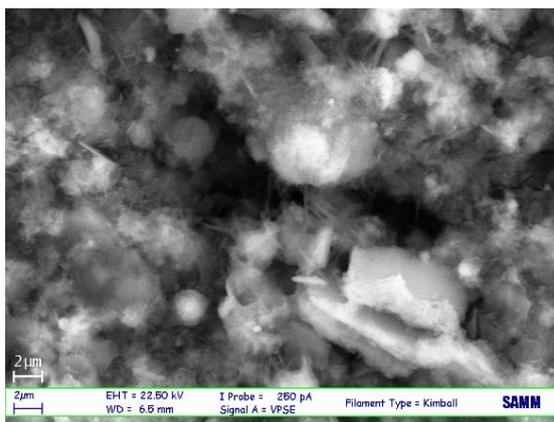


Figura 5.38 – Ingrandimento della zona riportata in Figura 3.50.

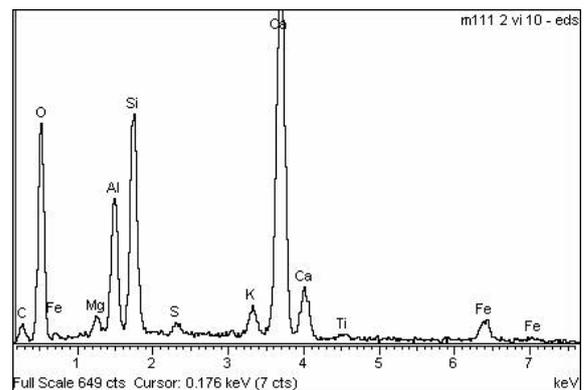


Figura 5.39 – Analisi EDS relativa alla Figura 5.38 del campione M111-2_VI.

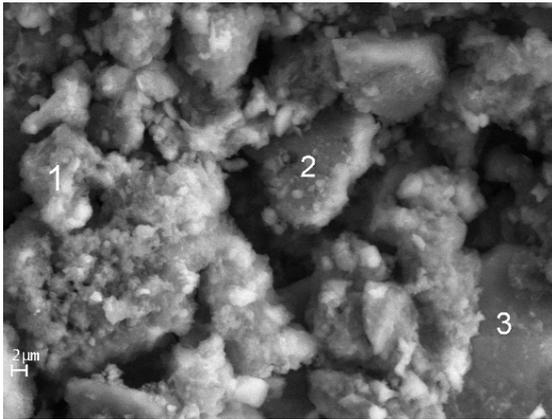


Figura 5.40 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M111-2_VI.

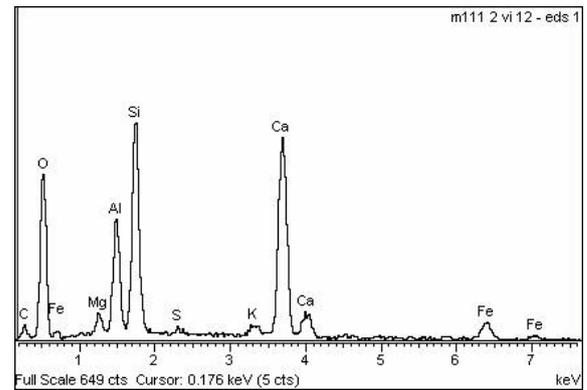


Figura 5.41 – Analisi EDS relativa alla zona “1” di Figura 5.40 del campione M111-2_VI.

Getto M105-2_VII

Si tratta della miscela confezionata con 150 kg/m^3 di cemento e acqua priva di solfati. La miscela, una volta indurita, è stata immersa in soluzione solfatica. In Figura 5.45 si possono distinguere nella matrice particelle di forma allungata che sono state analizzate per evidenziare gli elementi chimici costituenti. Nello spettro EDS (Figura 5.46) sono presenti calcio (Ca), ossigeno (O), silicio (Si), alluminio (Al) e zolfo (S), oltre a magnesio (Mg), ferro (Fe) e potassio (K). Tenendo conto dei costituenti prevalenti e della particolare morfologia delle particelle si potrebbe trattare di ettringite. Sono state effettuate inoltre un'analisi EDS generale (Figura 5.47) estesa a tutta la matrice osservata in Figura 5.45 e altre osservazioni ad ingrandimenti inferiori, in zone diverse del medesimo campione (Figura 5.48, Figura 5.49). In corrispondenza della matrice è stata effettuata l'analisi EDS mostrata in Figura 5.51. Si deduce che la formazione di queste particelle allungate sia generalizzata a tutta la matrice del campione.

Getto M108-2_VI

Si è proceduto ad osservare i campioni confezionati con un dosaggio di cemento di 250 kg/m^3 , in particolare, il campione M108-2_VI che è analogo, per tipo di acqua di impasto (priva di solfati) e condizioni di esposizione (immersione in acqua), al campione M105-2_VI. A parità di ingrandimento, si può osservare come la matrice di questo campione (Figura 5.50) appaia molto densa con parecchi prodotti di idratazione, molto più di quanto si possa osservare in un campione analogo, ma confezionato con un dosaggio inferiore di cemento pari a 150 kg/m^3 (Figura 5.25).

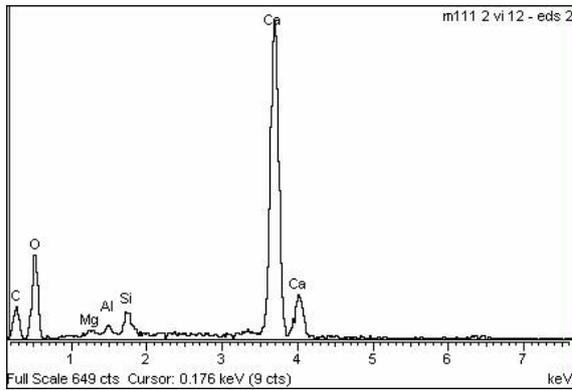


Figura 5.42 – Analisi EDS relativa alla zona “2” di Figura 5.40 del campione M111-2_VI.

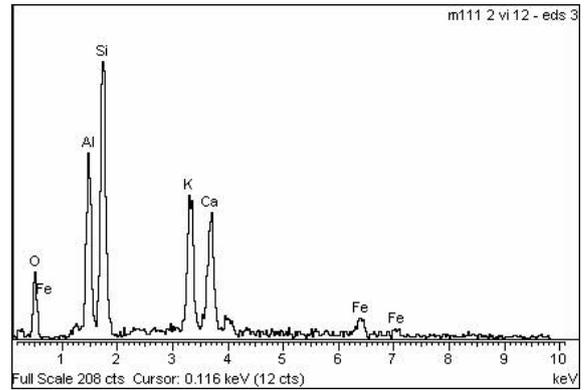


Figura 5.43 – Analisi EDS relativa alla zona “3” di Figura 5.40 del campione M111-2_VI.

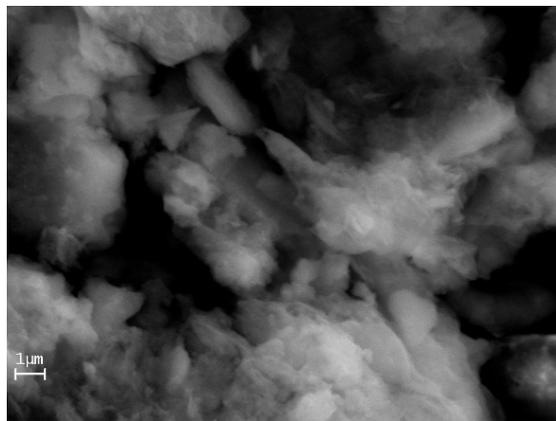


Figura 5.44 – Ingrandimento della Figura 5.40 compreso tra i punti “1” e “2”.

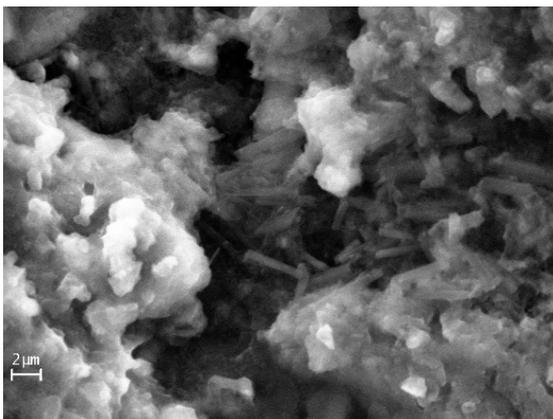


Figura 5.45 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VII.

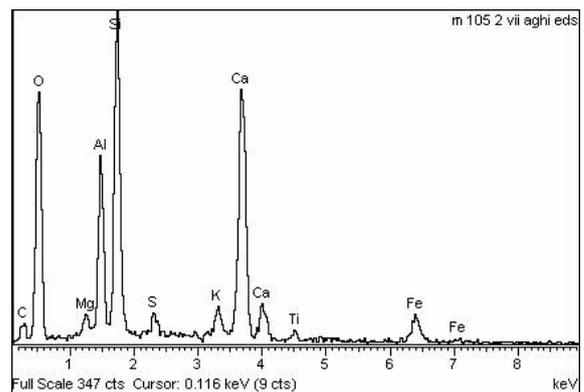


Figura 5.46 – Analisi EDS relativa alla zona centrale di Figura 5.45 del campione M105-2_VII.

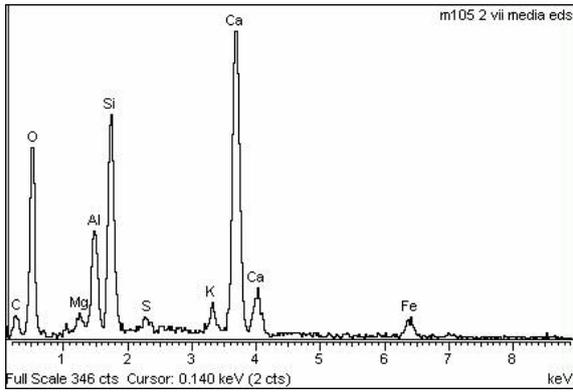


Figura 5.47 – Analisi EDS generalizzata della Figura 5.45 del campione M105-2_VII.

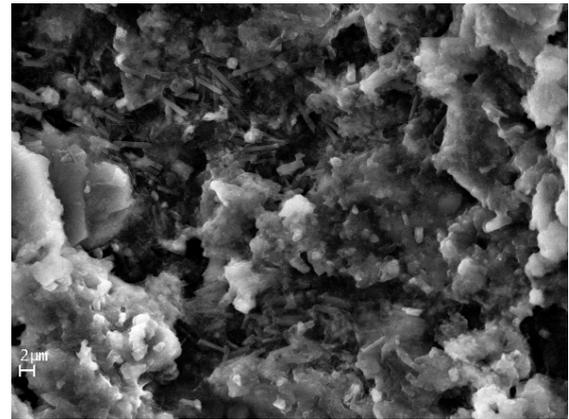


Figura 5.48 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VII.

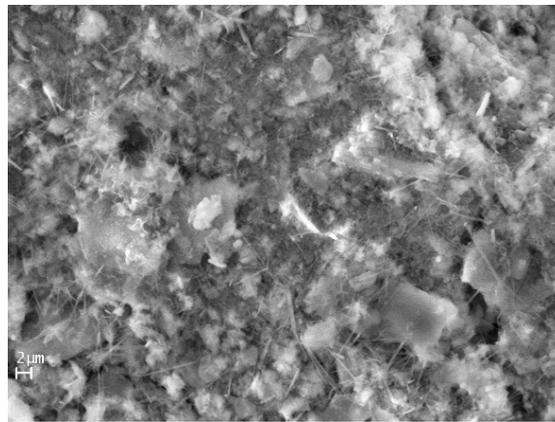


Figura 5.49 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M105-2_VII, in una zona diversa.

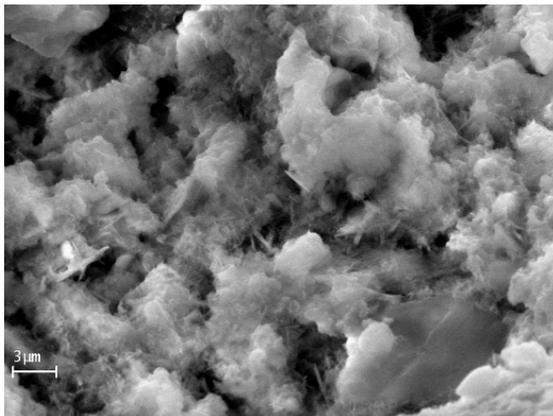


Figura 5.50 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M108-2_VI.

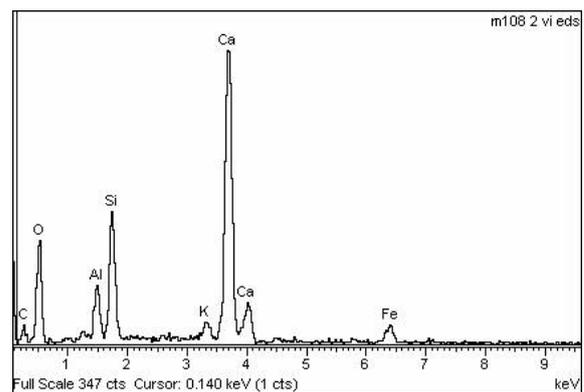


Figura 5.51 – Analisi EDS generalizzata della Figura 5.50 del campione M108-2_VI.

Getto M108-2_VII

Per confronto si è osservato un campione (M108-2_VII) con il medesimo dosaggio di cemento (250 kg/m^3) con acqua potabile, ma immerso in acqua solfatica dopo 7 giorni di stagionatura. Il campione, osservato al microscopio elettronico a scansione (Figura 5.52), si presenta simile all'analogo campione che invece è rimasto immerso per 21 giorni in acqua prelevata dall'acquedotto. In corrispondenza della matrice è stata effettuata un'analisi EDS che mostra solo un modesto picco dello zolfo in questo campione (Figura 3.66). L'immersione per 21 giorni in acqua solfatica non sembra, quindi, aver alterato significativamente la microstruttura del materiale.

Getto M114-2_VI

Il campione M114-2_VI è stato confezionato con 250 kg/m^3 di cemento e acqua solfatica. L'osservazione effettuata al microscopio (Figura 5.54) è corredata di analisi dello spettro EDS (Figura 3.68). Non si osservano sostanziali differenze nel caso in cui si utilizzi acqua solfatica nell'impasto. Rispetto al campione M111-2_VI (Figura 5.32), caratterizzato da una quantità di cemento inferiore (150 kg/m^3), si nota una maggiore presenza di prodotti di idratazione.

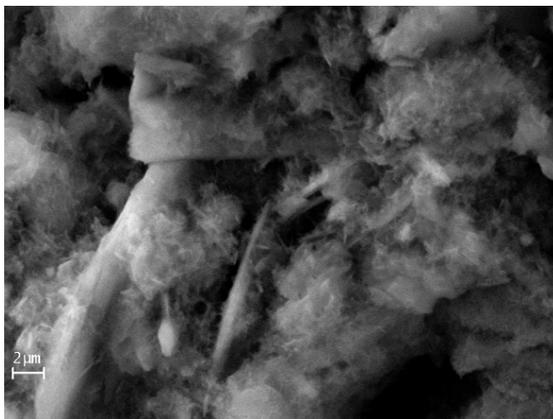


Figura 5.52 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M108-2_VII.

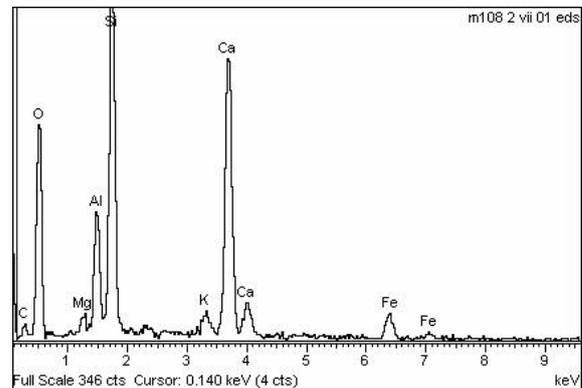


Figura 5.53 – Analisi EDS generalizzata della Figura 5.52 del campione M108-2_VII.

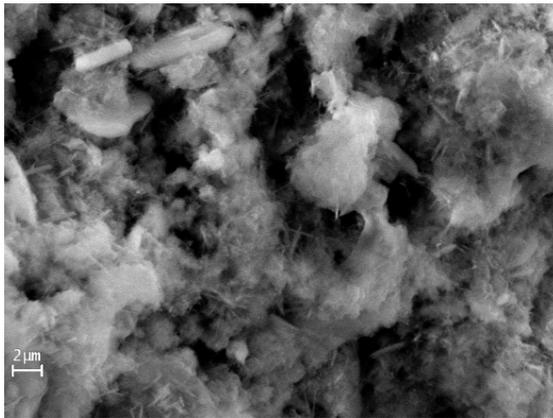


Figura 5.54 – Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M114-2_VI

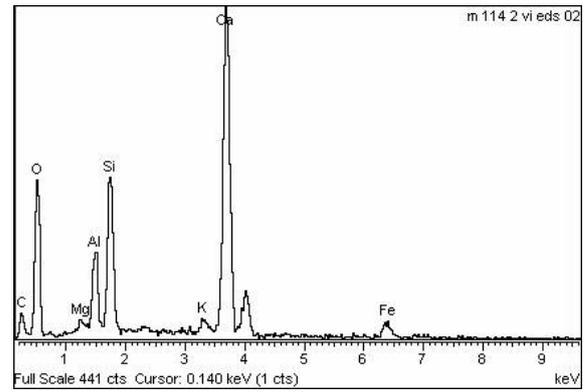


Figura 5.55 – Analisi EDS generalizzata della Figura 5.54 del campione M114-2_VI .

6. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Si discutono in questo paragrafo i risultati ottenuti dall'attività sperimentale finalizzata a valutare l'influenza di diverse variabili, legate sia alla composizione delle miscele cementizie con terreno, sia alle condizioni di messa in opera, sulle proprietà allo stato fresco ed indurito del materiale da utilizzare per il riempimento delle gallerie. Si riportano nella Tabella 6.1 i dati riassuntivi della composizione e delle principali caratteristiche delle miscele cementizie con terreno confezionate nelle diverse fasi.

6.1 Fluidità

Una miscela per poter essere iniettabile deve presentare un'adeguata fluidità e colabilità.

Tabella 6.1 – Principali caratteristiche delle miscele cementizie confezionate con terreno.

Miscela	Tipo terreno	a/c	a/t	Dosaggio cemento (kg/m ³)	Consistenza (%)	R _{c,7gg} (MPa)	R _{c,28gg} (MPa)
87-1	Arg1	5.57	0.46	97	70	0.26	0.76
87-2	Arg1	2.68	0.47	195	75	0.61	0.7
87-3	Arg1	3.64	0.46	146	65	0.57	0.84
89-7	Arg2	5.02	0.78	129	53	0.77	1.23
90-7	Arg1	4.29	0.60	138	90	0.35	-
90-8	Arg1	4.65	0.60	131	107	0.24	-
91-11	Arg2	4.34	1.10	163	100	0.54	-
92-5	Arg1*	3.80	0.40	131	110	0.32	0.54
93-7	Arg1*	3.91	0.45	133	90	0.31	0.56
93-8	Arg1*	4.35	0.50	125	107	0.25	0.41
94-9	Arg2	4.96	1.04	142	100	0.35	0.53
95-3	Arg2	4.96	1.04	142	108	0.20	0.33
96-8	Arg2 + sabbia	4.02	0.65	150	100	0.33	0.58
97-6	Arg1*	3.65	0.50	150	90	0.31	0.44
98-2	Arg2	4.47	0.88	150	80	0.61	-
99-9	Arg2*	4.70	1.05	150	87	0.50	0.97
100-6	Arg2*	4.42	0.85	150	102	0.48	1.29
101-6	Arg2*	4.61	0.85	144	105	0.59	0.98
102-7	Arg2*	4.22	0.65	144	97	0.94	1.45
104-2	Arg2*	7.07	1.00	100	195	0.24	-
105-2	Arg2*	4.63	1.00	150	195	0.59	-
107-2	Arg2*	3.42	1.00	200	225	0.95	-
108-2	Arg2*	2.68	1.00	250	225	1.56	-
110-2	Arg2*	7.07	1.00	100	245	0.27	-
111-2	Arg2*	4.63	1.00	150	245	0.63	-
113-2	Arg2*	3.42	1.00	200	272	1.10	-
114-2	Arg2*	2.69	1.00	250	272	1.48	-

Le attività di laboratorio sono state rivolte ad analizzare quali sono i metodi e i parametri dai quali dipende la fluidità e quali valori devono assumere per poter soddisfare il requisito di colabilità, mantenendo un buon compromesso con gli altri obiettivi, in particolare la resistenza meccanica.

In base ai risultati ottenuti si sono analizzate le variazioni di fluidità rispetto al rapporto acqua/terreno (a/t), al diverso tipo di terreno e al dosaggio di cemento. Il tipo di terreno è una variabile legata alle disponibilità di cantiere, il quale deve poter utilizzare, per la produzione della miscela, materiali che consentano di contenere i costi e, quindi, preferibilmente quelli di facile approvvigionamento, come i terreni di scavo recuperati nelle vicinanze del cantiere. Il dosaggio del cemento, materiale indispensabile per conferire resistenza meccanica alla miscela di riempimento, è un'altra variabile che deve essere definita in funzione dei requisiti della miscela.

Per ottenere un'adeguata fluidità con miscele a base di cemento, acqua e terreno, si è definito il metodo di lavorazione dell'impasto. Si è infatti notato che, se prima dell'aggiunta di cemento ad una miscela composta solamente da terreno ed acqua tale terreno viene rimaneggiato, con progressive aggiunte di acqua, si giunge in tempi più brevi ad uno stato molto più fluido e colabile. Con il termine rimaneggiare si intende il processo di manipolazione e di inumidimento di una quantità di terreno fino renderlo malleabile e di seguito fluido. Questo processo distrugge o comunque danneggia la struttura interna del materiale costituitasi durante la sedimentazione e consente l'omogeneizzazione con acqua.

Questa fase della lavorazione è stata studiata aggiungendo progressivamente l'acqua e verificando ad ogni aggiunta il valore di consistenza, misurata con la tavola a scosse; si è visto in tal modo che essa aumenta in maniera lineare con il rapporto acqua/terreno in massa (Figura 6.2). Maggiore è il contenuto d'acqua rispetto al terreno, maggiore fluidità acquista la miscela; inoltre, grazie all'azione coesiva delle particelle di argilla, si possono raggiungere consistenze di oltre 200% (corrispondenti ad impasti molto fluidi) senza che si presentino fenomeni di segregazione.

Purtroppo, a parità di rapporto acqua/terreno, è risultato molto variabile il valore di consistenza ottenuta per i diversi getti effettuati nella prima parte del lavoro. Dai vari getti si è notato come alcune miscele, caratterizzate dalla stessa quantità d'acqua, non coincidevano in termini di consistenza. L'unico termine che cambiava negli impasti era il tipo di terreno. Si

sono utilizzati, infatti, quattro tipi di terreno con provenienze e caratteristiche differenti. Alcuni terreni sono composti da una percentuale di fini maggiore rispetto ad altri. In Figura 6.1 è evidente la differenza di composizione di alcuni terreni utilizzati.

In base alle dimensioni delle particelle che li compongono (in ordine dal più fine al più grossolano troviamo argilla, limo e sabbia), il terreno *Arg1** è composto per metà da sabbia e, quindi, possiede una maggiore percentuale di particelle grossolane rispetto ad *Arg2*, il quale presenta in prevalenza limo e argilla (Figura 6.1) (§ 3.1).

Si può osservare che le miscele composte da un particolare tipo di terreno hanno un andamento della consistenza rispetto al rapporto *a/t* simile tra loro, ed è possibile delimitare un campo di appartenenza ragionevolmente definito per ciascun terreno (Figura 6.2).

Quando sono presenti in un terreno maggiori percentuali di particelle fini, è maggiore la richiesta d'acqua nella miscela necessaria per raggiungere una determinata consistenza (Figura 6.2). In miscele di acqua e terreno, se si parte ad esempio, da valori di *a/t* pari a 0.5, si otterrebbero buoni valori di consistenza (150%) nel caso in cui venisse usato il terreno *Arg1**, mentre la fluidità sarebbe molto bassa (20%) se si utilizzasse *Arg2* o ancora più inferiore con *Arg2**; terreni come *Arg1*, invece, raggiungerebbero valori intermedi di consistenza (100%).

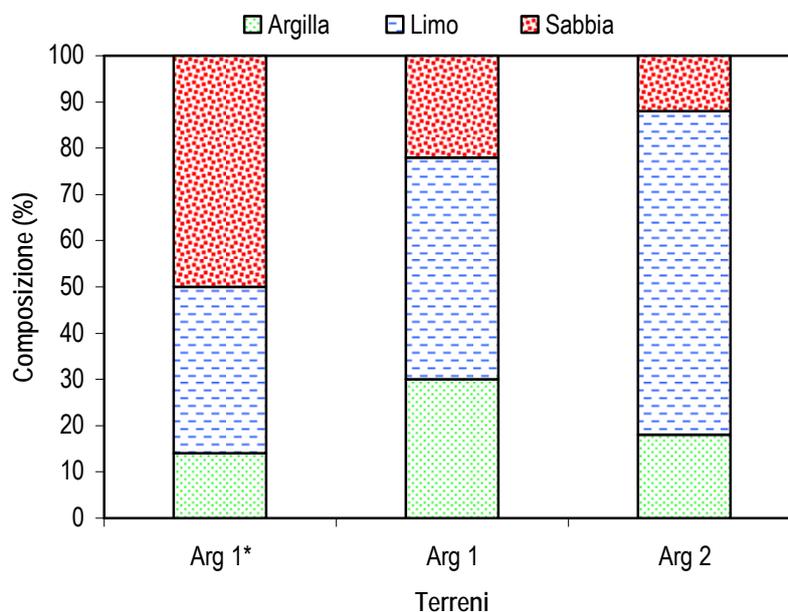


Figura 6.1 – Composizione percentuale dei vari terreni utilizzati in termini di contenuto di argilla, limo, e sabbia.

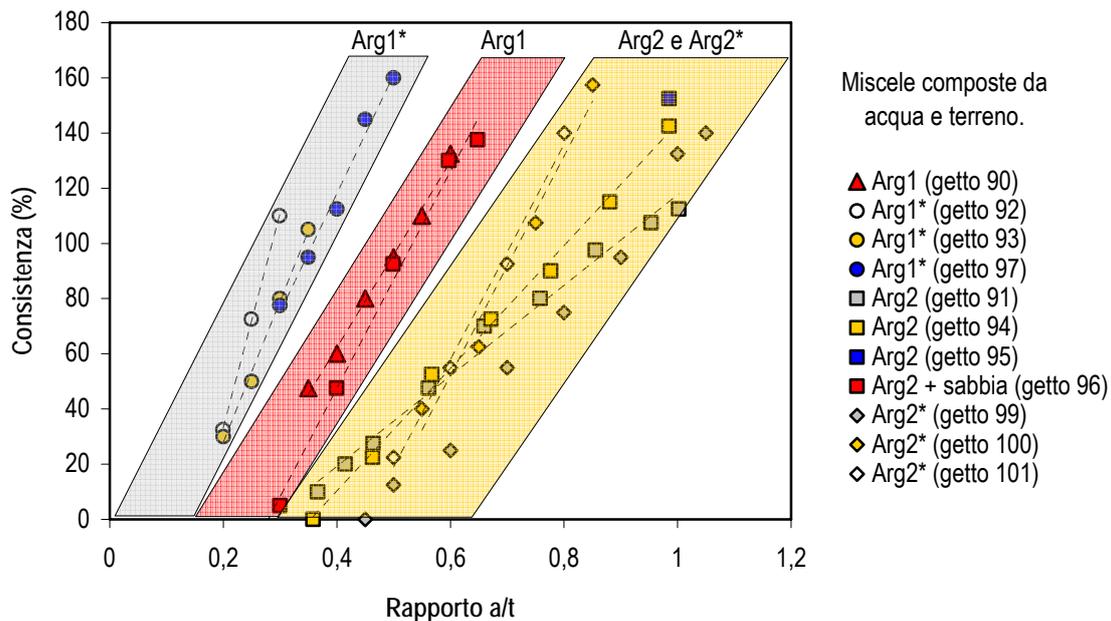


Figura 6.2 – Andamento della consistenza in relazione al rapporto a/t per miscele di terreno fluidificato, distinte per tipi di terreno.

Conoscendo l'andamento della curva di consistenza in funzione del rapporto a/t di un determinato terreno, è possibile quindi prevedere, prima della realizzazione della miscela, quale quantità di acqua sia necessaria per raggiungere la consistenza desiderata.

Se si volesse ottenere una consistenza pari a 150% con *Arg1** basterebbe molta meno acqua ($a/t = 0.5$) rispetto a quella necessaria per una miscela con *Arg2* ($a/t = 0.9$). Tale fatto influenza le applicazioni reali, dove esiste l'esigenza di dosare l'acqua in modo corretto per ottenere, senza ricorrere a più aggiunte, le consistenze necessarie.

In altro modo, la grande variabilità dei valori di consistenza ottenuti, dovuta ai diversi tipi di terreno utilizzati, può comportare problemi se si volesse definire in maniera univoca un mix design definitivo.

A tale scopo si è cercato di modificare la granulometria dei terreni con maggiore percentuale di fini (come il terreno *Arg2*) attraverso l'aggiunta controllata di sabbia, in modo da ottenere un materiale che avesse una distribuzione granulometrica confrontabile ad altri terreni più grossolani. Lo scopo è quello di ottenere, a parità di rapporto acqua/terreno, le stesse consistenze di terreni come *Arg1* (Figura 6.2); in tal modo si riduce la quantità d'acqua necessaria a fluidificare adeguatamente la miscela. Attraverso aggiunte controllate di sabbia si può portare la distribuzione granulometrica dei terreni fini ad un andamento simile a quello dei terreni più sabbiosi. In tal modo la richiesta di acqua necessaria per raggiungere una

determinata consistenza sarebbe inferiore e vantaggi si potrebbero ottenere in termini di resistenza (se si considera la conseguente diminuzione del rapporto a/c , mantenendo costante il dosaggio di cemento) (getto M96).

Come visto in precedenza, la procedura di miscelazione parte con il rimaneggiamento e la fluidificazione dell'argilla, alla quale solo in seguito viene aggiunta una quantità stabilita di cemento, al fine di ottenere una miscela cementizia che soddisfi i requisiti di resistenza. Si è cercato con vari getti di stabilire il valore minimo di consistenza necessario affinché una miscela cementizia possa scorrere in una tubazione verticale sfruttando solamente il proprio peso; inoltre, tale miscela deve potersi spandere sul fondo di un contenitore riempito d'acqua e spostare la stessa con la sua massa. Tale requisito è fondamentale in vista di una reale applicazione che verosimilmente prevedrà l'iniezione nelle gallerie a basse pressioni di miscele che dovranno poter scorrere nel condotto e possedere una mobilità all'interno della cavità che garantisca il riempimento del maggiore volume possibile, anche in presenza d'acqua.

Con tali prove si è stabilito che il limite minimo di consistenza di una miscela debba essere almeno 100%; le miscele con consistenza significativamente inferiore a 100%, infatti, non si sono potute colare con il sistema mostrato in Figura 3.8, che simula l'operazione di riempimento delle gallerie. Viceversa le miscele con consistenza di 100% o superiore si sono potute colare sul fondo attraverso il tubo e sono state in grado di sollevare l'acqua presente nel secchio.

Un ulteriore fattore che influisce sulla variazione della fluidità delle miscele cementizie è il dosaggio di cemento. L'introduzione del cemento causa una diminuzione della consistenza rispetto alla miscela di acqua e terreno, a volte tale da esser costretti ad aggiungere ulteriore acqua per ripristinare il livello minimo di consistenza. Non si sono verificate sostanziali differenze tra gli abbassamenti di consistenza nei diversi tipi di terreni mantenendo il dosaggio di cemento costante (Figure 5.1, 5.2, 5.5, 5.10 e 5.11), ma si è notata una significativa differenza nella diminuzione dei valori al variare del dosaggio di cemento. Come mostra la Figura 6.3 maggiore è il dosaggio di cemento, maggiore è anche la diminuzione della consistenza. Tale grafico è riferito a miscele, confezionate sia con acqua solfatica sia con acqua priva di solfati, che partono da consistenze superiori al 200% prima dell'aggiunta di cemento (§5.8).

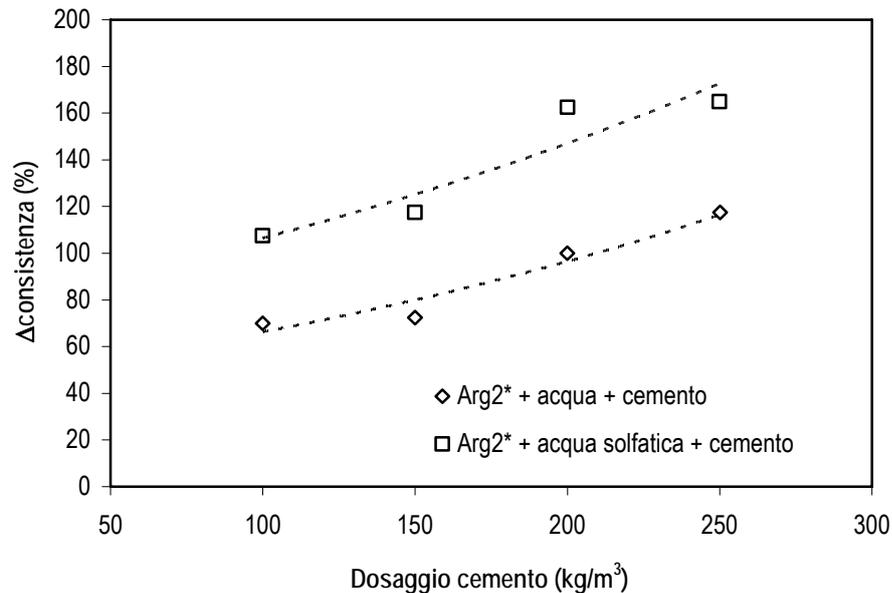


Figura 6.3 – Correlazione tra la diminuzione della consistenza al momento dell'aggiunta di diversi dosaggi di cemento.

Tali miscele sono state confezionate con differenti dosaggi di cemento (da 100 kg/m^3 fino a 250 kg/m^3) a partire da impasti di acqua e terreno con consistenze pari anche a 250% (Figure 5.17 e 5.19).

Se per miscele confezionate con acqua potabile con dosaggi di cemento pari a 100 kg/m^3 si ha un abbassamento di consistenza, nel momento dell'aggiunta di cemento, di circa 70% ; si può arrivare anche a 110% di diminuzione se si considerano medesime miscele confezionate con 250 kg/m^3 . Si ha quindi uno scarto del 40% nella perdita di consistenza passando da valori elevati di cemento (250 kg/m^3) a valori minori (100 kg/m^3).

Di notevole interesse è il fatto che, se si utilizza acqua contenente solfati nell'impasto della miscela, le diminuzioni di consistenza al momento dell'aggiunta del cemento superano quelle di impasti confezionati con acqua priva di solfati, di un valore pressoché costante. La Figura 6.3 mostra, infatti, una curva traslata sull'asse verticale di circa 40% rispetto a quella dei getti con acqua potabile. Questo effetto potrebbe essere dovuto a una precoce reazione degli alluminati del cemento con i solfati presenti nell'acqua, con rapida formazione di cristalli di solfo-alluminati.

I solfati contribuiscono quindi alla diminuzione della lavorabilità che la miscela di terreno fluidificato subisce con l'aggiunta di cemento; se si utilizza acqua contenente solfati nell'impasto di miscele confezionate con 150 kg/m^3 di cemento, si hanno diminuzioni di

consistenza paragonabili a quelle delle miscele contenenti 250 kg/m^3 , ma realizzate con acqua prova di solfati. Questo fatto ha condotto a stabilire quale dovesse essere la consistenza della miscela di terreno fluidificato, in modo da ottenere comunque in seguito all'aggiunta di cemento la consistenza minima accettabile per colare le miscele, senza la necessità di effettuare ulteriori incrementi d'acqua. Si suggerisce di confezionare miscele di terreno e acqua con consistenza variabile da 170% a 210% a seconda che si voglia incrementare il dosaggio di cemento da aggiungere da 100 kg/m^3 a 250 kg/m^3 . Nel caso si utilizzi acqua solfatica si dovranno prevedere consistenze superiori, per le miscele di terreno fluidificato, di almeno 40% per evitare l'abbassamento della consistenza dopo l'aggiunta di cemento a valori inferiori al limite consentito, affinché la miscela possa essere colabile.

Durante le attività di laboratorio, come è noto, si è scelto come metodo per misurare la fluidità quello usato per le malte (norma UNI EN 1015-3) che prevede l'uso della tavola a scosse. Tale metodo è scomodo da applicare al di fuori di un laboratorio attrezzato; si è cercato, quindi, di definire una metodologia di prova che consenta di effettuare in maniera semplice le misure della lavorabilità anche in cantiere, per verificare che la miscela da iniettare abbia una fluidità adeguata. Come per altre prove simili che si basano sullo stesso principio (es. V-funnel per i calcestruzzi autocompattanti o cono di Marsh per boiacche cementizie), si è sfruttato il fatto che la mobilità di una miscela dipende dalla sua viscosità, ed è correlabile al tempo impiegato a defluire da un condotto o da un contenitore. Utilizzando un semplice imbuto (§ 3.3.3) si è verificato che, tanto più la miscela è fluida o poco viscosa, tanto minore è il tempo di deflusso (Figura 5.12). Si è notato che è possibile misurare accuratamente solo consistenze minori del 100% (che corrispondono ad un tempo di svuotamento pari a circa 2 secondi); per consistenze superiori i tempi si riducono a tal punto che risulta assai difficoltoso misurare correttamente il valore. Peraltro, questo consente di considerare come prova di lavorabilità in cantiere la misura del tempo di svuotamento, in quanto per avere miscele con consistenze maggiori del 100% è sufficiente verificare che il tempo di svuotamento non sia superiore a 2 secondi. Questo può quindi essere considerata una semplice prova pratica da attuare in cantiere.

6.2 Lavorabilità nel tempo

Il mantenimento della fluidità nel tempo è un'ulteriore requisito che le miscele utilizzate per riempimenti devono possedere. L'intervallo di tempo tra la produzione e l'iniezione deve

essere minore di quello in cui la miscela perde significativamente le sue caratteristiche di lavorabilità. Il tempo in cui la miscela resta sufficientemente fluida (si è visto che per essere iniettabile deve possedere almeno il 100% di consistenza) vincola le quantità di miscela realizzabile e le modalità di confezionamento. Se i tempi di iniezione fossero superiori ai tempi limite lavorabilità, la porzione di miscela iniettata oltre tale limite avrebbe già perso le sue proprietà e non sarebbe più adatta allo scopo. Di conseguenza si dovrebbe produrre una quantità di miscela non maggiore a quella iniettabile nell'intervallo di tempo consentito. Se la lavorabilità si mantenesse per tempi lunghi, maggiori sarebbero le quantità di miscela che potrebbero essere introdotte in un singolo punto di colaggio e quindi maggiori i volumi che potrebbero essere riempiti.

Per tali motivi si è analizzata la perdita di lavorabilità nel tempo delle miscele confezionate, in modo da capire quali fattori la influenzano e come organizzare le attività di riempimento in cantiere.

Innanzitutto si è osservato che le miscele di solo terreno fluidificato, se l'evaporazione dell'acqua è impedita, conservano per lungo tempo la fluidità. Nel momento in cui si aggiunge il cemento, l'idratazione dello stesso provoca una diminuzione della consistenza che aumenta con il passare del tempo (Figura 6.4).

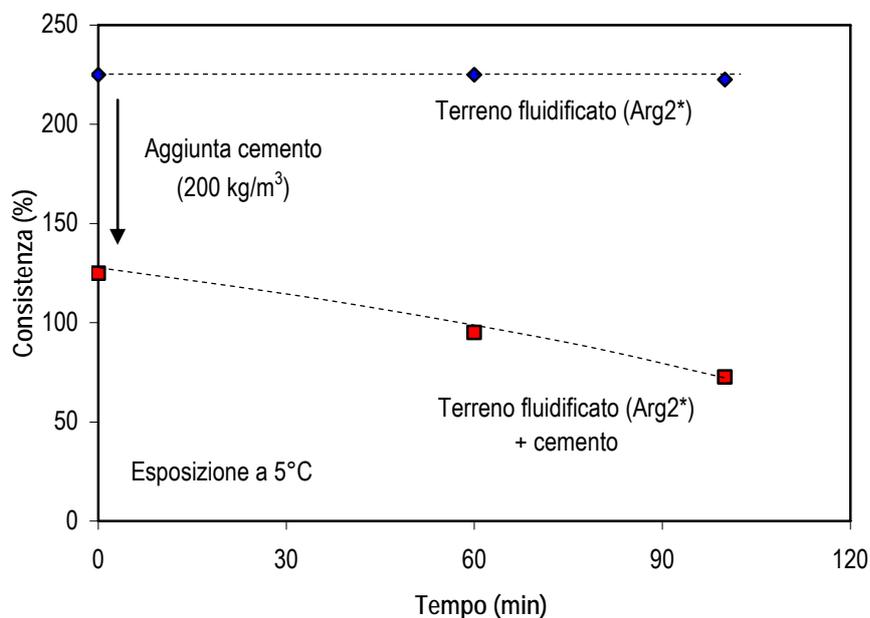


Figura 6.4 – Esempi di andamento della consistenza nel tempo di una miscela di terreno fluidificato e della medesima miscela dopo l'aggiunta di cemento, entrambe mantenute a 5°C.

Ad esempio, nella Figura 6.4 si osserva che la miscela con solo terreno anche dopo 2 ore mantiene lo stesso valore di consistenza (225%), mentre la medesima miscela a cui è stato aggiunto il cemento, dopo un primo abbassamento della consistenza pari a circa 90% dovuto all'aggiunta del legante, perde progressivamente lavorabilità e dopo quasi 2 ore si è verificata una diminuzione del 50% della consistenza. La miscela ha, quindi, una consistenza residua di solo 70%, che ne rende difficile la posa in opera.

Riguardo al ruolo della temperatura nel mantenimento della lavorabilità, si nota che una miscela cementizia confezionata a temperatura ambiente (23°C) mantiene la lavorabilità per tempi più brevi rispetto alla medesima miscela cementizia mantenuta a 5°C subito dopo il confezionamento (Figura 6.5). Dopo 2 ore la consistenza della miscela mantenuta a 23°C è praticamente nulla e la miscela non scorre più per effetto del suo peso.

Si può notare che la miscela conservata a 23°C partendo da una consistenza pari a 125% al momento dell'aggiunta del cemento, raggiunge il valore di 100% solo dopo 30 minuti, mentre quella conservata a 5°C impiega quasi il doppio del tempo per raggiungere il medesimo valore di consistenza.

L'aumento del dosaggio di cemento, in impasti con lo stesso rapporto a/t , fa sì che si riduca l'intervallo di tempo all'interno del quale la miscela possa ritenersi colabile.

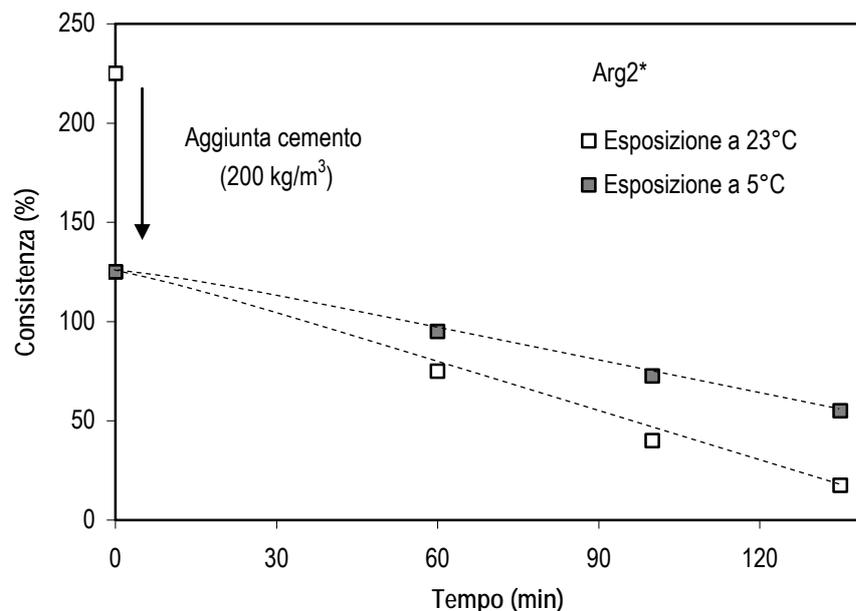


Figura 6.5 – Andamento della consistenza nel tempo della stessa miscela a differenti temperature.

Considerando i risultati riportati nella Figura 6.6, relativi a miscele cementizie confezionate con differenti dosaggi di cemento, rapporti a/t pari a 1 e mantenute a 23°C, si osserva che la miscela con 100 kg/m³ di cemento mantiene la consistenza del 100% per circa 60 minuti; all'aumentare del contenuto di cemento, tale consistenza idonea per le iniezioni si perde più rapidamente; infatti, la miscela con 200 kg/m³ di cemento è iniettabile solo per i primi 30 minuti.

Per cercare di prolungare i tempi si potrebbe aumentare il contenuto d'acqua, incrementando così la consistenza iniziale, a scapito comunque della resistenza meccanica.

Se i solfati intervengono nella diminuzione della consistenza al momento dell'aggiunta del cemento favorendo tale fenomeno, non sembrano tuttavia influire nella perdita di lavorabilità nel tempo. La Figura 6.7 mostra infatti che l'andamento nel tempo della consistenza è sostanzialmente simile, soprattutto a tempi lunghi, sia per le miscele confezionate con acqua priva di solfati, sia per quelle realizzate con acqua solfatica, a parità di dosaggio di cemento e temperatura.

Il loro andamento è evidenziato sia per miscele con dosaggi di cemento pari a 150 kg/m³ sia per dosaggi maggiori (250 kg/m³) e in entrambi i casi non si notano significative differenze.

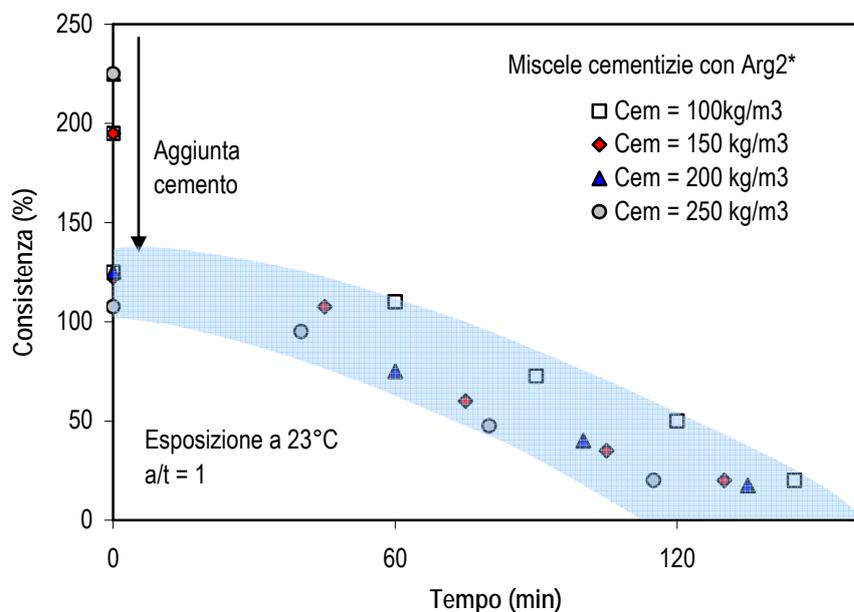


Figura 6.6 – Andamento della consistenza nel tempo per miscele confezionate con Arg2* a parità di a/t e temperatura, con differenti dosaggi di cemento.

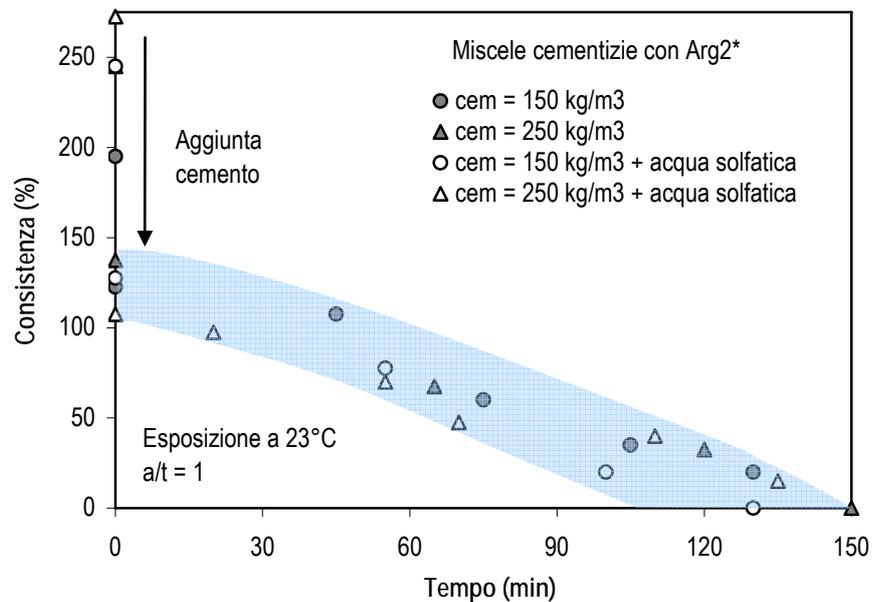


Figura 6.7 – Andamento della consistenza nel tempo di miscele con diverso tipo di acqua d'impasto, a diversi dosaggi di cemento.

6.3 Resistenza meccanica

Come si è visto per la fluidità ed il mantenimento della stessa nel tempo, svariati parametri di composizione intervengono a modificare anche le caratteristiche meccaniche della miscela (rapporto a/c , tipo di terreno, dosaggio di cemento); inoltre, le condizioni ambientali influiscono sulle resistenze meccaniche, alcune in misura maggiore, altre meno (solfati nell'acqua d'impasto, solfati nell'acqua in cui viene gettata la miscela).

I risultati che si sono ottenuti nell'attività di laboratorio vanno comunque relazionati con quanto visto in precedenza (§6.1, §6.2) a proposito delle altre caratteristiche legate a questi materiali, e con le condizioni ambientali presenti in situazioni reali. Le proprietà meccaniche quindi non sono da considerare come argomento separato dal resto dello studio, ma intervengono, con le loro esigenze, a creare un compromesso insieme agli altri requisiti.

6.3.1 Parametri di composizione

Un parametro che influenza la resistenza meccanica a compressione è il rapporto a/c . Si focalizza l'attenzione su miscele in cui si è mantenuto lo stesso tipo di terreno in modo da poter analizzare l'influenza del rapporto a/c nei confronti della resistenza. Si è visto, infatti, che l'andamento della resistenza a compressione tende a valori più bassi con l'aumentare del rapporto a/c . La Figura 6.8 riporta l'andamento della resistenza a compressione in funzione

del rapporto a/c a parità di tipo di terreno (*Arg1*) e dosaggio di cemento (circa 150 kg/m^3). Risulta che le miscele sono molto più resistenti a rapporti a/c più bassi. Infatti, come mostra la Figura 6.9, la miscela M87-3 sviluppa resistenze a compressione maggiori già a 7 giorni di stagionatura ($a/c = 3.65$; $R_c = 0.57 \text{ MPa}$) rispetto alla miscela M90-7 ($R_c = 0.35 \text{ MPa}$), che possiede un rapporto a/c più alto (4.30). Inoltre si nota come, al procedere della stagionatura si ha un incremento della resistenza meccanica.

Si nota il medesimo comportamento considerando un altro tipo di terreno (*Arg2*) ed il medesimo dosaggio di cemento (circa 150 kg/m^3). Si osserva in Figura 5.4, ad per esempio, che la miscela M91-11 con un rapporto a/c pari a 4.53 sviluppa 1.3 MPa a 90 giorni di stagionatura, mentre la miscela M95-3 avendo con rapporto a/c pari a 4.95 raggiunge alla medesima stagionatura solo una resistenza di 0.7 MPa.

Variazioni di resistenza meccanica a compressione, in funzione del rapporto a/c , si possono riscontrare per miscele caratterizzate da un rapporto a/t costante, differenti dosaggi di cemento. Pure in questo caso, la resistenza diminuisce al crescere del rapporto a/c . Si nota nella Figura 6.9 che, mantenendo il rapporto $a/t = 1$, le resistenze sono superiori al diminuire del rapporto: si passa da 1.6 MPa sviluppati a 7 giorni di stagionatura per miscele confezionate con acqua potabile e con $a/c = 2.7$ a 0.3 MPa raggiunti da miscele con rapporti $a/c = 7$, a parità di stagionatura.

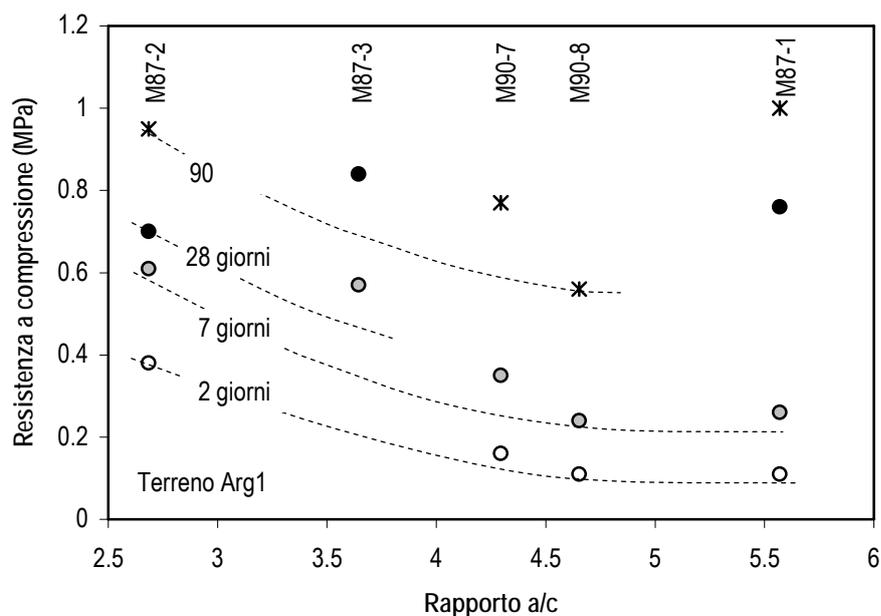


Figura 6.8 – Andamento della resistenza a compressione delle miscele cementizie, confezionate con terreno *Arg1*, in funzione del rapporto acqua/cemento (a/c) (a diversi tempi di stagionatura: 2, 7, 28 e 90 giorni). Le linee indicano i valori minimi ottenuti.

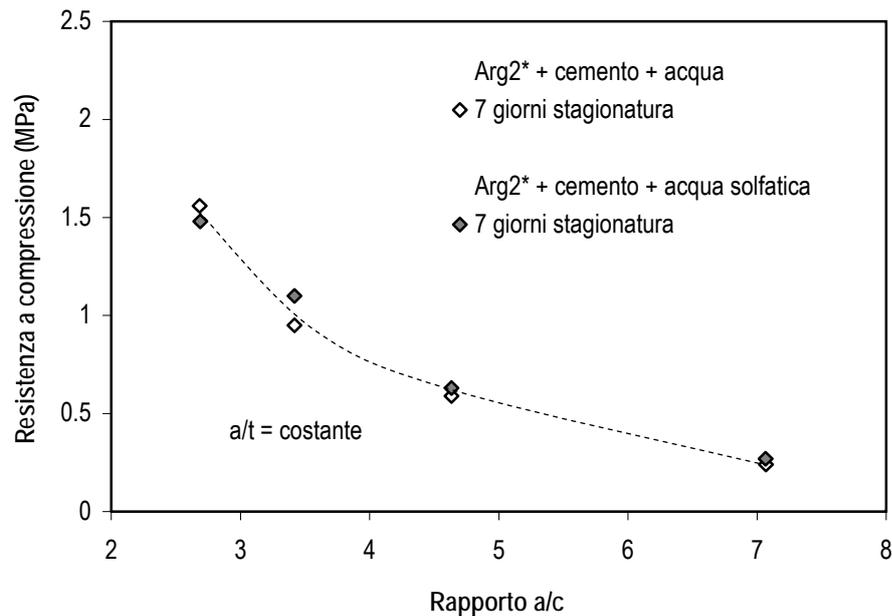


Figura 6.9 - Andamento della resistenza a compressione delle miscele cementizie, confezionate con terreno *Arg2** e $a/t = 1$, con e senza acqua solfatica, in funzione del rapporto acqua/cemento (a/c).

Dalla stessa Figura 6.9 si può vedere che le differenze di resistenza tra miscele cementizie confezionate con acqua potabile rispetto a quelle con solfati nell'acqua d'impasto, sono esigue e da attribuirsi alla variabilità dei risultati piuttosto che a reazioni chimiche derivanti dai solfati.

Il tipo di terreno utilizzato nei getti è un altro parametro che influenza il valore di resistenza a compressione delle miscele. A parità di dosaggio di cemento (150 kg/m^3), miscele confezionate con terreni come *Arg2** ed *Arg1* sviluppano resistenze migliori (Figura 6.10) superando 0.6 MPa dopo 28 giorni di stagionatura in ambiente umido (22°C , $\text{UR} = 100\%$); soprattutto le miscele che contengono *Arg2** si sono differenziate dalle altre per elevati valori, attestando la loro resistenza tra 1 e 2.7 MPa in funzione del dosaggio di cemento. In Figura 6.10 non è, invece, possibile individuare una correlazione tra la resistenza e il dosaggio di cemento. Dal tipo di terreno non dipendono, quindi, solo le proprietà reologiche, ma anche la resistenza a compressione. La scelta di un terreno rispetto ad un altro va effettuata sia sulla base di eventuali esigenze di resistenza, ma come si è visto anche rispetto alla fluidità. Per questo si è analizzato anche quale sia il suo contributo in termini di resistenza senza perdere di vista il fattore consistenza.

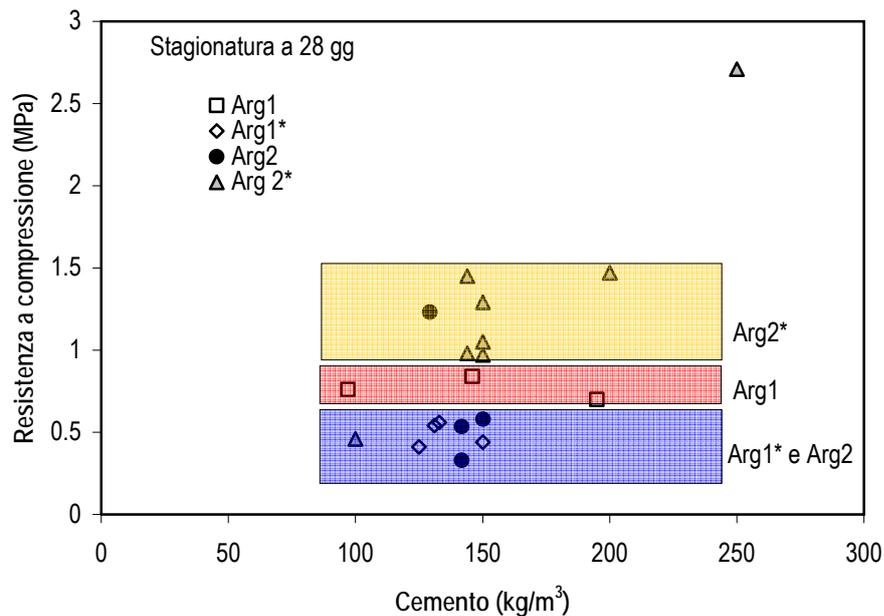


Figura 6.10 – Valori medi di resistenza a compressione a 28 giorni in funzione del dosaggio di cemento, suddivisi per tipo di terreno.

In relazione alla possibilità di impiego di terreni diversi, pur di rendere confrontabili le distribuzioni granulometriche (ad esempio con l'utilizzo di sabbia) e conseguentemente anche le proprietà reologiche, si è valutata l'influenza sulle prestazioni meccaniche derivante dall'aggiunta di aggregati all'impasto. Tale aggiunta, pur diminuendo il rapporto acqua/terreno necessario ad ottenere consistenze adeguate per l'iniezione, e di conseguenza il rapporto a/c , ha portato una diminuzione della resistenza meccanica della miscela (Figura 6.11). Ad esempio, la Figura 6.11 riporta l'andamento nel tempo delle resistenze a compressione della miscela cementizia M98-2 confezionata con terreno *Arg2* e della miscela cementizia M96-8 con medesimo dosaggio di cemento (150 kg/m^3), confezionata combinando il terreno *Arg2* con aggregato frantumato al fine di conferire una distribuzione granulometrica confrontabile al terreno *Arg1**. Tale miscela, pur avendo rapporti a/t e a/c minori, sviluppa resistenze minori della miscela confezionata con lo stesso terreno, ma senza aggregati. Questo risultato mostra come la modifica della composizione della miscela possa aver effetti complessi sulle diverse proprietà del materiale fresco o indurito.

6.3.2 Condizioni ambientali

Oltre al materiale ed al rapporto a/c che caratterizzano le varie miscele, la resistenza è influenzata dalle condizioni ambientali in cui il materiale si trova esposto.

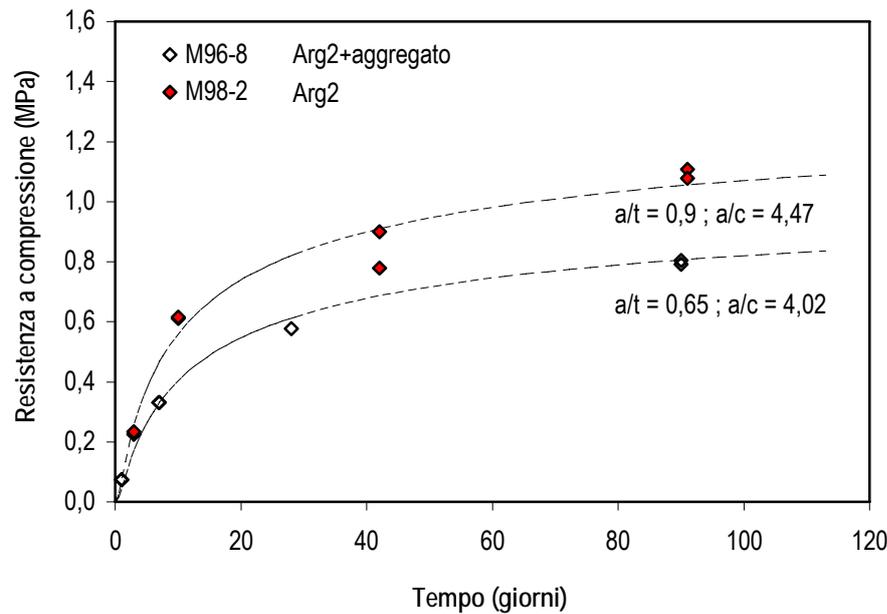


Figura 6.11 – Andamento delle resistenze a compressione in funzione del tempo di miscele cementizie che contengono aggregati confrontate rispetto a quelle con solo terreno Arg2.

In laboratorio sono state create delle condizioni per valutare l'influenza della temperatura, dell'umidità relativa e l'effetto di agenti aggressivi come i solfati sulle proprietà delle miscele e in particolare sulla resistenza meccanica.

Alcune delle miscele confezionate in laboratorio sono state gettate sott'acqua e si è voluto confrontare la resistenza meccanica della miscela in queste condizioni rispetto a quella della medesima miscela confezionata in casseri e stagionata in ambiente umido. Le miscele gettate in acqua sono state carotate a diversi tempi di stagionatura; si è notato che, in tutte le carote, la parte a diretto contatto con l'acqua si presentava degradata per alcuni millimetri di spessore, mentre il resto era consolidato. La Figura 6.12 riporta i valori di resistenza ottenuti per miscele confezionate con differenti terreni, gettate sia sott'acqua sia in condizioni standard. Si osserva che la resistenza delle carote prelevate dalle miscele gettate sia in acqua è sempre inferiore. Come si può vedere dalla Figura 6.12, si hanno diminuzioni di resistenza fra la miscela in acqua e quella a secco più evidenti per quelle composte da terreni caratterizzati da particelle di dimensioni maggiori (Figura 6.1); infatti, la miscela M97-6 composta da *Arg1** (terreno con maggiore contenuto percentuale di sabbia), sviluppa a secco resistenze maggiori di 2.6 volte rispetto al getto effettuato in acqua. Diversamente la miscela M95-3, realizzata con *Arg2* (terreno con maggior percentuale di fini) sviluppa a secco resistenze maggiori solo di 1.3 volte rispetto al getto effettuato in acqua. Modificando la composizione

del terreno *Arg2* mediante l'aggiunta di sabbia, per rendere la sua distribuzione granulometrica simile a *Arg1* (distribuzione intermedia tra i due casi visti in precedenza), si ottengono variazioni di resistenza per il getto a secco di 2.1 volte maggiori rispetto alla condizioni di getto in acqua, in accordo con quanto affermato. La minore diminuzione di resistenza per le miscele più ricche di limo e argilla può essere attribuita alla maggiore coesione fornita da questi due costituenti e quindi alla minore tendenza dell'impasto a mescolarsi con l'acqua con cui viene a contatto.

Un altro esempio di come le condizioni di esposizione influiscono sulle resistenze è dato dalle prove effettuate su alcune miscele (§5.8) accomunate dal fatto di essere state confezionate con lo stesso tipo di terreno (*Arg2**) e di avere lo stesso rapporto *a/t* pari a 1. Esse si differenziano per il diverso dosaggio di cemento (conseguentemente anche da rapporti *a/c* differenti) e dalla presenza o meno di acqua solfatica nell'impasto.

Considerando le miscele confezionate con acqua potabile (Figura 6.12), si nota come, dopo 21 giorni di immersione in acqua potabile (a 5°C), la resistenza non sia praticamente cambiata, indifferentemente dal rapporto *a/c*, rispetto alle precedenti condizioni (7 giorni in ambiente umido, con 22°C) (Figura 6.13). I provini immersi in acqua solfatica (per 21 giorni alla temperatura di 5°C) rispetto a quelli precedentemente descritti, hanno subito solo leggeri aumenti di resistenza meccanica.

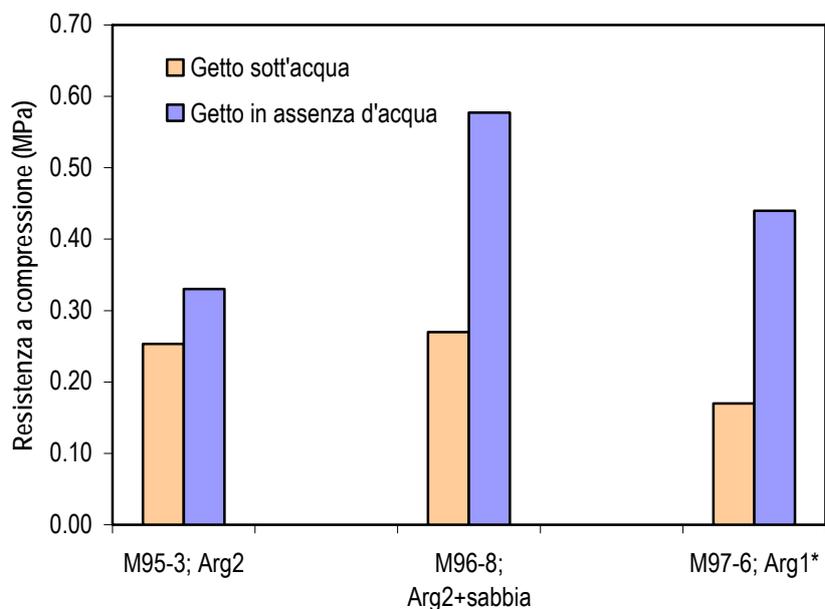


Figura 6.12 – Confronto tra le resistenze meccaniche a compressione dopo 28 giorni di stagionatura di miscele gettate sott'acqua e in condizioni standard.

Questi aumenti sono più marcati per quelle miscele che possiedono rapporti a/c minori; ad esempio, la miscela con rapporto a/c pari a 2.68 è passata da 1.56 MPa dopo 7 giorni di stagionatura in ambiente umido, a 1.82 MPa dopo 21 ulteriori giorni di immersione in acqua solfatica; con l'aumentare del rapporto a/c delle miscele, la differenza di resistenza appare trascurabile (Figura 6.13). L'acqua solfatica sembra, quindi, essere intervenuta a vantaggio di un leggero aumento della resistenza meccanica. Le miscele in condizioni asciutte a 5°C hanno aumentato notevolmente la loro resistenza meccanica a compressione rispetto al valore precedentemente misurato sulla miscela saturata. Anche in questo caso, le miscele con rapporti a/c minori hanno avuto gli aumenti maggiori di resistenza; si passa da 1.56 MPa a 2.71 MPa per la miscela con rapporto a/c pari a 2.68, mentre, per la miscela con rapporti a/c di 7.08, l'aumento è stato solo di 0.2 MPa (Figura 6.12). Questi aumenti sono peraltro da attribuire principalmente all'asciugatura del materiale. Utilizzando acqua contenente solfati per il confezionamento delle miscele, si nota come questa tendenza scompaia o addirittura si inverte (Figura 6.14). In questo caso i provini immersi possiedono la medesima resistenza (a parità di rapporto a/c , indifferentemente dal tipo di acqua utilizzata per l'immersione). Anche per i provini confezionati con acqua solfatica, si nota che quelli che sviluppano resistenze maggiori rispetto a 7 giorni di stagionatura, sono i provini conservati in condizioni asciutte (21 giorni di esposizione a a 50% U.R. e 5°C).

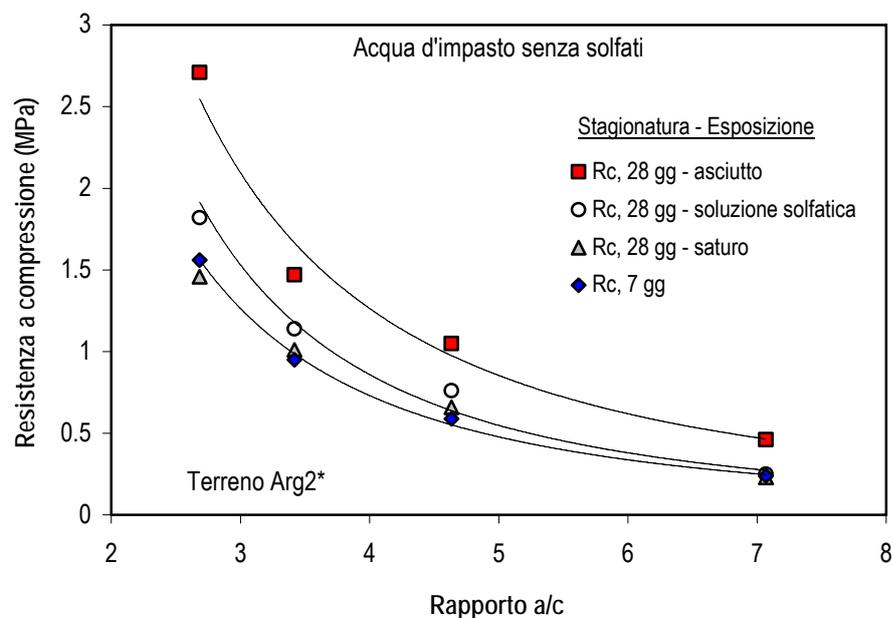


Figura 6.13 - Andamento della resistenza in funzione del rapporto a/c delle miscele cementizie realizzate con acqua potabile, in diverse condizioni d'esposizione e a diversi tempi di stagionatura.

Per questi provini, si hanno aumenti superiori per le miscele realizzate con rapporti a/c minori; con rapporti a/c di 2.68 la resistenza aumenta di 0.70 MPa, mentre con rapporti a/c pari a 7.07 l'aumento è solamente di 0.2 MPa.

Confrontando inoltre le due differenti modalità di confezionamento, si nota come, le curve di resistenza a compressione per i due casi appena citati (Figura 6.13 e Figura 6.14), siano confrontabili, mettendo in risalto che l'acqua d'impasto solfatica, in sostanza, non influisce sulle prestazioni meccaniche delle miscele.

L'acqua solfatica, quindi, sembra esser poco influente sulla resistenza meccanica a compressione, se presente, allo stesso tempo, nell'impasto delle miscele e nell'ambiente di immersione.

In accordo con quanto fino ad ora esposto, si nota come, dal confronto fra provini stagionati in condizioni sature, emerge, come mostrano le Figure 5.14 e 5.16, che vi è una minima variabilità sull'incremento della massa di prismi confezionati con acqua solfatica e non.

Confrontando, infine, i provini confezionati con acqua potabile con quelli realizzati con acqua solfatica, a parità di condizioni di esposizione e stagionatura, si nota che la presenza di solfati interviene poco sulle prestazioni meccaniche delle miscele (Tabelle 5.11 e 5.12 e Figura 6.9).

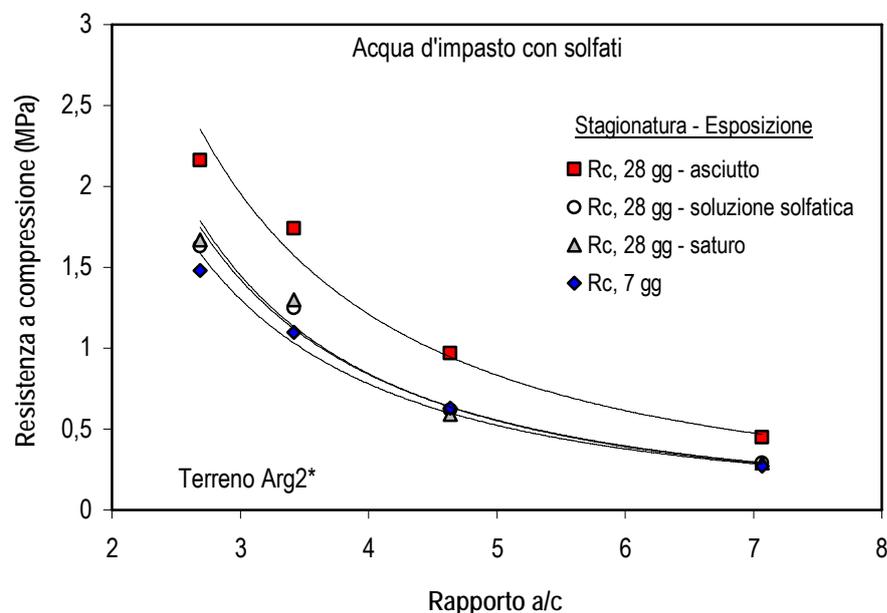


Figura 6.14 - Andamento della resistenza in funzione del rapporti a/c delle miscele cementizie realizzate con acqua solfatica, in diverse condizioni d'esposizione ed a diversi tempi di stagionatura.

7. PROCEDURA DI GETTO E PROPORZIONAMENTO DELLE MISCELE

La soluzione individuata per la messa in sicurezza della ex cava Carale in località S. Brigida è il riempimento dei vuoti delle gallerie, in modo da fornire maggiore stabilità al versante sovrastante nonché bloccare il meccanismo di dissoluzione dei gessi, riducendo notevolmente i rischi di collasso della galleria.

L'unica procedura praticabile è il riempimento tramite iniezioni dall'alto con un materiale cementizio fluido. Tale soluzione si presenta comunque complessa a causa delle particolari condizioni al contorno riguardanti le cave: l'allagamento totale o parziale della maggior parte delle gallerie che presentano sul fondo depositi fangosi derivanti dalla dissoluzione del gesso e dell'anidrite di cui sono costituite, la loro inaccessibilità e un ambiente reso aggressivo dalla presenza di acque solfatiche.

Le prove sperimentali effettuate in laboratorio hanno consentito di definire una procedura di riempimento con una miscela a base di cemento e terreno adatta a poter essere utilizzata per il riempimento delle gallerie di S. Brigida.

Dai risultati di tali prove e dalla conseguente discussione si può concludere che la miscela di riempimento deve essere confezionata dapprima fluidificando il terreno con acqua, mediante il processo di manipolazione e di inumidimento del terreno sino renderlo malleabile e di seguito fluido, e, successivamente, aggiungendo cemento. Il proporzionamento di tali costituenti deve essere comunque effettuato considerando i diversi requisiti che la miscela deve avere per tale tipo di applicazione:

- proprietà di lavorabilità e colabilità in grado di favorire lo scorrimento della miscela anche all'interno delle cavità, consentendone il completo riempimento;
- mantenimento nel tempo della lavorabilità al fine di conservare, per il maggiore tempo possibile, le proprietà di fluidità e consentire la ripresa del riempimento;
- prestazioni meccaniche tali da permettere il consolidamento della miscela anche a contatto con acque contenenti solfati.

La Figura 7.1 riporta in maniera schematica la procedura di getto e la distribuzione della miscela iniettata nella galleria, partendo dal foro A. Le tubazioni inserite nei fori per l'iniezione devono poter essere calate fin quasi sul fondo della galleria per far in modo che la miscela iniettata fuoriesca dalla tubazione muovendo se stessa, a partire dal fondo della galleria, e di conseguenza anche l'acqua eventualmente presente in esse; così facendo

solamente la porzione superficiale di miscela iniettata viene a contatto con l'acqua (modificando il suo rapporto acqua/cemento, a/c) mentre la successiva rimane protetta e non modifica la sua composizione.

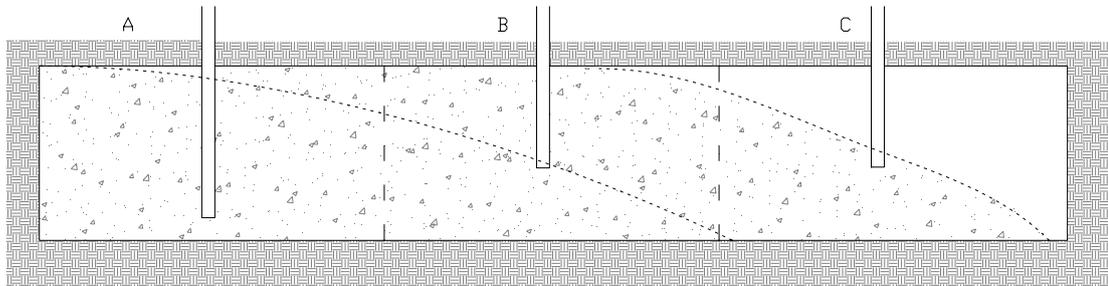


Figura 7.1 - Schema di distribuzione della miscela gettata all'interno delle gallerie attraverso diversi fori di iniezione.

Tenendo conto delle condizioni al contorno che caratterizzano il caso di studio e dei requisiti prestazionali richiesti e dei risultati discussi nei paragrafi precedenti, si può considerare ai fini del confezionamento delle miscele la seguente procedura:

- 1) miscelazione del terreno con acqua sino a raggiungere una consistenza superiore a 180% misurata con la tavola a scosse e comunque inferiore a 270% per evitare fenomeni di bleeding;
 - per terreni con una significativa frazione sabbiosa è necessario un rapporto a/t compreso fra 0.5 e 0.8;
 - per terreni prevalentemente argillosi e limosi sarebbe necessario un rapporto superiore che tuttavia ridurrebbe la resistenza della miscela ottenuta dopo l'aggiunta di cemento; si raccomanda, quindi, di aggiungere una porzione di sabbia sufficiente per raggiungere una distribuzione granulometrica paragonabile a quella del terreno $Arg1^*$ (Figura 5.7);
- 2) alla miscela di terreno fluidificato si dovrà aggiungere almeno 150 kg/m^3 di cemento in modo tale da ottenere un rapporto a/c compreso fra 3 e 4. Sia per terreni prevalentemente argillosi e limosi sia per quelli sabbiosi si dovrebbe garantire una resistenza a compressione di almeno 1 MPa;
- 3) verifica della fluidità della miscela di terreno fluidificato dopo l'aggiunta di cemento attraverso la prova dell'imbutto (§3.3.3) per verificare che il tempo di svuotamento sia



- \leq a 2 secondi; nel caso in cui il tempo di svuotamento fosse superiore, è necessario aggiungere acqua e conseguentemente cemento per mantenere costante il rapporto a/c ;
- 4) confezionamento giornaliero di almeno due provini cubici di miscela gettata per verificare le prestazioni meccaniche e, se necessario, si dovrà modificare la ricetta per raggiungere la resistenza richiesta (ad esempio si potrà verificare che la resistenza a compressione misurata in condizioni standard dopo 3 giorni di stagionatura sia superiore a 0.3 MPa;
 - 5) getto in continuo delle miscele sul fondo della galleria, senza muovere il tubo di colaggio, finché la sua fluidità sarà tale da consentire il riempimento; quando la fluidità non sarà più sufficiente si dovrà passare al foro successivo.

8. PROVE IN CAMPO

Nei mesi di luglio e agosto è stato effettuato un primo intervento pilota con iniezioni che hanno interessato la parte terminale dell'ultimo livello, ovvero la zona più accessibile per la realizzazione delle perforazioni di iniezione e più vicina all'abitato. In questo capitolo si forniscono i risultati di preliminari prove effettuate per valutare la possibilità di realizzare in cantiere miscele cementizie fluide con terreno, aventi caratteristiche di colabilità. Inoltre, si riportano i risultati delle prove di compressione effettuate sui campioni, confezionati con le miscele realizzate in cantiere, forniti al laboratorio CMIC dagli operatori dell'impianto pilota.

8.1 Descrizione dell'intervento

Questo primo intervento, che ha interessato un volume di gallerie di circa 5000 metri cubi, relativamente alla parte terminale dell'ultimo livello (Figura 8.1), ha avuto lo scopo di verificare su scala reale se il tipo di miscela e le modalità di confezionamento e getto, sperimentate in laboratorio, fossero adeguate.

Alle gallerie oggetto di questo intervento preliminare corrisponde superficialmente un'area ampia e pianeggiante che è risultata adatta all'installazione di tutte le attrezzature necessarie al cantiere.

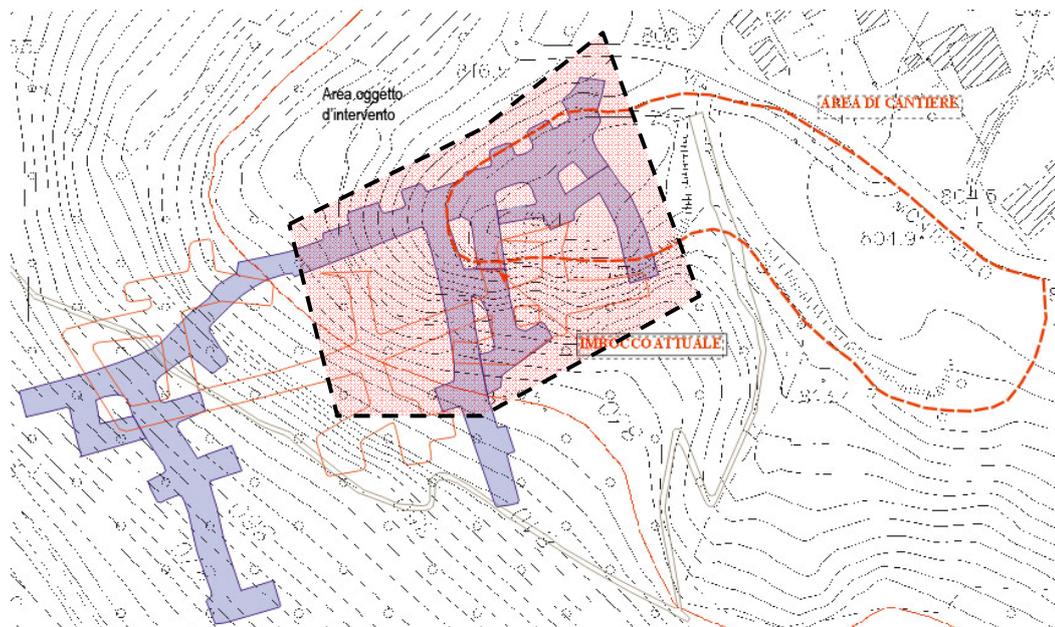


Figura 8.1 - Localizzazione dell'area di intervento del progetto pilota (area tratteggiata) in corrispondenza del quarto livello (indicato graficamente con retino viola) [6].

I progettisti hanno, quindi, ritenuto questo sito il più adatto, per effettuare l'intervento pilota e avviare le operazioni di riempimento, sia dal punto di vista di fruizione degli spazi dedicati al cantiere, sia per il fatto che è posizionato in corrispondenza della parte terminale delle gallerie del livello più basso. Nell'area oggetto dell'intervento pilota, gli operatori del cantiere hanno utilizzato per iniettare la miscela sei fori disposti all'interno di una maglia estesa per circa 10 metri quadrati (Figura 8.2), due di questi (indicati come foro 6 e 4) erano già presenti perchè utilizzati come pozzi per il prelievo d'acqua, mentre gli altri sono stati ottenuti tramite perforazione a distruzione. I fori utilizzati per effettuare le iniezioni dovevano poter raggiungere il livello minerario 4; per questo, a seconda della quota a cui si sono trovati a operare, sono stati realizzati fori con differenti profondità. Visto che l'area in cui è stato effettuato l'intervento a carattere sperimentale non presenta grandi dislivelli, la profondità che i fori hanno raggiunto non supera i 20-25 metri.

8.2 Prima prova in cantiere

Visto che l'operazione di riempimento è influenzata sia dalle caratteristiche della miscela utilizzata, sia, naturalmente, dalla conformazione dei vuoti da riempire, è stata effettuata, in data 14/12/2005, nel cantiere sito nel piazzale della vecchia cava, una preliminare verifica di come una miscela, simile a quelle caratterizzate in laboratorio, poteva comportarsi durante il riempimento. Sono stati effettuati quattro getti utilizzando medesimi materiali miscelati secondo diverse procedure.

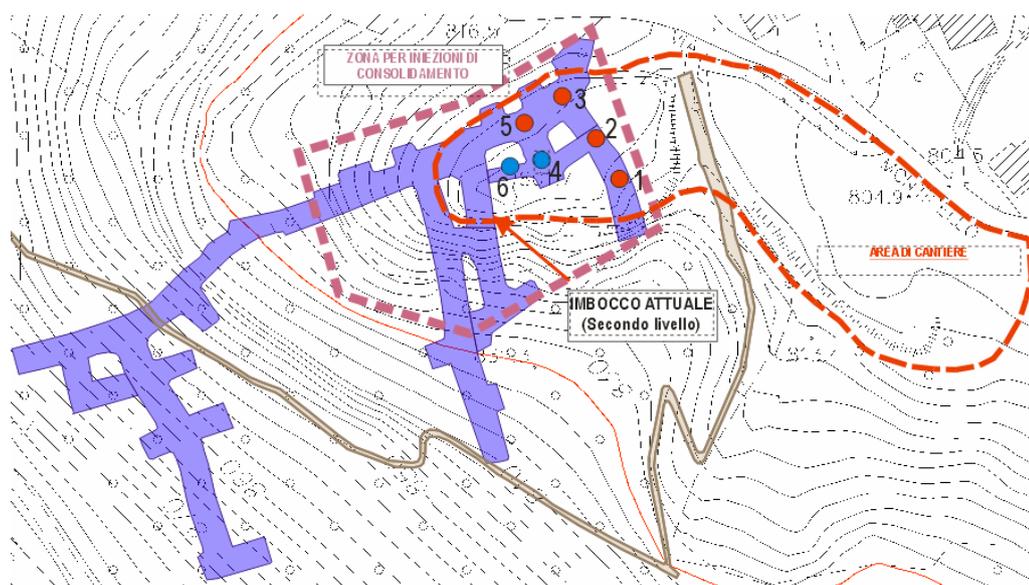


Figura 8.2 - Disposizione dei fori di iniezione, alcuni dei quali già esistenti (in azzurro) altri realizzati nell'ambito del progetto pilota (in rosso) [6].

Il primo getto è stato realizzato dagli operatori di cantiere miscelando contemporaneamente 100 kg di cemento (CEM II B-M (L-S) 32,5R, fornito da Holcim), 450 litri di acqua, e terreno, prelevato sul posto, in quantità tale da confezionare un volume complessivo di miscela corrispondente a quello della benna (circa 1000 litri) nella quale è avvenuta la miscelazione mediante una coclea posizionata trasversalmente (Figura 8.3). La miscela è stata gettata, mediante un tubo flessibile (con diametro pari a circa 200 millimetri) collocato al di sotto della benna, in uno scavo impermeabilizzato e riempito con acqua solfatica (Figura 8.4a) prelevata dal pozzetto presente all'imbocco della galleria. La miscela è apparsa disomogenea (Figura 8.4b), evidenziando scarse proprietà di colabilità a causa della presenza di blocchi di terreno non fluidificati. Successivamente sono stati effettuati altri due getti con un dosaggio di cemento, acqua e terreno confrontabile al precedente; a differenza di quest'ultimo, in entrambi i getti il terreno è stato progressivamente fluidificato con acqua, prima dell'aggiunta di cemento, e, per uno dei due getti, è stata impiegata anche della sabbia, che ha leggermente migliorato la fluidità della miscela, senza comunque raggiungere le consistenze misurate in laboratorio. Dai problemi riscontrati in questi ultimi getti, effettuati comunque seguendo la procedura stabilita con le prove di laboratorio, si è quindi dedotto che il sistema di miscelazione con coclea appare insufficiente per miscelare tali volumi di impasto. In maniera analoga, si è quindi confezionato un ulteriore getto ma di volume complessivo nettamente inferiore, pari a circa 500 litri. La miscela, realizzata con circa 585 kg di terreno, 250 litri di acqua solfatica e 75 kg di cemento, dopo una prolungata miscelazione presenta una lavorabilità nettamente migliore (Figura 3.5). Risolti quindi i problemi di miscelazione, per verificare la lavorabilità della miscela cementizia confezionata è stata effettuata la prova di svuotamento dell'imbutto (Figura 3.6) che ha dato valori mediamente di 2.5 secondi, confrontabili quindi con quelli misurati in laboratorio (Allegato B). Si è quindi colata la miscela in una trincea (Figura 8.6a) preparata per il getto. Dalla Figura 8.6 si può osservare che la miscela iniettata in questo modo, grazie alla sua mobilità, è in grado di spandersi prevalentemente in direzione orizzontale.

8.3 Seconda prova in cantiere

Il 23/06/2006 è stata effettuata una seconda prova in campo con lo scopo di verificare l'impianto di miscelazione che nel frattempo è stato realizzato in cantiere e verificare quindi su scala reale la possibilità di confezionare in campo volumi notevoli di miscela. Con tale

impianto di miscelazione, di cui si riportano in Figura 8.7 due immagini generali riprese da differenti angolazioni, sono state realizzate preliminarmente quattro miscele.



Figura 8.3 – Miscelazione mediante coclea posizionata all'interno della benna.



a)



b)

Figura 8.4 - Prova di riempimento di una trincea riempita con acqua solfatica *a)* impiegando la prima miscela confezionata in cantiere *b)*.

La prima miscela (M1) è stata confezionata dagli operatori di cantiere miscelando 700 litri di acqua solfatica con 1000 litri di terreno, prelevato in sito, per il quale si è misurata in cantiere un'umidità relativa pari a 25%; la stessa misura, ripetuta in laboratorio su un campione del medesimo terreno, ha fornito un valore pari a 29.5%.



Figura 8.5 - Fluidificazione del terreno all'interno della benna.



Figura 8.6 - Prova di riempimento di una trincea per verificare la mobilità della miscela.

Durante la fase di confezionamento si è osservato che il sistema di miscelazione adottato non è in grado di impastare il terreno senza avere notevoli quantità di trattenuto in prossimità della griglia di vagliatura (Figura 8.8), posizionata in corrispondenza della vasca inferiore di contenimento della miscela nell'impianto. Ciò scaturisce da una inefficace preliminare sminuzzatura del terreno; si è, quindi, proceduto a confezionare un'altra miscela (M2). Pensando di favorire la fluidificazione del terreno sono stati impastati contemporaneamente acqua solfatica e terreno in quantitativi di volume superiori (circa 2000 litri) che hanno tuttavia provocato il blocco della lama di acciaio rotante presente nella vasca superiore di impasto.

Per i successivi due getti si è partiti da una sminuzzatura a secco del terreno all'interno della vasca superiore di impasto al fine di favorire il processo di fluidificazione realizzato con progressive aggiunte d'acqua.

In particolare, la terza miscela di terreno fluidificato è stata realizzata con i medesimi quantitativi di acqua e terreno impiegati per la realizzazione della prima miscela (ovvero 700 litri di acqua solfatica e 1000 litri di terreno). Successivamente sono stati aggiunti 250 kg di cemento CEM II B-M (L-P) 32,5R, prodotto da Holcim. Pur cercando di riprodurre, in termini di dosaggi e rapporti tra i costituenti, quelli delle miscele studiate in laboratorio ed indicate come le più adatte all'iniezione ed al riempimento, purtroppo anche per questa miscela non è stato possibile evitare completamente gli scarti di terreno fluidificato durante la fase di vagliatura precedente all'aggiunta di cemento e, quindi, i valori dei dosaggi e dei rapporti previsti (Tabella 8.1) per tale miscela cementizia con terreno fluidificato (indicata in Tabella 8.1 con la sigla M3) non corrispondono esattamente a quelli della miscela realmente confezionata, vista l'impossibilità di un corretto controllo della quantità di costituenti in essa presente (a causa dell'assenza di un sistema per la pesatura delle materie prime).

In termini di lavorabilità, per la terza miscela di terreno fluidificato è stata misurata attraverso la tavola a scosse (Figura 8.9), un adeguato valore di consistenza, pari al 170%. Anche dopo l'aggiunta di cemento la miscela si presenta ancora fluida e omogenea (Figura 8.10). Sottoposta alla prova di spandimento, mediante tavola a scosse, ha evidenziato un valore di consistenza pari a 148%, inferiore a quella della miscela di terreno fluidificata ma comunque confrontabile con quelli misurati per le miscele cementizie confezionate in laboratorio. A conferma dell'analogia con tali miscele, la prova di colabilità con imbuto, a cui è stata sottoposta la miscela cementizia M3, ha fornito valori di tempo svuotamento pari a 1.4 secondi.



Figura 8.7 – Visione generale dell'impianto di produzione della miscela in cantiere.



Figura 8.8 – Agglomerati grossolani di materiale trattenuti in prossimità della griglia di vagliatura posta prima della camera di aggiunta del cemento.

Tabella 8.1 – Composizione delle miscele (M1, M2, M3 e M4) realizzate in cantiere in data 23/06/06.

<i>Sigla della miscela</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>
Tipo di miscela	Terreno fluidificato	Terreno fluidificato	Cementizia con terreno fluidificato	Cementizia con terreno fluidificato
Terreno umido (litri)	1000	2000	1000	500
Acqua solfatica (litri)	700	2000	700	350
CEMII B-M (L-P) 32,5R (kg)	-	-	250	125
Volume totale (litri)	1700	4000	1781	890
Terreno secco (kg/m ³)	884	751	844	844
Acqua solfatica (kg/m ³)	673	722	642	642
CEM II B-M (L-P) 32,5R (kg/m ³)	-	-	140	140
rapporto acqua/terreno (<i>a/t</i>)	0.76	0.96	0.76	0.76
rapporto acqua/cemento (<i>a/c</i>)	-	-	4.57	4.57



Figura 8.9 - Misura della consistenza della terza miscela di terreno fluidificata.

Inoltre, per verificare che le proprietà reologiche fossero compatibili con le esigenze di cantiere, si è colata la miscela mediante una pompa collegata ad un tubo flessibile di 200 millimetri di diametro, in uno scavo preparato per il getto, impermeabilizzato con un telo di plastica e riempito precedentemente con acqua solfatica (Figura 8.11a); in tal modo si è potuto controllare anche il comportamento della miscela in presenza di acqua (Figura 8.11b). Per verificare la riproducibilità del getto è stata confezionata una quarta miscela cementizia (M4). Rispetto alla miscela M3, si sono impiegate quantità dimezzate di materiale, ovvero 125 kg di cemento, 350 litri di acqua solfatica e circa 500 litri di terreno, seguendo la procedura precedente e verificandone la lavorabilità con la tavola a scosse, la quale ha fornito un valore di consistenza uguale a quella della miscela M3 (148%); inoltre si sono effettuate prove di svuotamento dell'imbuto, che hanno fornito valori minori di 2 secondi (pari a 1.40 secondi).



Figura 8.10 - Aspetto della miscela cementizia M3 confezionata in cantiere.



Figura 8.11 - Getto in acqua della terza miscela cementizia *a)* realizzata in cantiere e gettata dall'alto *b)*.

Il confezionamento di un volume inferiore di impasto, a parità di modalità di miscelazione, ha evidenziato una maggior efficacia del mezzo di miscelazione e ridotto gli scarti di terreno non fluidificato.

Con le miscele cementizie M3 e M4 si sono confezionati cubetti di lato pari a 15 centimetri (Figura 8.12) per valutarne le caratteristiche allo stato indurito, in termini di resistenza a compressione e densità.

Le prove di resistenza a compressione sono state effettuate sia su alcuni provini cubici (Figura 8.13) sia su carote ottenute mediante carotaggio da uno dei provini cubici (Figura 8.14). In Tabella 8.2 si riportano i valori di densità e resistenza a compressione misurati dopo 14 e 26 giorni di stagionatura umida; inoltre sono riportate le resistenze misurate sulle carote prelevate dal provino cubico.



Figura 8.12 - Confezionamento di provini cubici con la miscela cementizia M4.

I provini cubici realizzati con le miscele M3 e M4 indurite presentavano densità rispettivamente di 1454 kg/m^3 e 1502 kg/m^3 dopo 14 giorni di stagionatura. Densità simili si sono riscontrate anche per gli altri provini dopo 26 giorni di stagionatura; tali valori sono comunque inferiori a quelli riscontrati nelle miscele confezionate in laboratorio, che si aggiravano intorno a oltre 1600 kg/m^3 . I provini cubici presentano resistenze inferiori del 50% rispetto alle miscele di simile composizione realizzate in laboratorio, con analoghi dosaggi; infatti si sono ottenute, per i provini realizzati in campo, resistenze medie di 0.47 MPa dopo 26 giorni di stagionatura (Tabella 8.2). Per un cubo (M4-2) sono state realizzate anche delle carote (Figura 8.14), che sono state a loro volta compresse; per esse si è ottenuto, convertendo la resistenza misurata su carota in resistenza cubica (§3.3.4), un valore medio pari a 0.54 MPa, vale a dire solo leggermente superiore a quello misurato sui provini cubici. Per confrontare la microstruttura del materiale in opera rispetto a quella del materiale confezionato in laboratorio, sono state effettuate osservazioni al microscopio elettronico a scansione su un campione della miscela M3 dopo 3 giorni di stagionatura a umido. La Figura 8.15 si riferisce alle osservazioni effettuate in corrispondenza della superficie di rottura; si riescono a vedere in maniera ben distinta particelle ricoperte, solo in parte (a causa della breve stagionatura), dai prodotti di idratazione. In corrispondenza della zona osservata è stata effettuata un'analisi EDS che in effetti mostra in prevalenza i costituenti tipici (Si, Al, O e Ca) di una matrice cementizia nella quale sono disperse particelle di terreno che potrebbero giustificare la presenza anche di altri elementi chimici come Ferro (Fe) e potassio (K) (Figura 8.15). Un ingrandimento di tale zona mostra meglio la presenza generalizzata dei prodotti di idratazione (Figura 8.17).



Figura 8.13 - Provino cubico sottoposto alla prova di resistenza a compressione *a)* sino a rottura *b)*.



Figura 8.14 - Carotaggio di un provino cubico *a)* da cui sono state ricavate carote da sottoporre a prova di compressione *b)*.

Tabella 8.2 - Valori di resistenza meccanica a compressione e di densità misurati su provini realizzati con la terza e quarta miscela realizzate in cantiere.

<i>Sigla provino</i>	<i>Stagionatura (giorni)</i>	<i>Massa (kg)</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>R_c (MPa)</i>
M3-1	14	4.906	1454	0.11
M4-4	14	5.04	1493	0.30
M4-5	14	5.102	1512	0.40
M4-1	26	5.056	1498	0.47
M4-3	26	5.022	1488	0.47
M4-2, carota 1	26	0.221	-	0.59
M4-2, carota 2	26	0.216	-	0.53
M4-2, carota 3	26	0.216	-	0.50

Sono state effettuate in un'altra zona, a diversi ingrandimenti, altre osservazioni (Figura 8.18 e 8.19). Si nota come non vi siano sostanziali differenze nel campione; la microstruttura appare omogenea e confrontabile con quella documentata osservando campioni delle miscele confezionate in laboratorio (§ 5.85).

I risultati delle prove effettuate in campo hanno evidenziato la possibilità di confezionare una miscela colabile pur di rendere il sistema di produzione più efficiente in modo tale da poter effettuare una adeguata fluidificazione del terreno con acqua. Di conseguenza successivamente sono state effettuate varie modifiche all'impianto di produzione, ad esempio, quella che ha previsto la creazione di una estesa trincea nel terreno, in prossimità dell'impianto, in cui due escavatori (Figura 8.20*a*) sminuzzavano e fluidificavano il terreno in modo da ottenere un materiale omogeneo di consistenza adeguata per i successivi trattamenti (Figura 8.20*b*).

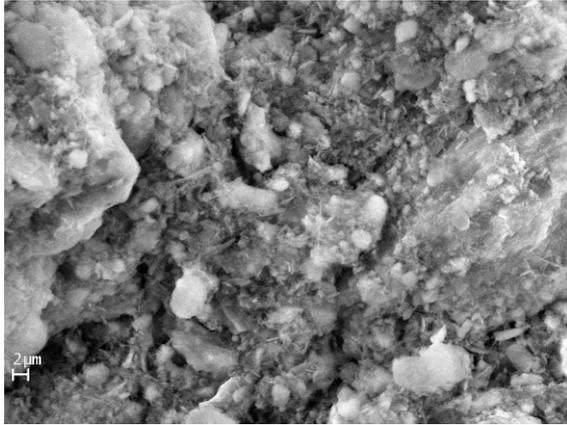


Figura 8.15 - Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M3.

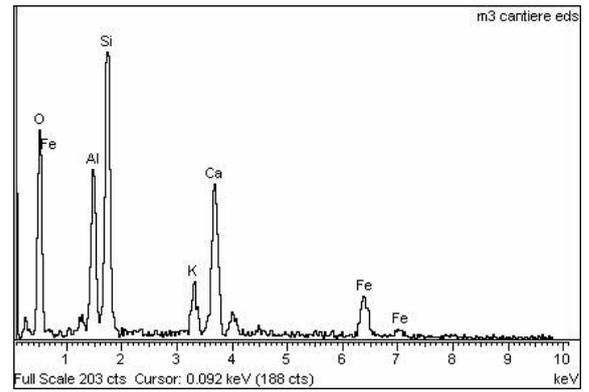


Figura 8.16 - Analisi EDS generalizzata relativa alla zona di Figura 8.15.

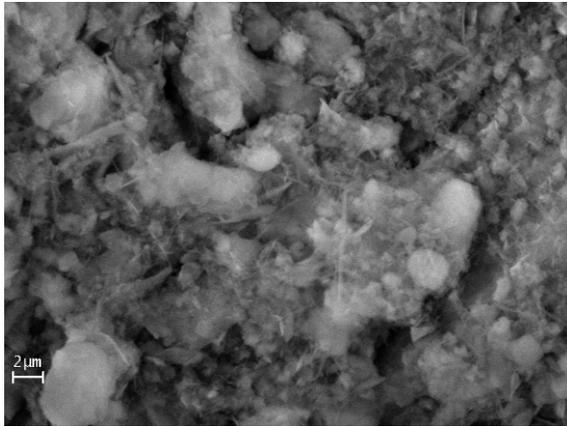


Figura 8.17 - Ingrandimento della zona centrale di Figura 8.15.

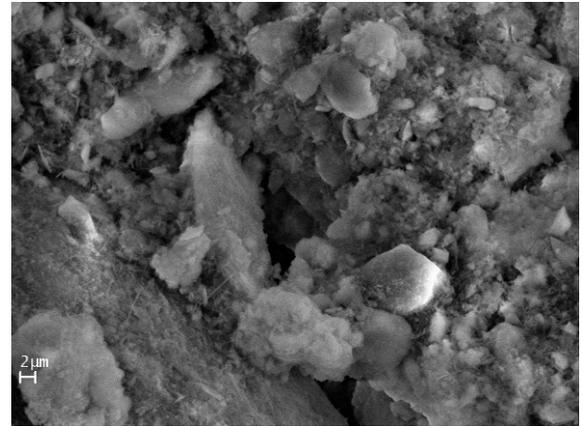


Figura 8.18 - Micrografia ESEM della superficie di frattura del campione M3.

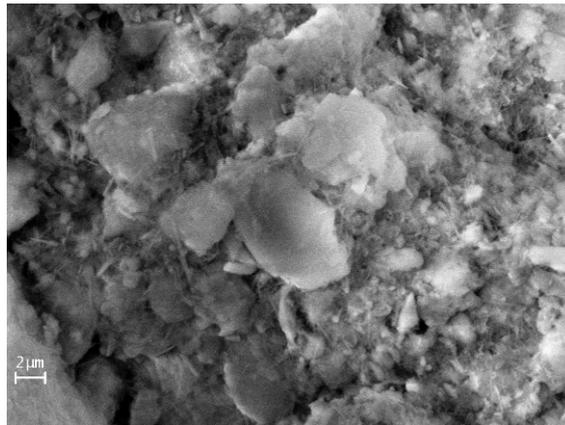


Figura 8.19 - Dettaglio della parte superiore della Figura 8.18.



Figura 8.20 - Escavatori *a)* per il rimescolamento del terreno con acqua sino ad ottenerne una consistenza fluida *b)*.

8.4 Verifica della resistenza a compressione

In concomitanza alle iniezioni per il riempimento dell'area interessata dal progetto pilota, iniziate nel mese di luglio e proseguite sino in agosto, l'impresa ha provveduto a conservare, in cubettiere di polistirolo, campioni delle miscele confezionate in differenti giornate, e a inviarli al laboratorio di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta". Alcuni campioni sono stati stagionati nelle cubettiere chiuse, mentre altri campioni sono stati ricoperti con uno strato di acqua per simulare il contatto con l'acqua delle gallerie. I campioni di miscele sono stati carotati, a differenti tempi di stagionatura, in modo da ottenere provini cilindrici da sottoporre a misure di densità e resistenza a compressione. Nei paragrafi che seguono si riportano i risultati ottenuti dalle prove relative a campioni confezionati rispettivamente con le miscele di luglio e agosto 2006.

8.4.1 Miscele confezionate nel luglio 2006

Le Figure 8.21 e 8.22 si riferiscono ad alcune carote ottenute, mediante il carotaggio, di campioni di miscele confezionate in date diverse. L'osservazione macroscopica delle carote evidenzia una certa variabilità nel terreno impiegato nel confezionamento delle miscele. In particolare, è evidente che le miscele confezionate il 24 e il 25 luglio 2006 probabilmente presentavano dell'aggregato più grossolano, diversamente da quanto emerge osservando le carote relative alle iniezioni effettuate il 21 e 26 luglio.

La Tabella 8.3 riporta i risultati in termini di densità e resistenza a compressione delle carote ricavate in laboratorio dai provini confezionati con le miscele iniettate e stagionati per circa

due settimane. Per ogni carota si è indicata una sigla e il tipo di stagionatura che ha subito (a contatto con acqua o umida). Inoltre, sono stati indicati il valore di resistenza a compressione misurata su carota e quello ricavato convertendola in resistenza su cubo (§3.3.4). L'analisi dei risultati, sia in termini di densità sia di resistenza a compressione, non evidenzia sostanziali differenze fra la stagionatura a umido e quella ottenuta mantenendo la miscela a contatto con acqua, a parità di composizione. La variabilità dei valori di densità ottenuti con tali miscele ($1521-1881 \text{ kg/m}^3$), anche per carote ricavate dal medesimo provino cubico, è attribuibile sia alla variabilità delle miscele sia alla geometria, in alcuni casi poco regolare, dei provini.

Per alcune delle carote, ricavate dai provini realizzate con le miscele iniettate in cantiere, la stagionatura è stata prolungata in condizioni umide sino a circa 2 mesi.

In Tabella 8.4 si riportano i risultati in termini di densità e resistenza a compressione alle lunghe stagionature.

*a)**b)*

Figura 8.21 - Carote prelevate da cubi confezionati rispettivamente in data 21 *a)* e 24 luglio 2006 *b)*.

*a)**b)*

Figura 8.22 - Carote prelevate da cubi confezionati rispettivamente in data 25 *a)* e 26 luglio 2006 *b)*.

Tabella 8.3 - Valori di resistenza meccanica a compressione e di densità misurati, dopo una stagionatura non superiore a 2 settimane, su carote prelevate da provini confezionati con le miscele realizzate in cantiere nel mese di luglio.

<i>Data getto</i>	<i>Tempo di stagionatura (giorni)</i>	<i>Tipo di Stagionatura</i>	<i>Sigla carota</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Rc carota (MPa)</i>	<i>Rc cubo (MPa)</i>
19/07/2006	14	Umida	1	1730	0.08	0.10
19/07/2006	14	Umida	2a	1706	0.13	0.14
19/07/2006	14	Umida	2b	1638	0.15	0.15
21/07/2006	12	Umida	2	1545	0.08	0.09
21/07/2006	12	Umida	1	1529	0.09	0.08
21/07/2006	12	Satura	1	1521	0.07	0.07
21/07/2006	12	Satura	2	1550	0.09	0.09
24/07/2006	9	Umida	1	1582	0.54	0.65
24/07/2006	9	Umida	2	1689	0.65	0.76
24/07/2006	9	Satura	1	1847	0.61	0.49
25/07/2006	8	Umida	1	1700	0.13	0.16
25/07/2006	8	Umida	2	1675	0.15	0.18
25/07/2006	8	Satura	1	1770	0.13	0.14
25/07/2006	8	Satura	2	1755	0.13	0.14
26/07/2006	7	Satura	1	1881	0.05	0.05
26/07/2006	7	Satura	2	1772	0.03	0.03
26/07/2006	7	Umida	1	1752	0.05	0.07
26/07/2006	7	Umida	2	1773	0.05	0.07

La stagionatura prolungata a cui sono state sottoposte tali miscele incrementa solo leggermente la resistenza a compressione; i modesti incrementi si osservano soprattutto per quelle miscele che dopo 2 settimane avevano già manifestato le prestazioni migliori; in particolare le miscele confezionate in data 25/07/06 passano a resistenze mediamente pari a 0.3 MPa e quelle confezionate il 26/07/06 a 1-1.2 MPa, confermando le migliori prestazioni già emerse alle brevi stagionature.

8.4.2 Miscele confezionate in agosto 2006

Anche per le iniezioni avvenute nel mese di agosto l'impresa ha provveduto a consegnare al laboratorio provini cubici da destinare alle prove di compressione.

Tabella 8.4 - Valori di resistenza a compressione e di densità misurati, dopo una stagionatura di due mesi, su carote prelevate da provini confezionati con le miscele realizzate in cantiere nel mese di luglio.

<i>Data getto</i>	<i>Tempo di stagionatura (giorni)</i>	<i>Tipo di stagionatura</i>	<i>Sigla carota</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Rc carota (MPa)</i>	<i>Rc cubo (MPa)</i>
19/07/2006	65	umida	3-1	1702	0.11	0.10
19/07/2006	65	umida	3-2	1702	0.25	0.22
19/07/2006	65	umida	4	1747	0.23	0.25
21/07/2006	63	umida	3	1648	0.12	0.13
21/07/2006	63	umida	4	1664	0.11	0.13
21/07/2006	63	satura	3	1471	0.11	0.11
24/07/2006	60	umida	3	1683	0.83	0.98
24/07/2006	60	umida	4	1724	0.97	1.14
25/07/2006	59	umida	3	1723	0.23	0.27
25/07/2006	59	umida	4	1688	0.24	0.29
25/07/2006	59	satura	3	1784	0.22	0.22
25/07/2006	59	satura	4	1814	0.23	0.23
26/07/2006	58	satura	3	1889	0.06	0.05
26/07/2006	58	satura	4	1866	0.09	0.10
26/07/2006	58	umida	3	1740	0.10	0.11
26/07/2006	58	umida	4	1741	0.09	0.11

La Tabella 8.5 riporta, per ciascuna delle carote ricavate dai diversi provini cubici, il tempo di stagionatura (pari a circa 2 mesi), la densità e i valori di resistenza su carota e su cubo.

A parità di stagionatura, confrontando la Tabella 8.5 con la Tabella 8.4, si osserva che i provini confezionati in agosto presentano resistenze nettamente superiori a quelle misurate per le miscele confezionate a luglio. Mediamente si misurano valori di resistenza pari a 1.2 MPa e comunque, anche nel caso peggiore, la resistenza non scende al di sotto di 0.5 MPa (Tabella 8.5). Corrispondentemente per queste miscele si misurano valori di densità superiori a quelle misurate in precedenza, mediamente pari a 1889 kg/m³. Questo incremento potrebbe essere attribuibile alle modifiche effettuate in cantiere sia in termini di modalità di miscelazione ma anche ad un maggiore dosaggio di cemento o a un minore rapporto *a/c*.



Tabella 8.5 - Valori di resistenza a compressione e di densità misurati, dopo una stagionatura di due mesi, su carote prelevate da provini confezionati con le miscele realizzate in cantiere nel mese di agosto (* non si conosce la data precisa di confezionamento del provino cubico).

<i>Data getto</i>	<i>Tempo di stagionatura (giorni)</i>	<i>Sigla carota</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Rc carota (MPa)</i>	<i>Rc cubo (MPa)</i>
03/08/2006	64	1	1844	0.66	0.78
03/08/2006	64	2	1859	1.01	1.14
03/08/2006	64	3	1855	1.01	1.15
03/08/2006	64	4	1845	0.92	0.90
04/08/2006	63	1	1899	0.45	0.52
04/08/2006	63	2	1912	1.00	1.07
04/08/2006	63	3	1893	0.84	0.79
04/08/2006	63	4	1747	0.84	0.88
07/08/2006	60	1	1899	1.55	1.87
07/08/2006	60	2	1855	1.36	1.64
07/08/2006	60	3	1971	1.03	1.01
07/08/2006	60	4	1889	1.49	1.70
07/08/2006	60	5	1922	1.17	1.19
agosto 2006 *	~ 2 mesi	1	1921	1.55	1.90
agosto 2006 *	~ 2 mesi	2	1913	1.31	1.60
agosto 2006 *	~ 2 mesi	3	1969	1.04	1.29
agosto 2006 *	~ 2 mesi	4	1920	1.49	1.70

CONCLUSIONI

Dalle prove effettuate in laboratorio è emersa la possibilità di realizzare miscele cementizie con terreno fluidificato, in grado di soddisfare i requisiti espressi relativamente al progetto di messa in sicurezza dell'ex cava Carale in località S. Brigida.

La miscela di riempimento deve essere confezionata dapprima fluidificando il terreno con l'acqua e, successivamente, aggiungendo il cemento. Le proprietà di queste miscele, come, ad esempio, la fluidità, il mantenimento della lavorabilità nel tempo e la resistenza meccanica sono influenzate da diversi fattori.

La fluidità è una proprietà fondamentale per miscele iniettabili. Si è rilevato che, per consentire ad una miscela di essere colabile attraverso un condotto, si deve raggiungere una consistenza, misurata mediante la prova della tavola a scosse per malte, pari a circa 100%. Questa fluidità è ottenibile rimaneggiando il terreno con progressive aggiunte d'acqua. La fluidità è direttamente legata al contenuto d'acqua e aumenta linearmente con il rapporto acqua/terreno. Inoltre, essa è influenzata dal tipo di terreno utilizzato; terreni con prevalente contenuto di limo e argilla richiedono più acqua rispetto a terreni sabbiosi per raggiungere lo stesso livello di fluidità. È comunque possibile, in caso di terreni con ridotta frazione sabbiosa, diminuire la richiesta d'acqua aggiungendo della sabbia al terreno. Un ulteriore fattore, che influisce nella variazione della fluidità delle miscele cementizie, è il dosaggio di cemento. L'introduzione del cemento causa una diminuzione della fluidità rispetto alla miscela di acqua e terreno; tale diminuzione è più marcata nelle miscele confezionate con terreni costituiti in prevalenza da limo e argilla e per quelle miscele in cui si utilizza acqua solfatica nell'impasto.

Si è visto, inoltre, che la lavorabilità di tali miscele cementizie diminuisce nel tempo; mediamente una miscela fluida, realizzata con consistenze attorno a 120-130%, non è più colabile dopo 60 minuti a circa 20°C, pur mantenendo una certa mobilità per 2-3 ore. A temperature inferiori (ad esempio a 5°C che verosimilmente è quella presente all'interno delle gallerie) la miscela non risulta più colabile solo dopo 90 minuti. Le diminuzioni di consistenza sono più rapide per quelle miscele con dosaggi di cemento maggiori; inoltre, l'aumento della temperatura accelera la diminuzione della lavorabilità.

Le resistenze meccaniche a compressione delle miscele allo stato indurito sono influenzate prevalentemente dal rapporto acqua/cemento (a/c); a parità di rapporto acqua/terreno (a/t) e tipo di terreno, si sono misurate, su provini stagionati in condizioni standard, resistenze mag-

giori per quelle miscele con rapporti a/c pari a circa 3 (mediamente 1.5 MPa dopo 28 giorni di stagionatura) rispetto a quelle con rapporti a/c di 5 (mediamente meno di 1 MPa a 28 giorni di stagionatura). I valori di resistenza a compressione variano anche in base al tipo di terreno utilizzato.

Anche le condizioni di esposizione delle miscele influenzano la resistenza a compressione; le miscele gettate sott'acqua hanno resistenze minori di circa il 50% rispetto alle stesse miscele gettate senz'acqua almeno per uno strato corticale di poche decine di millimetri. Le miscele stagionate in condizioni umide a 5°C e immerse solo successivamente in acqua hanno resistenze dopo 21 giorni di saturazione minori rispetto a quelle conservate in ambiente asciutto. Tale differenza di resistenza è tanto maggiore quanto più basso il rapporto a/c che caratterizza la miscela. La presenza di solfati, sia nell'acqua d'impasto sia nell'acqua in cui sono state immerse le miscele, non ha influenze significative sulla resistenza a compressione.

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio si è proposta una procedura di riempimento da seguire per la realizzazione della miscela in cantiere descritta nel paragrafo 7.

Le prove di laboratorio hanno dimostrato che la manipolazione del terreno fino all'ottenimento di una miscela fluida è una fase complessa e critica. L'efficacia dell'intervento dipende dalle modalità di verifiche e di controllo che verranno adottate relativamente a tutto il processo di riempimento delle gallerie di S. Brigida: dalla produzione di miscela, fino alle iniezioni ed in seguito anche a lavoro ultimato.

Nei mesi di luglio e agosto 2006 è stato effettuato un primo intervento pilota con iniezioni che hanno interessato la parte terminale dell'ultimo livello, ovvero la zona più accessibile per la realizzazione delle perforazioni di iniezione e più vicina all'abitato. La possibilità di realizzare in cantiere miscele cementizie fluide con terreno, aventi caratteristiche di colabilità, è stata valutata con prove preliminari in campo e verificata in base ai risultati ottenuti dalle prove di resistenza a compressione effettuate su campioni confezionati con le miscele realizzate in campo e forniti al laboratorio CMIC dagli operatori dell'impianto pilota.

Attraverso una prima prova in cantiere, effettuata nel dicembre 2005, si è valutato come una miscela, simile a quelle caratterizzate in laboratorio, poteva comportarsi in fase di riempimento. In particolare, il confezionamento della miscela, in volumi decisamente superiori rispetto a quelli realizzati in laboratorio, ha evidenziato la necessità di adottare un impianto di miscelazione efficace in grado di ottimizzare la produzione della miscela di riempimento. Successivamente è stata effettuata una seconda prova in campo (nel giugno 2006) con lo

scopo di verificare l'impianto di miscelazione pilota che nel frattempo era stato realizzato in cantiere. I risultati di questa seconda prova hanno permesso di individuare ulteriori modifiche da apportare all'impianto stesso al fine di garantire un'adeguata fluidificazione del terreno con acqua.

In concomitanza alle iniezioni per il riempimento dell'area interessata dal progetto pilota, iniziate nel mese di luglio e proseguite sino in agosto, l'impresa ha provveduto a conservare campioni delle miscele confezionate in differenti giornate, e a inviarli al laboratorio "Materiali cementizi e durabilità" di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta". L'osservazione macroscopica dei campioni relativi alle miscele realizzate a luglio ha evidenziato una certa variabilità nel terreno impiegato in fase di confezionamento. La variabilità dei valori di resistenza a compressione ottenuti con tali miscele è probabilmente attribuibile sia alla variabilità delle miscele sia alla geometria, in alcuni casi poco regolare, dei provini. Tra l'altro, anche dopo una stagionatura prolungata per circa 2 mesi, tali miscele incrementano solo leggermente la resistenza a compressione che non raggiunge mediamente valori superiori a 0.3 MPa. I provini confezionati in agosto presentano resistenze nettamente superiori a quelle misurate per le miscele confezionate a luglio. Mediamente si misurano valori di resistenza pari a 1.2 MPa e comunque, anche nel caso peggiore, la resistenza non scende sotto 0.6 MPa. Questo incremento potrebbe essere attribuibile alle modifiche effettuate in cantiere sia in termini di modalità di miscelazione, ma anche ad un maggiore dosaggio di cemento o a un minore rapporto *a/c*.

Per poter ottimizzare la qualità e la produzione della miscela di riempimento si dovranno comunque prevedere, successivamente alle operazioni di iniezione effettuate in concomitanza al progetto pilota, ulteriori controlli su campioni di materiale di riempimento indurito, prelevati in sito mediante carotaggio. Tali carotaggi consentiranno di verificare in primo luogo l'effettivo riempimento delle gallerie. Inoltre, con i campioni prelevati si verificherà la resistenza meccanica della miscela a differenti profondità, sia in corrispondenza della sommità della gallerie dove lo stesso materiale è venuto maggiormente a contatto con l'acqua, sia nel resto della cavità. Si dovrà, infine, controllare la presenza di eventuali degradi del materiale e identificarne le cause (azione di solfati, della temperatura, ecc.), in modo da assicurare, per le successive iniezioni, l'idoneità del materiale utilizzato.



RIFERIMENTI

- [1] Studio associato di Geologia Spada, Sistemazione e dissesto ex miniere (cava Carale) nel Comune di Santa Brigida - Relazione geologico tecnica, Aprile 2005.
- [2] Studio associato di Geologia Spada, Sistemazione e dissesto ex miniere (cava Carale) nel Comune di Santa Brigida - Relazione idrogeologica, Aprile 2005.
- [3] Studio associato di Geologia Spada, Sistemazione e dissesto ex miniere (cava Carale) nel Comune di Santa Brigida - Relazione tecnica - illustrativa, Aprile 2005.
- [4] Prof. R. Nova, Relazione finale - Verifiche e prove di laboratorio a carattere geotecnico ed idraulico su alcune miscele di materiali, Milano, Aprile 2005.
- [5] Prof. L. Bertolini, Relazione finale - Studio delle proprietà reologiche di miscele di riempimento da utilizzarsi per il consolidamento dell'ex cava di gesso in località Carale del comune di S. Brigida, Milano, Marzo 2006.
- [6] Tavole grafiche relative al progetto di sistemazione e dissesto ex miniere (cava Carale) nel Comune di Santa Brigida – redatte dallo Studio Associato di Geologia Spada.
- [7] ACI 230, 1R-90, State of the Art Report on Soil Cement.
- [8] B.V. Venkatarama Reddy and A. Gupta, Characteristics of cement-soil mortars, *Materials and Structures* 38, July 2005, pp. 639-650.
- [9] M. Cupo Pagano, V. Misano, C. Perpetua, P. Zaccagnino. Il trattamento delle terre con calce, con cemento e con calce-cemento, Associazione Geotecnica Italiana, XIX Convegno Nazionale di Geotecnica, Pavia 19-21 settembre 1995, pp. 227-235.
- [10] A. Burghignoli, S. Miliziano, V. Pane, F.M. Soccodato, Miglioramento delle caratteristiche meccaniche di terreni argillosi mediante trattamenti colonnari a secco con cemento ed inerte, Associazione Geotecnica Italiana, XIX Convegno Nazionale di Geotecnica, Pavia 19-21 settembre 1995, pp. 153-162.
- [11] A. Burghignoli, S. Miliziano, F.M. Soccodato, Comportamento meccanico di terreni argillosi artificialmente cementati, Associazione Geotecnica Italiana, XIX Convegno Nazionale di Geotecnica, Pavia 19-21 settembre 1995, pp. 145-151.
- [12] ACI 229R-99, Controlled Low Strength Materials (CLSM).
- [13] L. Bertolini, M. Carsana, Materiali cementizi a bassa resistenza per riempimenti, In *Concreto*, Roma, n. 38, gennaio/febbraio, pag. 7-15, 2001. Casa Editrice La Fiaccola.



ALLEGATO A

RESISTENZA A COMPRESSIONE

Si riportano per ognuna delle miscele effettuate gli andamenti dei valori di resistenza a compressione in funzione del tempo, distinti per tipo di terreno.

Le interpolazioni sono state tracciate in base alla correlazione proposta dall'Eurocodice 2 (EN 1992-1-1 § 3.1.2).

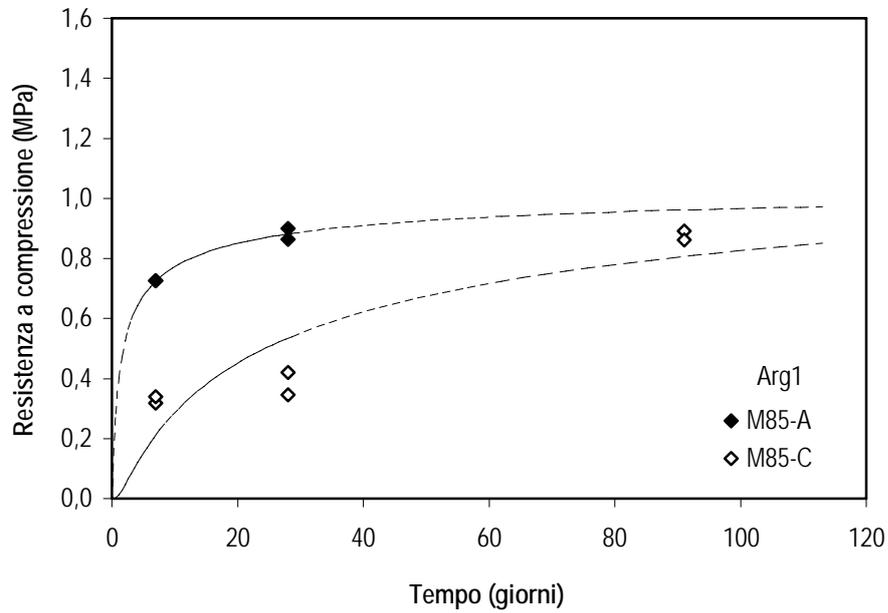


Figura A-1 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M85-A e M85-B.

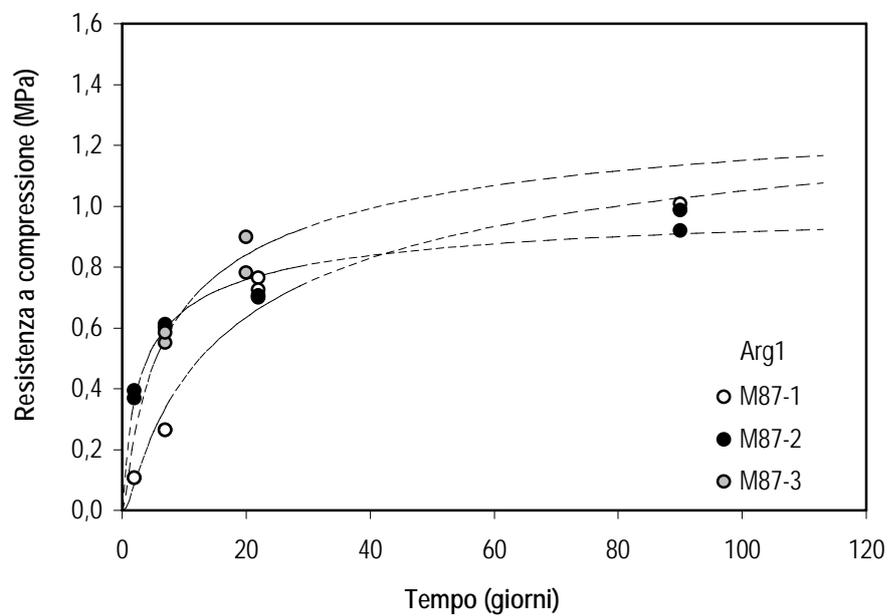


Figura A-2 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M87-1, M87-2 e M87-3.

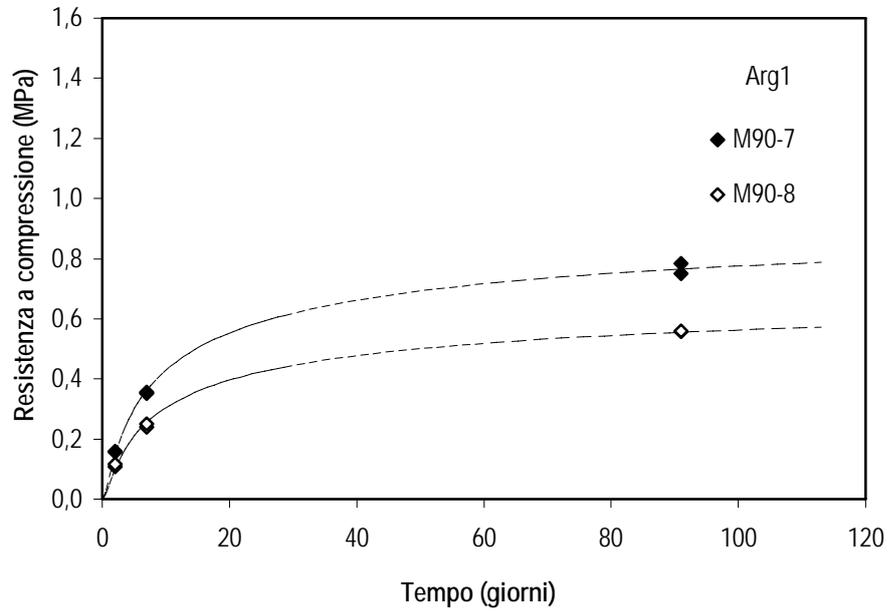


Figura A-3 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M90-7 e M90-8.

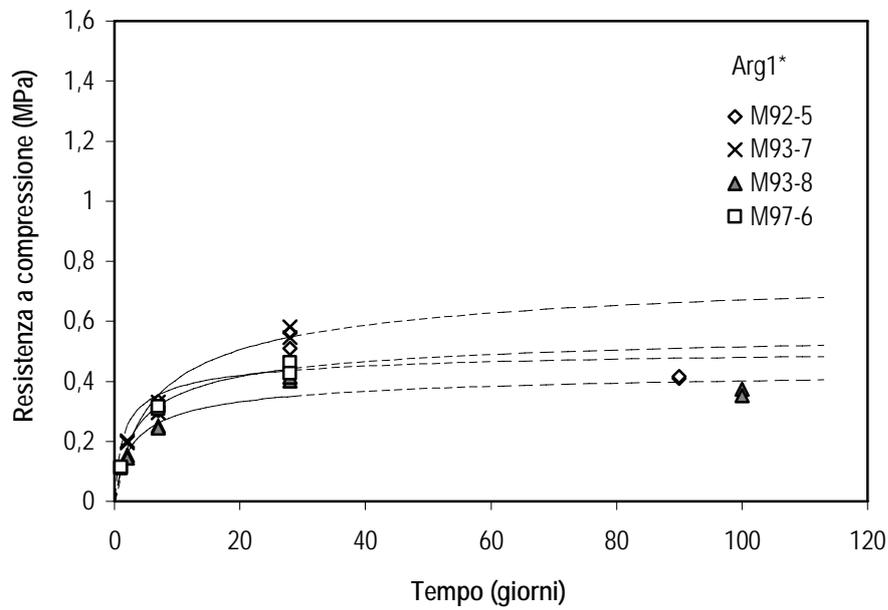


Figura A-4 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M92-5, M93-7, M93-8 e M97-6.

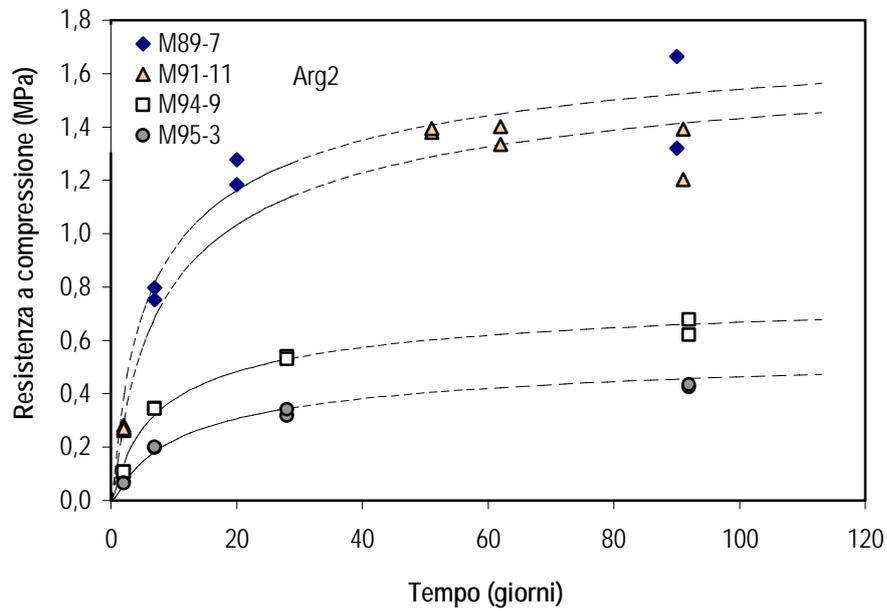


Figura A-5 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M91-11, M94-9, M95-3 e M89-7.

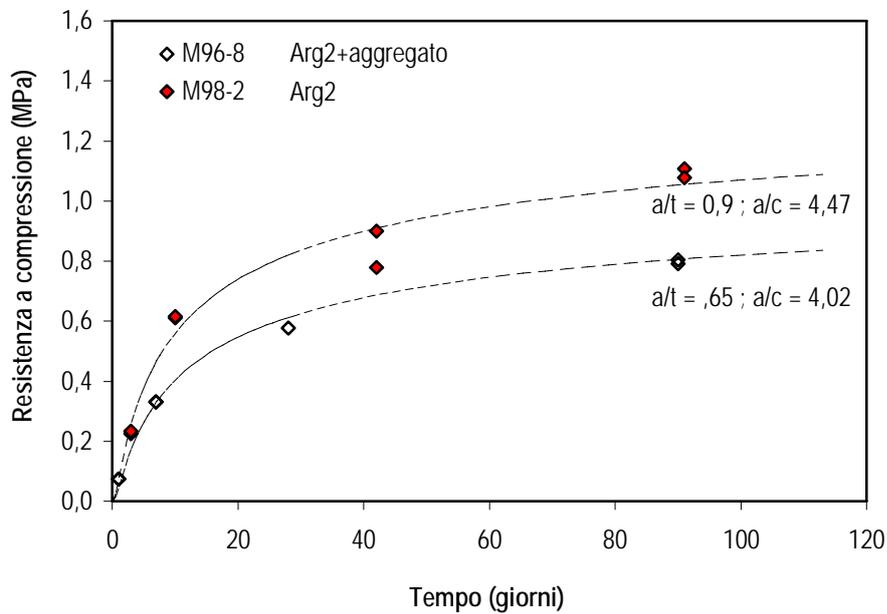


Figura A-6 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M98-2 e M96-8.

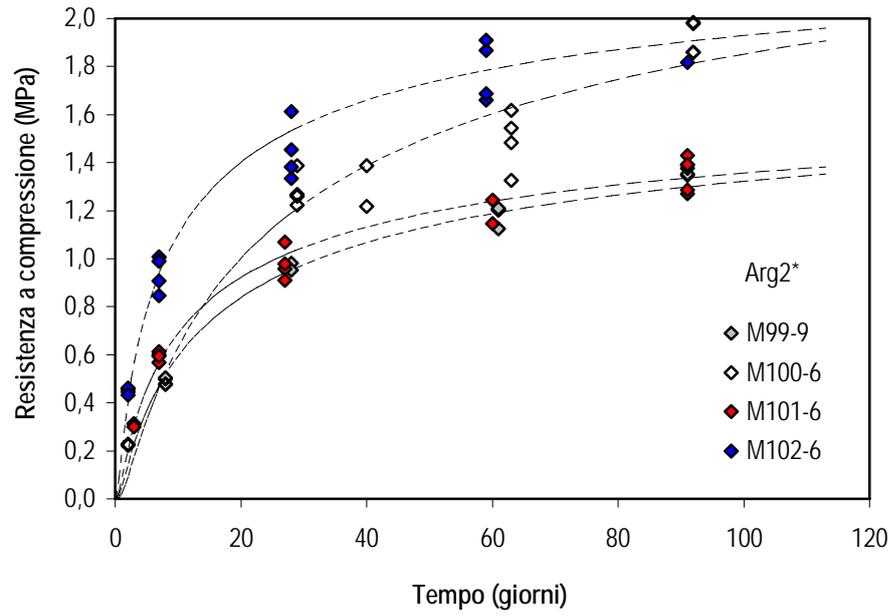


Figura A-7 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie M99-9, M100-6, M101-6 e M102-6.



ALLEGATO B

COMPOSIZIONE DELLE MISCELE E PRINCIPALI PROPRIETÀ

Si riportano, nelle tabelle che seguono, i dati relativi alle miscele realizzate in laboratorio, distinguendo fra le miscele cementizie e quelle di terreno fluidificato (indicate con il simbolo di asterisco *). Si specificano i diversi costituenti (ad esempio: tipo di terreno e di acqua impiegata), la quantità utilizzata per ciascuno di essi. Ogni miscela è indicata con una sigla a cui è stato apposto un numero progressivo nel caso in cui la miscela sia stata confezionata per progressive aggiunte di materiale.

Nelle Tabelle si riporta la stima del volume di impasto alle diverse fasi di miscelazione e il dosaggio dei diversi costituenti. Inoltre, sono riepilogati i principali risultati ottenuti dalle prove di lavorabilità (in termini di spandimento e tempo di svuotamento dell'imbuto) dalle misure di densità allo stato fresco e indurito.



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-1	Arg-1	Arg-1	Arg-2	Arg-2	Arg-2
Tipo di vagliatura	< 4.75 mm	< 4.75 mm	< 4.75 mm	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	cementizia	*	*	*
Numero getto	M87-1	M87-2	M87-3	M89-4	M89-5	M89-6
Data	05/07/05	05/07/05	07/07/05	07/07/05	07/07/05	07/07/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	2	1,09	3,53	4,233	-	-
Acqua (kg)	0,930	0,510	1,640	0,935	0,275	0,486
Cemento (kg)	0,167	0,190	0,450	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	26,84	26,84	26,84
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	2,000	1,090	3,530	3,337	3,337	3,337
Cemento (kg)	0,167	0,190	0,450	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0	0	0	0,896	0,896	0,896
Acqua totale aggiunta (kg)	0,930	0,510	1,640	0,935	1,210	1,696
Acqua complessiva (kg)	0,930	0,510	1,640	1,831	2,106	2,592
Massa totale (kg)	3,097	1,790	5,620	5,168	5,443	5,929
Rapporto a/(terreno+sabbia)	0,465	0,468	0,465	0,549	0,631	0,777
Rapporto a/c	5,569	2,684	3,644	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	0,74	0,40	1,31	1,24	1,24	1,24
Acqua totale (litri)	0,93	0,51	1,64	1,83	2,11	2,59
Cemento (litri)	0,05	0,06	0,14	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	1,72	0,97	3,09	3,07	3,34	3,83
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1160	1119	1142	1088	999	872
Acqua (kg/m³)	540	524	531	597	630	677
Cemento (kg/m³)	97	195	146	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1797	1838	1819	1685	1629	1549
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	1824	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	170	175	165	130	160	175
Spandimento D2 (mm)	170	175	165	135	170	180
Consistenza (%)	70	75	65	32,5	65	77,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	1773	1835	1835	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2	Arg-1	Arg-1	Arg-1	Arg-1	Arg-1
Tipo di vagliatura	nessuna	< 4.75 mm				
Tipo di miscela	cementizia	*	*	*	*	*
Numero getto	M89-7	M90-1	M90-2	M90-3	M90-4	M90-5
Data	07/07/05	20/07/05	20/07/05	20/07/05	20/07/05	20/07/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	8,231	-	-	-	-
Acqua (kg)	-	2,881	0,412	0,412	0,412	0,412
Cemento (kg)	0,516	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	26,84	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	3,337	8,231	8,231	8,231	8,231	8,231
Cemento (kg)	0,516	-	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0,896	0	0	0	0	0
Acqua totale aggiunta (kg)	1,696	2,881	3,292	3,704	4,115	4,527
Acqua complessiva (kg)	2,592	2,881	3,292	3,704	4,115	4,527
Massa totale (kg)	6,445	11,111	11,523	11,934	12,346	12,757
Rapporto a/(terreno+sabbia)	0,777	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550
Rapporto a/c	5,023	-	-	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	1,24	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
Acqua totale (litri)	2,59	2,88	3,29	3,70	4,12	4,53
Cemento (litri)	0,16	-	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	3,99	5,93	6,34	6,75	7,16	7,58
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	836	1388	1298	1219	1149	1087
Acqua (kg/m³)	649	486	519	549	574	598
Cemento (kg/m³)	129	-	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1615	1874	1817	1767	1723	1684
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	1552	-	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	153	150	160	180	195	210
Spandimento D2 (mm)	153	145	160	180	195	210
Consistenza (%)	53	47,5	60	80	95	110
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	1522	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	sì	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	<i>Arg-1</i>	<i>Arg-1</i>	<i>Arg-1</i>	<i>Arg-2</i>	<i>Arg-2</i>	<i>Arg-2</i>
Tipo di vagliatura	< 4.75 mm	< 4.75 mm	< 4.75 mm	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	*	*	*
Numero getto	M90-6	M90-7	M90-8	M91-1	M91-2	M91-3
Data	20/07/05	20/07/05	20/07/05	27/07/05	27/07/05	27/07/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	10,368	-	-
Acqua aggiunta (kg)	0,412	-	0,412	0,800	0,400	0,400
Cemento (kg)	-	1,150	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	26,84	26,84	26,84
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	8,231	8,231	8,231	8,174	8,174	8,174
Cemento (kg)	-	1,150	1,150	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0	0	0	2,194	2,194	2,194
Acqua totale aggiunta (kg)	4,938	4,938	5,350	0,800	1,200	1,600
Acqua complessiva (kg)	4,938	4,938	5,350	2,994	3,394	3,794
Massa totale (kg)	13,169	14,319	14,730	11,168	11,568	11,968
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,600	0,600	0,650	0,366	0,415	0,464
Rapporto a/c	-	4,294	4,652	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	3,05	3,05	3,05	3,03	3,03	3,03
Acqua totale (litri)	4,94	4,94	5,35	2,99	3,39	3,79
Cemento (litri)	-	0,37	0,37	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	7,99	8,35	8,76	6,02	6,42	6,82
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1031	985	939	1358	1273	1198
Acqua (kg/m³)	618	591	610	497	529	556
Cemento (kg/m³)	-	138	131	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1649	1714	1681	1855	1801	1754
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1844	1706	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	235	190	210	110	120	130
Spandimento D2 (mm)	230	190	205	110	120	125
Consistenza (%)	132,5	90	107,5	10	20	27,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1691	1668	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	No
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	No
Tipo terreno	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	*	*	*	*	*	*
Numero getto	M91-4	M91-5	M91-6	M91-7	M91-8	M91-9
Data	27/07/05	27/07/05	27/07/05	27/07/05	27/07/05	27/07/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	0	0	0	0	0	0
Acqua aggiunta (kg)	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,400
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	26,84	26,84	26,84	26,84	26,84	26,84
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	8,174	8,174	8,174	8,174	8,174	8,174
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	2,194	2,194	2,194	2,194	2,194	2,194
Acqua totale aggiunta (kg)	2,400	3,200	4,000	4,800	5,600	6,000
Acqua complessiva (kg)	4,594	5,394	6,194	6,994	7,794	8,194
Massa totale (kg)	12,768	13,568	14,368	15,168	15,968	16,368
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,562	0,660	0,758	0,856	0,953	1,002
Rapporto a/c	-	-	-	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
Acqua totale (litri)	4,59	5,39	6,19	6,99	7,79	8,19
Cemento (litri)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	7,62	8,42	9,22	10,02	10,82	11,22
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1073	971	886	816	755	728
Acqua (kg/m³)	603	641	672	698	720	730
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1675	1611	1558	1514	1476	1459
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	150	170	175	200	210	210
Spandimento D2 (mm)	145	170	185	195	205	215
Consistenza (%)	47,5	70	80	97,5	107,5	112,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	sì	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2	Arg-2	Arg-1***	Arg-1***	Arg-1***	Arg-1***
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	*	*	*	cementizia
Numero getto	M91-10	M91-11	M92-1	M92-2	M92-3	M92-4
Data	27/07/05	27/07/05	23/09/05	23/09/05	23/09/05	23/09/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	0	0	7,746	0	0	0
Acqua aggiunta (kg)	0,000	0,800	1,540	0,386	0,386	0
Cemento (kg)	2,070	-	-	-	-	0,816
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	26,84	26,84	0,08	0,08	0,08	0,08
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	8,174	8,174	7,740	7,740	7,740	7,740
Cemento (kg)	2,070	2,070	-	-	-	0,816
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	2,194	2,194	0,006	0,006	0,006	0,006
Acqua totale aggiunta (kg)	6,000	6,800	1,540	1,926	2,312	2,312
Acqua complessiva (kg)	8,194	8,994	1,546	1,932	2,318	2,318
Massa totale (kg)	18,438	19,238	9,286	9,672	10,058	10,874
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,002	1,100	0,200	0,250	0,300	0,300
Rapporto a/c	3,958	4,345	-	-	-	2,841
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	3,03	3,03	2,87	2,87	2,87	2,87
Acqua totale (litri)	8,19	8,99	1,55	1,93	2,32	2,32
Cemento (litri)	0,66	0,66	-	-	-	0,26
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	11,88	12,68	4,41	4,80	5,18	5,44
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	688	645	1754	1613	1493	1422
Acqua (kg/m³)	690	709	350	403	447	426
Cemento (kg/m³)	174	163	-	-	-	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1552	1517	2104	2016	1940	1997
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1564	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	175	200	135	175	210	150
Spandimento D2 (mm)	175	200	130	170	210	150
Consistenza (%)	75	100	32,5	72,5	110	50
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1465	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-I***	Arg-I***	Arg-I***	Arg-I***	Arg-I***	Arg-I***
Tipo di vagliatura	nessuna	< 4.75 mm				
Tipo di miscela	cementizia	*	*	*	*	cementizia
Numero getto	M92-5	M93-1	M93-2	M93-3	M93-4	M93-5
Data	23/09/05	05/10/05	05/10/05	05/10/05	05/10/05	05/10/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	0	10,000	0	0	0	0
Acqua aggiunta (kg)	0,780	1,986	0,499	0,499	0,499	0
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	1,149
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0,08	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	7,740	9,988	9,988	9,988	9,988	9,988
Cemento (kg)	0,816	0,000	0,000	0,000	0,000	1,149
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0,006	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Acqua totale aggiunta (kg)	3,092	1,986	2,485	2,984	3,484	3,484
Acqua complessiva (kg)	3,098	1,998	2,497	2,996	3,496	3,496
Massa totale (kg)	11,654	11,986	12,485	12,984	13,484	14,633
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,400	0,200	0,250	0,300	0,350	0,350
Rapporto a/c	3,797	-	-	-	-	3,043
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,87	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
Acqua totale (litri)	3,10	2,00	2,50	3,00	3,50	3,50
Cemento (litri)	0,26	-	-	-	-	0,36
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	6,22	5,80	6,29	6,79	7,29	7,66
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1244	1723	1587	1470	1369	1304
Acqua (kg/m³)	498	345	397	441	479	456
Cemento (kg/m³)	131	-	-	-	-	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1872	2068	1983	1911	1849	1911
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	1914	-	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	210	130	150	180	205	150
Spandimento d2 (mm)	210	130	150	180	205	150
Consistenza (%)	110	30	50	80	105	50
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	1833	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	<i>Arg-I***</i>	<i>Arg-I***</i>	<i>Arg-I***</i>	<i>Arg-2</i>	<i>Arg-2</i>	<i>Arg-2</i>
Tipo di vagliatura	<i>< 4.75 mm</i>	<i>< 4.75 mm</i>	<i>< 4.75 mm</i>	<i>nessuna</i>	<i>nessuna</i>	<i>nessuna</i>
Tipo di miscela	<i>cementizia</i>	<i>cementizia</i>	<i>cementizia</i>	<i>*</i>	<i>*</i>	<i>*</i>
Numero getto	M93-6	M93-7	M93-8	M94-1	M94-2	M94-3
Data	<i>05/10/05</i>	<i>05/10/05</i>	<i>05/10/05</i>	<i>02/11/05</i>	<i>02/11/05</i>	<i>02/11/05</i>
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	0	0	0	10,000	0	0
Acqua aggiunta (kg)	0,499	0,499	0,499	1,492	0,884	0,884
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0,12	0,12	0,12	18,2	18,2	18,2
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	9,988	9,988	9,988	8,460	8,460	8,460
Cemento (kg)	1,149	1,149	1,149	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0,012	0,012	0,012	1,540	1,540	1,540
Acqua totale aggiunta (kg)	3,983	4,483	4,982	1,492	2,376	3,260
Acqua complessiva (kg)	3,995	4,495	4,994	3,032	3,916	4,800
Massa totale (kg)	15,132	15,631	16,131	11,492	12,376	13,260
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,400	0,450	0,500	0,358	0,463	0,567
Rapporto a/c	3,478	3,913	4,347	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	3,80	3,80	3,80	3,13	3,13	3,13
Acqua totale (litri)	4,00	4,49	4,99	3,03	3,92	4,80
Cemento (litri)	0,36	0,36	0,36	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	8,16	8,66	9,16	6,17	7,05	7,93
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1224	1154	1091	1372	1200	1066
Acqua (kg/m³)	490	519	545	492	555	605
Cemento (kg/m³)	141	133	125	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1855	1806	1762	1864	1756	1671
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1818	1716	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	170	190	205	100	125	155
Spandimento D2 (mm)	170	190	210	100	120	150
Consistenza (%)	70	90	107,5	0	22,5	52,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1815	1764	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	*	*	*	*	cementizia	cementizia
Numero getto	M94-4	M94-5	M94-6	M94-7	M94-8	M94-9
Data	02/11/05	02/11/05	02/11/05	02/11/05	02/11/05	02/11/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	0,884	0,884	0,884	0,884	-	0,442
Cemento (kg)	-	-	-	-	1,769	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	8,460	8,460	8,460	8,460	8,460	8,460
Cemento (kg)	-	-	-	-	1,769	1,769
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	1,540	1,540	1,540	1,540	1,540	1,540
Acqua totale aggiunta (kg)	4,144	5,028	5,912	6,796	6,796	7,238
Acqua complessiva (kg)	5,684	6,568	7,452	8,336	8,336	8,778
Massa totale (kg)	14,144	15,028	15,912	16,796	18,565	19,007
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,672	0,776	0,881	0,985	0,985	1,038
Rapporto a/c	-	-	-	-	4,713	4,963
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13
Acqua totale (litri)	5,68	6,57	7,45	8,34	8,34	8,78
Cemento (litri)	-	-	-	-	0,56	0,56
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	8,82	9,70	10,59	11,47	12,03	12,47
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	960	872	799	738	703	678
Acqua (kg/m³)	645	677	704	727	693	704
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	147	142
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1604	1549	1503	1464	1543	1524
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	1525
Spandimento D1 (mm)	175	190	200	220	175	210
Spandimento D2 (mm)	170	190	230	265	185	190
Consistenza (%)	72,5	90	115	142,5	80	100
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	1559



Getto in acqua	no	no	sì	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	*	*	*
Numero getto	M95-1	M95-2	M95-3	M96-1	M96-2	M96-3
Data	02/11/05	02/11/05	02/11/05	17/11/05	17/11/05	17/11/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	10,000	-	-	6,500	-	-
Acqua aggiunta (kg)	6,796	-	0,442	-	0,998	0,998
Cemento (kg)	-	1,769	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	4,502	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	18,2	18,2	18,2	18,21	18,21	18,21
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	8,460	8,460	8,460	5,499	5,499	5,499
Cemento (kg)	-	1,769	1,769	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	4,502	4,502	4,502
Acqua da terreno (kg)	1,540	1,540	1,540	1,001	1,001	1,001
Acqua totale aggiunta (kg)	6,796	6,796	7,238	-	0,998	1,996
Acqua complessiva (kg)	8,336	8,336	8,778	1,001	1,999	2,997
Massa totale (kg)	16,796	18,565	19,007	11,002	12,000	12,998
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,985	0,985	1,038	0,100	0,200	0,300
Rapporto a/c	-	4,712	4,962	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	3,13	3,13	3,13	2,04	2,04	2,04
Acqua totale (litri)	8,34	8,34	8,78	1,00	2,00	3,00
Cemento (litri)	-	0,56	0,56	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	1,70	1,70	1,70
Totale (litri)	11,47	12,03	12,47	4,74	5,73	6,73
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	738	703	678	1161	959	817
Acqua (kg/m³)	727	693	704	211	349	445
Cemento (kg/m³)	0	147	142	0	0	0
Sabbia (kg/m³)	0	0	0	950	785	669
Densità (kg/m³)	1464	1543	1524	2323	2093	1931
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	1536	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	225	180	207	-	-	110
Spandimento D2 (mm)	280	185	210	-	-	100
Consistenza (%)	152,5	82,5	108,5	-	-	5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	1514	-	-	-
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	sì	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-2	Arg-1*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	< 4,75 mm
Tipo di miscela	*	*	*	*	cementizia	*
Numero getto	M96-4	M96-5	M96-6	M96-7	M96-8	M97-1
Data	17/11/05	17/11/05	17/11/05	17/11/05	17/11/05	24/11/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	5,600
Acqua aggiunta (kg)	1,000	0,990	0,990	0,500	-	1,672
Cemento (kg)	-	-	-	-	1,610	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	18,21	18,21	18,21	18,21	18,21	0,1
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	5,499	5,499	5,499	5,499	5,499	5,594
Cemento (kg)	-	-	-	-	1,610	-
Sabbia secca (kg)	4,502	4,502	4,502	4,502	4,502	-
Acqua da terreno (kg)	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	0,006
Acqua totale aggiunta (kg)	2,996	3,986	4,976	5,476	5,476	1,672
Acqua complessiva (kg)	3,997	4,987	5,977	6,477	6,477	1,678
Massa totale (kg)	13,998	14,988	15,978	16,478	18,088	7,272
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,400	0,499	0,598	0,648	0,648	0,300
Rapporto a/c	-	-	-	-	4,023	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,07
Acqua totale (litri)	4,00	4,99	5,98	6,48	6,48	1,68
Cemento (litri)	-	-	-	-	0,51	-
Sabbia (litri)	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	-
Totale (litri)	7,73	8,72	9,71	10,21	10,72	3,75
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	711	630	566	538	513	1492
Acqua (kg/m³)	517	572	615	634	604	447
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	150	-
Sabbia (kg/m³)	582	516	464	441	420	-
Densità (kg/m³)	1810	1718	1645	1613	1687	1939
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	1749	-
Spandimento D1 (mm)	145	195	220	235	200	180
Spandimento D2 (mm)	150	190	240	240	200	175
Consistenza (%)	47,5	92,5	130	137,5	100	77,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	1700	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-1*	Arg-1*	Arg-1*	Arg-1*	Arg-1*	Arg-2
Tipo di vagliatura	< 4.75 mm	nessuna				
Tipo di miscela	*	*	*	*	cementizia	*
Numero getto	M97-2	M97-3	M97-4	M97-5	M97-6	M98-1
Data	24/11/05	24/11/05	24/11/05	24/11/05	24/11/05	02/12/05
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	20,000
Acqua aggiunta (kg)	0,280	0,280	0,280	0,280	0,000	11,800
Cemento (kg)	-	-	-	-	0,767	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	18,2
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	5,594	5,594	5,594	5,594	5,594	16,920
Cemento (kg)	-	-	-	-	0,767	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	3,080
Acqua totale aggiunta (kg)	1,952	2,232	2,512	2,792	2,792	11,800
Acqua complessiva (kg)	1,957	2,237	2,517	2,797	2,797	14,880
Massa totale (kg)	7,552	7,832	8,112	8,392	9,159	31,800
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,350	0,400	0,450	0,500	0,500	0,879
Rapporto a/c	-	-	-	-	3,647	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	6,27
Acqua totale (litri)	1,96	2,24	2,52	2,80	2,80	14,88
Cemento (litri)	-	-	-	-	0,24	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	4,03	4,31	4,59	4,87	5,11	21,15
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1388	1298	1219	1149	1094	800
Acqua (kg/m³)	486	519	549	574	547	704
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	150	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1874	1817	1767	1723	1791	1504
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	1770	-
Spandimento D1 (mm)	195	215	245	265	190	245
Spandimento D2 (mm)	195	210	245	255	190	240
Consistenza (%)	95	112,5	145	160	90	142,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	1773	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	*	*	*	*	*
Numero getto	M98-2	M99-1	M99-2	M99-3	M99-4	M99-5
Data	02/12/05	25/01/06	25/01/06	25/01/06	25/01/06	25/01/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	16,500	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	-	1,780	0,630	1,260	1,260	1,260
Cemento (kg)	3,330	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	18,2	30,89	30,89	30,89	30,89	30,89
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	16,920	12,606	12,606	12,606	12,606	12,606
Cemento (kg)	3,330	-	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,080	3,894	3,894	3,894	3,894	3,894
Acqua totale aggiunta (kg)	11,800	1,780	2,410	3,670	4,930	6,190
Acqua complessiva (kg)	14,880	5,674	6,304	7,564	8,824	10,084
Massa totale (kg)	35,130	18,280	18,910	20,170	21,430	22,690
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,879	0,450	0,500	0,600	0,700	0,800
Rapporto a/c	4,468	-	-	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	6,27	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67
Acqua totale (litri)	14,88	5,67	6,30	7,56	8,82	10,08
Cemento (litri)	1,06	-	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	22,20	10,34	10,97	12,23	13,49	14,75
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	762	1219	1149	1031	934	854
Acqua (kg/m³)	670	549	575	618	654	684
Cemento (kg/m³)	150	-	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1582	1767	1723	1649	1588	1538
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	1701	-	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	180	-	115	125	155	175
Spandimento D2 (mm)	180	-	110	125	155	175
Consistenza (%)	80	-	12,5	25	55	75
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	-	5	3,6
Densità indurito (kg/m³)	1586	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	No	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	No	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	*	*	*	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M99-6	M99-7	M99-8	M99-9	M99-9	M99-9
Data	25/01/06	25/01/06	25/01/06	25/01/06	25/01/06	25/01/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	50	85
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	1,260	1,260	0,630	-	-	-
Cemento (kg)	-	-	-	2,820	2,820	2,820
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,89	30,89	30,89	30,89	30,89	30,89
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	12,606	12,606	12,606	12,606	12,606	12,606
Cemento (kg)	-	-	-	2,820	2,820	2,820
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,894	3,894	3,894	3,894	3,894	3,894
Acqua totale aggiunta (kg)	7,450	8,710	9,340	9,340	9,340	9,340
Acqua complessiva (kg)	11,344	12,604	13,234	13,234	13,234	13,234
Massa totale (kg)	23,950	25,210	25,840	28,660	28,660	28,660
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,900	1,000	1,050	1,050	1,050	1,050
Rapporto a/c	-	-	-	4,693	4,693	4,693
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67
Acqua totale (litri)	11,34	12,60	13,23	13,23	13,23	13,23
Cemento (litri)	-	-	-	0,90	0,90	0,90
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	16,01	17,27	17,90	18,80	18,80	18,80
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	787	730	704	671	671	671
Acqua (kg/m³)	708	730	739	704	704	704
Cemento (kg/m³)	-	-	-	150	150	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1496	1460	1443	1525	1525	1525
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	1518	-	-
Spandimento D1 (mm)	195	230	240	190	175	180
Spandimento D2 (mm)	195	235	240	185	175	185
Consistenza (%)	95	132,5	140	87,5	75	82,5
Svuotamento imbuto (s)	1,88	1,55	1,54	2,15	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	1521	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica						
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	*	*	*	*	*
Numero getto	M99-9	M100-1	M100-2	M100-3	M100-4	M100-5
Data	25/01/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	265	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	16,500	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	-	2,520	0,635	1,270	1,270	1,270
Cemento (kg)	2,820	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,89	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11
Umidità sabbia (%)						
Terreno secco (kg)	12,606	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682
Cemento (kg)	2,820	-	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,894	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818
Acqua totale aggiunta (kg)	9,340	2,520	3,155	4,425	5,695	6,965
Acqua complessiva (kg)	13,234	6,338	6,973	8,243	9,513	10,783
Massa totale (kg)	28,660	19,020	19,655	20,925	22,195	23,465
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,050	0,500	0,550	0,650	0,750	0,850
Rapporto a/c	4,693	-	-	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,67	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
Acqua totale (litri)	13,23	6,34	6,97	8,24	9,51	10,78
Cemento (litri)	0,90	-	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	18,80	11,04	11,67	12,94	14,21	15,48
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	671	1149	1087	980	892	819
Acqua (kg/m³)	704	574	598	637	669	697
Cemento (kg/m³)	150	-	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1525	1724	1684	1617	1562	1516
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	135	125	140	165	205	255
Spandimento D2 (mm)	135	120	140	160	210	260
Consistenza (%)	35	22,5	40	62,5	107,5	157,5
Svuotamento imbuto (s)	-	-	-	6,66	2,04	0,88
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M100-6	M100-6	M100-6	M100-6	M100-6	M100-6
Data	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	30	70	90	110	140
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	-	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	2,440	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682
Cemento (kg)	2,440	2,440	2,440	2,440	2,440	2,440
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818
Acqua totale aggiunta (kg)	6,965	6,965	6,965	6,965	6,965	6,965
Acqua complessiva (kg)	10,783	10,783	10,783	10,783	10,783	10,783
Massa totale (kg)	25,905	25,905	25,905	25,905	25,905	25,905
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850
Rapporto a/c	4,419	4,419	4,419	4,419	4,419	4,419
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
Acqua totale (litri)	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78
Cemento (litri)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	780	780	780	780	780	780
Acqua (kg/m³)	663	663	663	663	663	663
Cemento (kg/m³)	150	150	150	150	150	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1594	1594	1594	1594	1594	1594
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	1630	-	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	200	190	190	180	180	175
Spandimento D2 (mm)	205	190	190	180	180	170
Consistenza (%)	102,5	90	90	80	80	72,5
Svuotamento imbuto (s)	2,7	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	1607	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M100-6	M100-6	M100-6	M100-6	M100-6	M100-6
Data	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06	01/03/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	170	190	210	230	250	270
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	-
acqua aggiunta (kg)	-	-	-	-	-	-
cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682
Cemento (kg)	2,440	2,440	2,440	2,440	2,440	2,440
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818
Acqua totale aggiunta (kg)	6,965	6,965	6,965	6,965	6,965	6,965
Acqua complessiva (kg)	10,783	10,783	10,783	10,783	10,783	10,783
Massa totale (kg)	25,905	25,905	25,905	25,905	25,905	25,905
rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850
rapporto a/c	4,419	4,419	4,419	4,419	4,419	4,419
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
acqua totale (litri)	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78
cemento (litri)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25	16,25
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	780	780	780	780	780	780
Acqua (kg/m³)	663	663	663	663	663	663
Cemento (kg/m³)	150	150	150	150	150	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1594	1594	1594	1594	1594	1594
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Spandimento D1 (mm)	165	155	150	150	130	130
Spandimento D2 (mm)	170	160	155	145	140	130
Consistenza (%)	67,5	57,5	52,5	47,5	35	30
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	*	*	*	*	cementizia	cementizia
Numero getto	M101-1	M101-2	M101-3	M101-4	M101-5	M101-6
Data	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	16,500	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	2,520	1,270	1,270	1,270	-	0,635
Cemento (kg)	-	-	-	-	2,340	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682
Cemento (kg)	-	-	-	-	2,340	2,340
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818
Acqua totale aggiunta (kg)	2,520	3,790	5,060	6,330	6,330	6,965
Acqua complessiva (kg)	6,338	7,608	8,878	10,148	10,148	10,783
Massa totale (kg)	19,020	20,290	21,560	22,830	25,170	25,805
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,500	0,600	0,700	0,800	0,800	0,850
Rapporto a/c	-	-	-	-	4,337	4,608
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
Acqua totale (litri)	6,34	7,61	8,88	10,15	10,15	10,78
Cemento (litri)	-	-	-	-	0,74	0,74
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	11,04	12,31	13,58	14,85	15,59	16,22
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1149	1031	934	854	814	782
Acqua (kg/m³)	574	618	654	684	651	665
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	150	144
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Totale (densità, kg/m³)	1724	1649	1588	1538	1615	1591
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	1613
Spandimento d1 (mm)	120	160	195	240	180	200
Spandimento d2 (mm)	125	150	190	240	180	210
Consistenza (%)	22,5	55	92,5	140	80	105
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M101-6	M101-6	M101-6	M101-6	M101-6	M101-6
Data	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	30	60	90	120	160	195
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	-	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682	12,682
Cemento (kg)	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818	3,818
Acqua totale aggiunta (kg)	6,965	6,965	6,965	6,965	6,965	6,965
Acqua compressiva (kg)	10,783	10,783	10,783	10,783	10,783	10,783
Massa totale (kg)	25,805	25,805	25,805	25,805	25,805	25,805
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850
Rapporto a/c	4,608	4,608	4,608	4,608	4,608	4,608
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
Acqua totale (litri)	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78	10,78
Cemento (litri)	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	16,22	16,22	16,22	16,22	16,22	16,22
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	782	782	782	782	782	782
Acqua (kg/m³)	665	665	665	665	665	665
Cemento (kg/m³)	144	144	144	144	144	144
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1591	1591	1591	1591	1591	1591
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	200	195	190	190	180	160
Spandimento d2 (mm)	200	195	195	190	180	160
Consistenza (%)	100	95	92,5	90	80	60
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	No
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	nessuna	nessuna	nessuna	nessuna	< 4.75 mm	4.75+trattenuto
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	*	*
Numero getto	M101-6	M101-6	M101-6	M101-6	M102-1	M102-2
Data	17/03/06	17/03/06	17/03/06	17/03/06	11/04/06	11/04/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	215	240	260	280	0	0
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	9,940	4,460
Acqua aggiunta (kg)	-	-	-	-	4,650	-
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	30,11	30,11	30,11	30,11	2,21	2,21
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	12,682	12,682	12,682	12,682	9,725	14,089
Cemento (kg)	2,340	2,340	2,340	2,340	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	3,818	3,818	3,818	3,818	0,215	0,311
Acqua totale aggiunta (kg)	6,965	6,965	6,965	6,965	4,650	4,650
Acqua complessiva (kg)	10,783	10,783	10,783	10,783	4,865	4,961
Massa totale (kg)	25,805	25,805	25,805	25,805	14,590	19,050
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,850	0,850	0,850	0,850	0,500	0,352
Rapporto a/c	4,608	4,608	4,608	4,608	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	4,70	4,70	4,70	4,70	3,60	5,22
Acqua totale (litri)	10,78	10,78	10,78	10,78	4,86	4,96
Cemento (litri)	0,74	0,74	0,74	0,74	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	16,22	16,22	16,22	16,22	8,47	10,18
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	782	782	782	782	1149	1384
Acqua (kg/m³)	665	665	665	665	575	487
Cemento (kg/m³)	144	144	144	144	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1591	1591	1591	1591	1723	1871
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	155	150	140	130	-	110
Spandimento d2 (mm)	155	150	140	135	-	115
Consistenza (%)	55	50	40	32,5	-	12,5
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	4.75+trattenuto	4.75+trattenuto	4.75+trattenuto	4.75+trattenuto	4.75+trattenuto
Tipo di miscela	*	*	*	cementizia	cementizia
Numero getto	M102-3	M102-4	M102-5	M102-6	M102-7
Data	11/04/06	11/04/2006	11/04/06	11/04/06	11/04/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto					
Terreno umido (kg)	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	2,100	0,750	0,750	-	0,600
Cemento (kg)	-	-	-	2,170	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate					
Umidità terreno (%)	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	14,089	14,089	14,089	14,089	14,089
Cemento (kg)	-	-	-	2,170	2,170
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0,311	0,311	0,311	0,311	0,311
Acqua totale aggiunta (kg)	6,750	7,500	8,250	8,250	8,850
Acqua complessiva (kg)	7,061	7,811	8,561	8,561	9,161
Massa totale (kg)	21,150	21,900	22,650	24,820	25,420
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,501	0,554	0,608	0,608	0,650
Rapporto a/c	-	-	-	3,945	4,222
Stima volumi					
Terreno secco (litri)	5,22	5,22	5,22	5,22	5,22
Acqua totale (litri)	7,06	7,81	8,56	8,56	9,16
Cemento (litri)	-	-	-	0,69	0,69
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-
Totale (litri)	12,28	13,03	13,78	14,47	15,07
Stima dosaggi					
Terreno secco (kg/m³)	1147	1081	1022	974	935
Acqua (kg/m³)	575	600	621	592	608
Cemento (kg/m³)	-	-	-	150	144
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1722	1681	1644	1715	1687
Grandezze misurate					
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	1696
Spandimento d1 (mm)	205	225	245	185	200
Spandimento d2 (mm)	210	220	235	185	195
Consistenza (%)	107,5	122,5	140	85	97,5
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	*	*	*	*
Numero getto	M103-1	M103-2	M103-3	M103-4	M103-5
Data	12/05/2006	12/05/2006	12/05/2006	12/05/2006	12/05/2006
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto					
Terreno umido (kg)	22,000	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	3,000	1,720	2,580	2,590	2,590
Cemento (kg)	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate					
Umidità terreno (%)	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	17,239	17,239	17,239	17,239	17,239
Cemento (kg)	-	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	4,761	4,761	4,761	4,761	4,761
Acqua totale aggiunta (kg)	3,000	4,720	7,300	9,890	12,480
Acqua complessiva (kg)	7,761	9,481	12,061	14,651	17,241
Massa totale (kg)	25,000	26,720	29,300	31,890	34,480
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,450	0,550	0,700	0,850	1,000
Rapporto a/c	-	-	-	-	-
Stima volumi					
Terreno secco (litri)	6,38	6,38	6,38	6,38	6,38
Acqua totale (litri)	7,76	9,48	12,06	14,65	17,24
Cemento (litri)	-	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-
Totale (litri)	14,15	15,87	18,45	21,04	23,63
Stima dosaggi					
Terreno secco (kg/m³)	1219	1087	935	819	730
Acqua (kg/m³)	549	598	654	696	730
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1767	1684	1588	1516	1459
Grandezze misurate					
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	125	150	195	240	290
Spandimento d2 (mm)	125	155	200	245	300
Consistenza (%)	25	52,5	97,5	142,5	195
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	1,8	1,2	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	-	-	-	-	-	-
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M104-1	M104-2	M104-2	M104-2	M104-2	M104-2
Data	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	60	90	120	145
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	7,401	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	7,401	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	1,047	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	7,401	7,401	7,401	7,401	7,401	7,401
Cemento (kg)	-	1,047	1,047	1,047	1,047	1,047
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	7,401	7,401	7,401	7,401	7,401	7,401
Acqua complessiva (kg)	7,401	7,401	7,401	7,401	7,401	7,401
Massa totale (kg)	14,800	15,847	15,847	15,847	15,847	15,847
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	7,068	7,068	7,068	7,068	7,068
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74
Acqua totale (litri)	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40
Cemento (litri)	-	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	10,14	10,47	10,47	10,47	10,47	10,47
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	730	706	706	706	706	706
Acqua (kg/m³)	730	707	707	707	707	707
Cemento (kg/m³)	-	100	100	100	100	100
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1513	1513	1513	1513	1513
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1509	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	290	225	205	175	150	120
Spandimento d2 (mm)	300	225	215	170	150	120
Consistenza (%)	195	125	110	72,5	50	20
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1497	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	No
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	No
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	Manuale
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	Cementizia
Numero getto	M105-1	M105-2	M105-2	M105-2	M105-2	M105-2
Data	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	45	75	105	130
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	7,081	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	7,081	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	1,528	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	7,081	7,081	7,081	7,081	7,081	7,081
Cemento (kg)	0,000	1,528	1,528	1,528	1,528	1,528
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	7,081	7,081	7,081	7,081	7,081	7,081
Acqua complessiva (kg)	7,081	7,081	7,081	7,081	7,081	7,081
Massa totale (kg)	14,160	15,688	15,688	15,688	15,688	15,688
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	4,634	4,634	4,634	4,634	4,634
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
Acqua totale (litri)	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08
Cemento (litri)	-	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	9,70	10,19	10,19	10,19	10,19	10,19
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	730	695	695	695	695	695
Acqua (kg/m³)	730	695	695	695	695	695
Cemento (kg/m³)	-	150	150	150	150	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1540	1540	1540	1540	1540
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1536	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	290	220	205	160	135	120
Spandimento d2 (mm)	300	225	210	160	135	120
Consistenza (%)	195	122,5	107,5	60	35	20
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1522	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	*	*	*	*	*
Numero getto	M106-1	M106-2	M106-3	M106-4	M106-4	M106-4
Data	16/05/06	16/05/06	16/05/06	16/05/06	16/05/06	16/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0	60	100
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	22,000	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	3,000	2,580	3,450	3,450	-	-
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	17,239	17,239	17,239	17,239	17,239	17,239
Cemento (kg)	-	-	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	4,761	4,761	4,761	4,761	4,761	4,761
Acqua totale aggiunta (kg)	3,000	5,580	9,030	12,480	12,480	12,480
Acqua complessiva (kg)	7,761	10,341	13,791	17,241	17,241	17,241
Massa totale (kg)	25,000	27,580	31,030	34,480	34,480	34,480
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,450	0,600	0,800	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	-	-	-	-	-
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	6,38	6,38	6,38	6,38	6,38	6,38
Acqua totale (litri)	7,76	10,34	13,79	17,24	17,24	17,24
Cemento (litri)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	14,15	16,73	20,18	23,63	23,63	23,63
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	1219	1031	854	730	730	730
Acqua (kg/m³)	549	618	684	730	730	730
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1767	1649	1538	1459	1459	1459
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1563	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	125	170	260	325	325	325
Spandimento d2 (mm)	120	175	260	325	325	325
Consistenza (%)	22,5	72,5	160	225	225	225
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1546	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M107-1	M107-2	M107-2	M107-2	M107-2	M107-2
Data	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	60	100	135	250
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	6,666	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	6,666	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	1,950	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	6,666	6,666	6,666	6,666	6,666	6,666
Cemento (kg)	-	1,950	1,950	1,950	1,950	1,950
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	6,666	6,666	6,666	6,666	6,666	6,666
Acqua complessiva (kg)	6,666	6,666	6,666	6,666	6,666	6,666
Massa totale (kg)	13,330	15,280	15,280	15,280	15,280	15,280
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	3,418	3,418	3,418	3,418	3,418
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
Acqua totale (litri)	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
Cemento (litri)	-	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	9,13	9,75	9,75	9,75	9,75	9,75
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	730	683	683	683	683	683
Acqua (kg/m³)	730	683	683	683	683	683
Cemento (kg/m³)	-	200	200	200	200	200
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1567	1567	1567	1567	1567
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1563	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	325	225	175	135	120	-
Spandimento d2 (mm)	325	225	175	145	115	-
Consistenza (%)	225	125	75	40	17,5	-
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1546	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	no	no	no	no	no
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela		cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M108-1	M108-2	M108-2	M108-2	M108-2
Data	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06	12/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	40	80	115
Masse aggiunte al getto					
Terreno umido (kg)	6,580	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	6,580	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	2,450	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate					
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	6,580	6,580	6,580	6,580	6,580
Cemento (kg)	-	2,450	2,450	2,450	2,450
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	6,580	6,580	6,580	6,580	6,580
Acqua complessiva (kg)	6,580	6,580	6,580	6,580	6,580
Massa totale (kg)	13,158	15,608	15,608	15,608	15,608
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	2,686	2,686	2,686	2,686
Stima volumi					
Terreno secco (litri)	2,44	2,44	2,44	2,44	2,44
Acqua totale (litri)	6,58	6,58	6,58	6,58	6,58
Cemento (litri)	-	0,78	0,78	0,78	0,78
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-
Totale (litri)	9,02	9,79	9,79	9,79	9,79
Stima dosaggi					
Terreno secco (kg/m³)	730	672	672	672	672
Acqua (kg/m³)	730	672	672	672	672
Cemento (kg/m³)	-	250	250	250	250
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1594	1594	1594	1594
Grandezze misurate					
Densità fresco (kg/m³)	-	1568	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	325	210	200	150	120
Spandimento d2 (mm)	325	205	190	145	120
Consistenza (%)	225	107,5	95	47,5	20
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1559	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	No
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	Sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	*	*	*
Numero getto	M109-1	M109-2	M109-3	M109-4
Data	19/05/06	19/05/06	19/05/06	19/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto				
Terreno umido (kg)	22,000	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	3,000	2,580	3,450	3,450
Cemento (kg)	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-
Grandezze calcolate				
Umidità terreno (%)	27,62	27,62	27,62	27,62
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	17,239	17,239	17,239	17,239
Cemento (kg)	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-
Acqua totale da terreno (kg)	4,761	4,761	4,761	4,761
Acqua aggiunta (kg)	3,000	5,580	9,030	12,480
Acqua complessiva (kg)	7,761	10,341	13,791	17,241
Massa totale (kg)	25,000	27,580	31,030	34,480
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,450	0,600	0,800	1,000
Rapporto a/c	-	-	-	-
Stima volumi				
Terreno secco (litri)	6,38	6,38	6,38	6,38
Acqua totale (litri)	7,76	10,34	13,79	17,24
Cemento (litri)	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-
Totale (litri)	14,15	16,73	20,18	23,63
Stima dosaggi				
Terreno secco (kg/m³)	1219	1031	854	730
Acqua (kg/m³)	549	618	684	730
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1767	1649	1538	1459
Grandezze misurate				
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	120	170	260	350
Spandimento d2 (mm)	120	170	270	340
Consistenza (%)	20	70	165	245
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manulale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela		cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M110-1	M110-2	M110-2	M110-2	M110-2
Data	19/05/06	19/05/06	19/05/06	19/05/06	19/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	65	120	150
Masse aggiunte al getto					
Terreno umido (kg)	6,430	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	6,430	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	0,910	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate					
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	6,430	6,430	6,430	6,430	6,430
Cemento (kg)	-	0,910	0,910	0,910	0,910
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	6,430	6,430	6,430	6,430	6,430
Acqua complessiva (kg)	6,430	6,430	6,430	6,430	6,430
Massa totale (kg)	12,860	13,770	13,770	13,770	13,770
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	7,066	7,066	7,066	7,066
Stima volumi					
Terreno secco (litri)	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38
Acqua totale (litri)	6,43	6,43	6,43	6,43	6,43
Cemento (litri)	-	0,29	0,29	0,29	0,29
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-
Totale (litri)	8,81	9,10	9,10	9,10	9,10
Stima dosaggi					
Terreno secco (kg/m³)	730	706	706	706	706
Acqua (kg/m³)	730	707	707	707	707
Cemento (kg/m³)	-	100	100	100	100
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1513	1513	1513	1513
Grandezze misurate					
Densità fresco (kg/m³)	-	1538	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	350	235	170	135	100
Spandimento d2 (mm)	340	240	165	130	100
Consistenza (%)	245	137,5	67,5	32,5	0
Svuotamento imbuto (sec)					
Densità indurito (kg/m³)	-	1484	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M111-1	M111-2	M111-2	M111-2	M111-2	M111-2
Data	19/05/06	19/05/06	19/05/06	19/05/06	19/05/06	19/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	55	100	130	165
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	7,867	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	7,867	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	1,697	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	7,867	7,867	7,867	7,867	7,867	7,867
Cemento (kg)	-	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	7,867	7,867	7,867	7,867	7,867	7,867
Acqua complessiva (kg)	7,867	7,867	7,867	7,867	7,867	7,867
Massa totale (kg)	15,732	17,429	17,429	17,429	17,429	17,429
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	4,636	4,636	4,636	4,636	4,636
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91	2,91
Acqua totale (litri)	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
Cemento (litri)	-	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	10,78	11,32	11,32	11,32	11,32	11,32
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	730	695	695	695	695	695
Acqua (kg/m³)	730	695	695	695	695	695
Cemento (kg/m³)	-	150	150	150	150	150
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1540	1540	1540	1540	1540
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1522	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	350	225	180	120	100	-
Spandimento d2 (mm)	340	230	175	120	100	-
Consistenza (%)	245	127,5	77,5	20	0	-
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1509	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	*	*	*
Numero getto	M112-1	M112-2	M112-3	M112-4
Data	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	0	0
Masse aggiunte al getto				
Terreno umido (kg)	22,000	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	3,000	2,580	3,450	3,450
Cemento (kg)	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-
Grandezze calcolate				
Umidità terreno (%)	27,62	27,62	27,62	27,62
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	17,239	17,239	17,239	17,239
Cemento (kg)	-	-	-	-
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	4,761	4,761	4,761	4,761
Acqua totale aggiunta (kg)	3,000	5,580	9,030	12,480
Acqua complessiva (kg)	7,761	10,341	13,791	17,241
Massa totale (kg)	25,000	27,580	31,030	34,480
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	0,450	0,600	0,800	1,000
Rapporto a/c	-	-	-	-
Stima volumi				
Terreno secco (litri)	6,38	6,38	6,38	6,38
Acqua totale (litri)	7,76	10,34	13,79	17,24
Cemento (litri)	-	-	-	-
Sabbia (litri)	-	-	-	-
Totale (litri)	14,15	16,73	20,18	23,63
Stima dosaggi				
Terreno secco (kg/m³)	1219	1031	854	730
Acqua (kg/m³)	549	618	684	730
Cemento (kg/m³)	-	-	-	-
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1767	1649	1538	1459
Grandezze misurate				
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	115	170	245	370
Spandimento d2 (mm)	115	170	250	375
Consistenza (%)	15	70	147,5	272,5
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	*	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M113-1	M113-2	M113-2	M113-2	M113-2	M113-2
Data	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	0	0	25	45	75	95
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	7,607	-	-	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	7,607	-	-	-	-	-
Cemento (kg)	-	2,226	-	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	7,607	7,607	7,607	7,607	7,607	7,607
Cemento (kg)	-	2,226	2,226	2,226	2,226	2,226
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	7,607	7,607	7,607	7,607	7,607	7,607
Acqua complessiva (kg)	7,607	7,607	7,607	7,607	7,607	7,607
Massa totale (kg)	15,212	17,438	17,438	17,438	17,438	17,438
Rapporto a/(terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	-	3,417	3,417	3,417	3,417	3,417
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82
Acqua totale (litri)	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61
Cemento (litri)	-	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	10,42	11,13	11,13	11,13	11,13	11,13
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	730	683	683	683	683	683
Acqua (kg/m³)	730	683	683	683	683	683
Cemento (kg/m³)	-	200	200	200	200	200
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Densità (kg/m³)	1459	1567	1567	1567	1567	1567
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	1548	-	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	370	210	210	210	175	145
Spandimento d2 (mm)	375	210	205	195	175	145
Consistenza (%)	272,5	110	107,5	102,5	75	45
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	1520	-	-	-	-



Getto in acqua	no	no	no	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	*	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M113-2	M113-2	M114-1	M114-2	M114-2	M114-2
Data	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06	26/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	125	160	0	0	20	55
Masse aggiunte al getto						
Terreno umido (kg)	-	-	6,376	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	-	-	6,376	-	-	-
Cemento (kg)	-	-	-	2,372	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-	-	-	-
Grandezze calcolate						
Umidità terreno (%)	0	0	0	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-	-	-	-
Terreno secco (kg)	7,605	7,605	6,376	6,376	6,376	6,376
Cemento (kg)	2,226	2,226	-	2,372	2,372	2,372
Sabbia secca (kg)	-	-	-	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	0	0	0	0	0	0
Acqua totale aggiunta (kg)	7,607	7,607	6,376	6,376	6,376	6,376
Acqua complessiva (kg)	7,607	7,607	6,376	6,376	6,376	6,376
Massa totale (kg)	17,438	17,438	12,752	15,124	15,124	15,124
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	3,417	3,417	-	2,688	2,688	2,688
Stima volumi						
Terreno secco (litri)	2,82	2,82	2,36	2,36	2,36	2,36
Acqua totale (litri)	7,61	7,61	6,38	6,38	6,38	6,38
Cemento (litri)	0,71	0,71	-	0,75	0,75	0,75
Sabbia (litri)	-	-	-	-	-	-
Totale (litri)	11,13	11,13	8,74	9,49	9,49	9,49
Stima dosaggi						
Terreno secco (kg/m³)	683	683	730	672	672	672
Acqua (kg/m³)	683	683	730	672	672	672
Cemento (kg/m³)	200	200	-	250	250	250
Sabbia (kg/m³)	-	-	-	-	-	-
Totale (densità, kg/m³)	1567	1567	1459	1594	1594	1594
Grandezze misurate						
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-	1559	-	-
Spandimento d1 (mm)	130	-	370	210	200	170
Spandimento d2 (mm)	130	-	375	205	195	170
Consistenza (%)	30	-	272,5	107,5	97,5	70
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-	1528	-	-



Getto in acqua	no	no	no
Acqua di impasto solfatica	sì	sì	sì
Tipo terreno	Arg-2*	Arg-2*	Arg-2*
Tipo di vagliatura	manuale	manuale	manuale
Tipo di miscela	cementizia	cementizia	cementizia
Numero getto	M114-2	M114-2	M114-2
Data	26/05/06	26/05/06	26/05/06
Tempo trascorso dal confezionamento (minuti)	70	110	135
Masse aggiunte al getto			
Terreno umido (kg)	-	-	-
Acqua aggiunta (kg)	-	-	-
Cemento (kg)	-	-	-
Sabbia (kg)	-	-	-
Grandezze calcolate			
Umidità terreno (%)	0	0	0
Umidità sabbia (%)	-	-	-
Terreno secco (kg)	6,376	6,376	6,376
Cemento (kg)	2,372	2,372	2,372
Sabbia secca (kg)	-	-	-
Acqua da terreno (kg)	-	-	-
Acqua totale aggiunta (kg)	6,376	6,376	6,376
Acqua complessiva (kg)	6,376	6,376	6,376
Massa totale (kg)	15,124	15,124	15,124
Rapporto a/ (terreno+sabbia)	1,000	1,000	1,000
Rapporto a/c	2,688	2,688	2,688
Stima volumi			
Terreno secco (litri)	2,36	2,36	2,36
Acqua totale (litri)	6,38	6,38	6,38
Cemento (litri)	0,75	0,75	0,75
Sabbia (litri)	-	-	-
Totale (litri)	9,49	9,49	9,49
Stima dosaggi			
Terreno secco (kg/m³)	672	672	672
Acqua (kg/m³)	672	672	672
Cemento (kg/m³)	250	250	250
Sabbia (kg/m³)	-	-	-
Densità (kg/m³)	1594	1594	1594
Grandezze misurate			
Densità fresco (kg/m³)	-	-	-
Spandimento d1 (mm)	150	140	115
Spandimento d2 (mm)	145	140	115
Consistenza (%)	47,5	40	15
Svuotamento imbuto (sec)	-	-	-
Densità indurito (kg/m³)	-	-	-