



**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, 30 marzo 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, 30 marzo 2006

Questa relazione fa riferimento all'incarico 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, conferito dal comune di Santa Brigida, con delibera n°148 del 14 giugno 2005, 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. 5
2. REQUISITI	pag. 6
3. PROVE EFFETTUATE	pag. 8
3.1 Materiali utilizzati	pag. 8
3.1.1 Cemento	pag. 8
3.1.2 Pozzolana	pag. 8
3.1.3 Terreni	pag. 8
3.1.4 Aggregati	pag. 11
3.1.5 Additivi	pag. 12
3.2 Fasi del lavoro	pag. 12
3.3 Prove per la caratterizzazione delle miscele	pag. 14
4. FASE PRELIMINARE	pag. 16
4.1 Miscela proposta e modifiche	pag. 16
4.2 Miscele fluidificate	pag. 18
4.3 Miscele CLSM	pag. 22
4.4 Scelta del tipo di miscela	pag. 23
5. DEFINIZIONE DELLA MISCELA	pag. 24
5.1 Variabilità del terreno	pag. 24
5.2 Riproducibilità	pag. 28
5.3 Impiego di sabbia	pag. 31
5.4 Sistema di miscelazione	pag. 32
6. CONCLUSIONI	pag. 33
RIFERIMENTI	pag. 35



1. PREMESSA

Il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano è stato incaricato dal comune di Santa Brigida (in provincia di Bergamo) di effettuare uno 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 metri 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, 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 descrive i risultati relativi alla fase preliminare di studio, nell'ambito del quale sono state effettuate prove di lavorabilità finalizzate alla valutazione delle proprietà reologiche di miscele cementizie da utilizzare per il riempimento della cava Carale. Si è considerato come punto di partenza il precedente studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIS) del Politecnico di Milano sotto la guida del Prof. R. Nova. In particolare sono state verificate, in fase preliminare, le proprietà reologiche della miscela, confezionata con cemento, acqua, pozzolana e terreno, e indicata nella relazione, redatta dal DIS il 5 aprile 2005 [3], potenzialmente idonea dal punto di vista delle proprietà meccaniche al consolidamento della cava Carale. Sulla base delle considerazioni e osservazioni emerse dalla caratterizzazione della miscela di riferimento sono state individuate possibili modifiche da apportare alla composizione della miscela in relazione ai requisiti sia di lavorabilità e colabilità, sia di prestazioni meccaniche, oltre alle esigenze di messa in opera. 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 vengono richiamati i requisiti richiesti alla miscela da studiare, nel paragrafo 3 viene descritta la metodologia di prova seguita in questo studio mentre nei capitoli 4 e 5 si discutono i risultati ottenuti dalle prove finalizzate alla definizione della composizione della miscela di riempimento.

2. REQUISITI

Nelle riunioni preliminari, alla presenza del Sig.re Giovanni Giuseppe Regazzoni (Sindaco del comune di Santa Brigida), del dott. Mario Spada, dott. Gian Marco Orlandi e ing. Luca Budelli (per lo Studio associato di geologia Spada), del Prof.re Roberto Nova e ing. Riccardo Castellanza (del Dipartimento di Ingegneria Strutturale) e del Prof.re Luca Bertolini e 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 [1] e le condizioni reali di intervento [2].

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. In base ai requisiti evidenziati, si è deciso di confezionare una miscela cementizia con un modesto dosaggio di cemento utilizzando terreni limosi-argillosi-sabbiosi che potrebbero essere reperiti dagli scavi edili nel territorio di Santa Brigida.

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 avranno 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 [3], ha proposto per il riempimento delle gallerie, sulla base di preliminari risultati. Il lavoro precedentemente ha riguardato, infatti, solo la caratterizzazione meccanica di alcune miscele di cui si riportano in Tabella 2.1 le composizioni.

Tabella 2.1 - Composizione e denominazione delle miscele cementizie studiate nell'ambito di un lavoro di ricerca condotto dal DIS [3].

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

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

3. PROVE EFFETTUATE

Sono state svolte prove sperimentali volte allo sviluppo di una miscela cementizia che fosse adatta per il riempimento delle gallerie dell'ex cava di gesso in località Carale del comune di

S. Brigida. La caratterizzazione delle miscele confezionate ha riguardato sia le proprietà allo stato fresco sia quelle allo stato indurito.

3.1 Materiali utilizzati

Per il confezionamento delle diverse miscele cementizie studiate sono stati utilizzati i materiali descritti nei paragrafi successivi.

3.1.1 Cemento

Si è utilizzato un cemento tipo UNI EN 197-1 CEM II/B-LL 32.5R. Si tratta di un cemento portland al calcare con una percentuale di calcare compresa fra 21 e 35%.

3.1.2 Pozzolana

Si è utilizzata una pozzolana prelevata dai terreni della cava “Rossolera” del comune di Borgo Priolo (Pavia). La Figura 2.1 riporta la distribuzione granulometrica della pozzolana che presenta particelle che per il 70% hanno un diametro variabile fra 100 e 1 μm . La Figura 2.2 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 tre diversi tipi di terreno, due dei quali provenienti dal comune di Santa Brigida (indicati con la sigla *Arg1* e *Arg1**) di colore chiaro, mentre un terzo (*Arg2*) prelevato a Dossena (comune vicino a Santa Brigida) di colore più scuro. Si tratta di materiali sciolti costituiti, secondo percentuali variabili, da limo, argilla e sabbia, e in quantità minori da frammenti più grossolani. I terreni *Arg1* e *Arg2* presentano distribuzioni granulometriche simili e confrontabili con la pozzolana. Si misurano per i terreni *Arg1* e *Arg2* rispettivamente diametri mediani (d_{50}) pari a 9 e 15 μm . Il terreno *Arg1**, più grossolano, presenta un d_{50} di 70 μm .

In Tabella 2.2 sono riportate le composizioni di ciascun terreno e le loro principali caratteristiche di consistenza, espresse in termini di limite di plasticità, fornite dal Dipartimento DIS. 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%. In termini di plasticità, il terreno *Arg1* ha il valore più elevato di indice plastico (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 2.3).

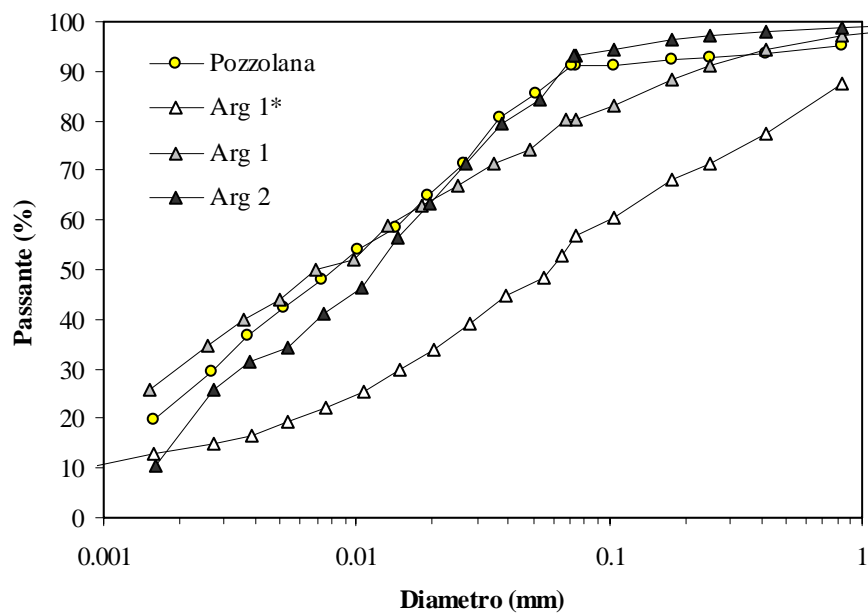


Figura 2.1 - Distribuzione granulometrica della pozzolana e dei terreni utilizzati per confezionare le miscele cementizie [3].



Figura 2.2 - Campione tal quale di pozzolana (a) e del terreno sciolto proveniente da Santa Brigida (b).



Figura 2.3 - Campione tal quale del terreno sciolto proveniente da Dossena.

Tabella 2.2 - Riepilogo delle principali caratteristiche dei terreni (prove effettuate dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale).

Materiali	Terreno S. Brigida	Terreno S. Brigida*	Terreno Dossena
Denominazione	Arg1	Arg1*	Arg2
Limo (%)	48	36	70
Sabbia (%)	22	50	12
Argilla (%)	30	14	18
Limite liquido (%)	50	24	42
Limite plastico (%)	24	17	25
Indice di plasticità (%)	26	8	17

3.1.4 Aggregati

Per il confezionamento di una miscela si è utilizzato 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 2.4). In Figura 2.5 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 utilizzata, secondo le seguenti percentuali: 53% di polvere, 26% di Calc1 e 21% di Calc2.

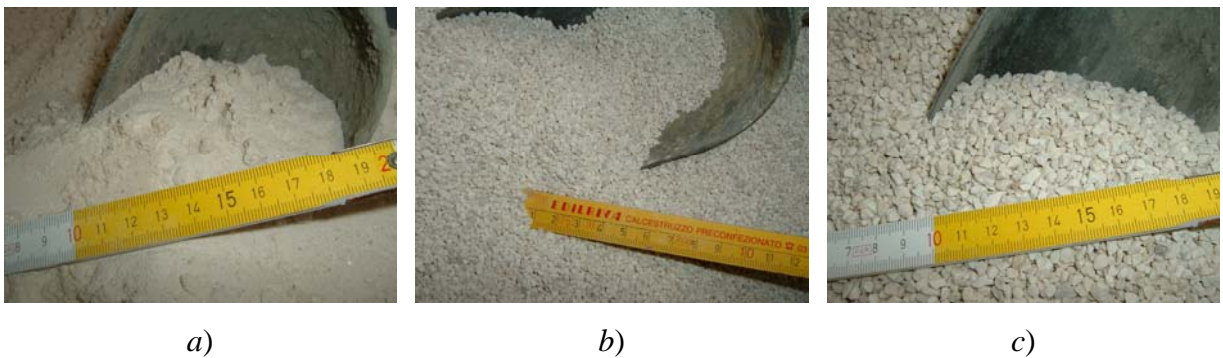


Figura 2.4 - Frazioni granulometriche dell'aggregato calcareo: Polv, a), Calc1 b) e Calc 2 c).

Per un'altra miscela si è utilizzato un aggregato tondeggiante (di origine alluvionale proveniente dal Po) prodotto da Sataf, suddiviso in diverse frazioni (Figura 2.6).

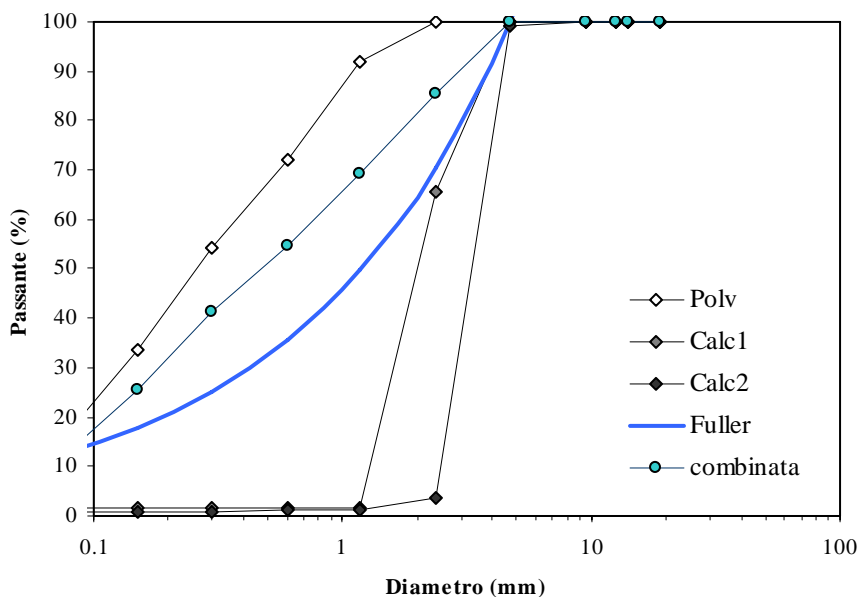


Figura 2.5 - Distribuzione granulometrica degli aggregati calcarei frantumati.

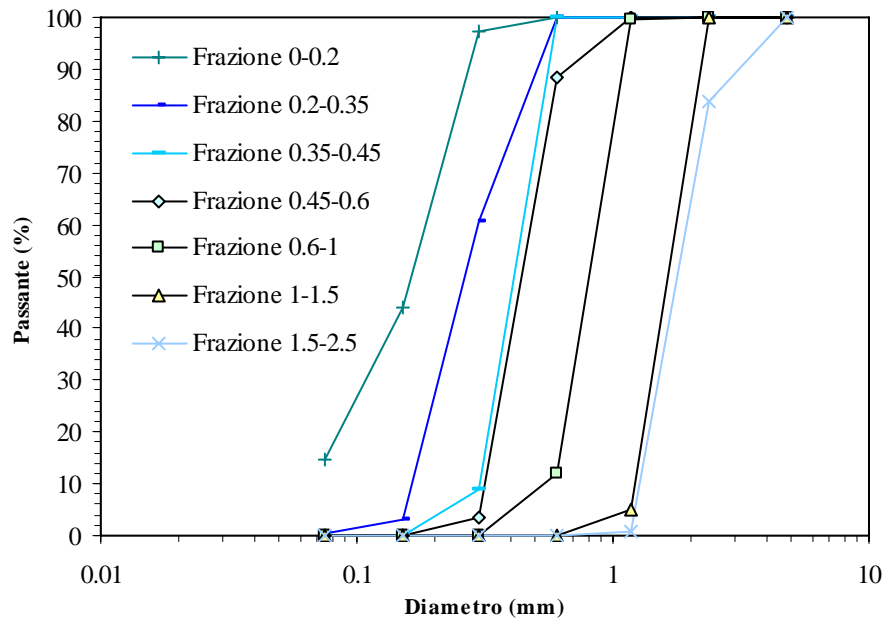


Figura 2.6 - Distribuzione granulometrica degli aggregati tondeggianti.

3.1.5 Additivi

Si è utilizzato l'additivo superfluidificante Dynamon SP3, a base acrilica prodotto dalla Mapei. Come aeranti sono stati utilizzati:

- l'additivo liquido Xarlon 95, fornito da Tecnochem;
- l'additivo in polvere Mapeplast LA, fornito da Mapei.

Gli additivi sono stati aggiunti all'impasto secondo le dosi indicate dai produttori.

3.2 Fasi del lavoro

Il lavoro si è articolato in due 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 evidenziare 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 costituenti al fine di ottenere un impasto che soddisfi i requisiti di lavorabilità.

Sulla base dei requisiti stabiliti in fase preliminare e dei risultati ottenuti 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 2.3 sono riepilogati i getti delle miscele cementizie con la loro denominazione e la data di confezionamento.

Tabella 2.3 - Riepilogo dei getti effettuati e loro denominazione.

Fase di lavoro	Sigla di getto	Data confezionamento	Costituenti	Condizione del terreno	Rapporto a/c
I	M85	17/06/2005	Cemento, pozzolana, acqua e terreno <i>Arg1</i>	Secco, passante a 4.75 mm o	5
	M85-A				5.8
	M85-B				7
	M85-C		Cemento, pozzolana, acqua, terreno <i>Arg1</i> e additivi (fluidificante e aerante)	Secco, passante a 4.75 mm	7
	M86		Cemento, aggregato frantumato, acqua e additivo aerante.	-	1.5
	M88	05/07/2005	Cemento, aggregato tondeggiate, acqua e additivo aerante.	-	1.5
	M87-1		Acqua, terreno <i>Arg1</i> e cemento	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	Umido, no vagliatura	4.2	
II	M90-7	20/07/2005	Acqua, terreno <i>Arg1</i> e cemento	Secco, passante a 4.75 mm	4.3
II	M90-8	20/07/2005			4.7
II	M91-11	27/07/2005	Acqua, terreno <i>Arg2</i> e cemento	Umido, no vagliatura	3.9
II	M92-5	23/09/2005	Acqua, terreno <i>Arg1</i> * e cemento		3.8
II	M93-7	05/10/2005		Umido, passante a 4.75 mm	3.9
II	M93-8	05/10/2005			4.4

Continua tabella 2.3

II	M94-9	02/11/2005	Acqua, terreno Arg2 e cemento	Umido, no vagliatura	4.9
	M95-3 ^				
	M96-8	17/11/2005	Acqua, terreno Arg2, aggregato frantumato e cemento.		4.02
	M97-6	24/11/2005	Acqua, terreno Arg1* e cemento	Umido, passante a 4.75 mm	3.65
	M98-2	02/12/2005	Acqua, terreno Arg2 e cemento	Umido, no vagliatura	4.7

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

3.3 Prove per la caratterizzazione delle miscele

La caratterizzazione delle miscele ha riguardato:

- la lavorabilità allo stato fluido;
- la valutazione della percentuale di aria intrappolata/inglobata e della massa volumica;
- la valutazione della resistenza a compressione.

La lavorabilità 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 sottoposto la miscela a 15 colpi, secondo quanto stabilito dalla norma UNI 7044-72 (Figura 2.7).

Per verificare che la miscela abbia caratteristiche di colabilità, si è simulata in scala ridotta, la fase di riempimento delle gallerie (figura 2.8) 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. 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 solfatica, la miscela è stata gettata, mediante il tubo, anche nel contenitore parzialmente riempito di acqua.

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; mediante un manometro si legge direttamente la percentuale di aria in esso 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.

Per le prove di caratterizzazione meccanica sono stati confezionati provini prismatici di dimensioni $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ (Figura 2.9a). La massa volumica del materiale indurito è stata calcolata mediante pesatura dei provini prismatici. Le misure sono state fatte subito dopo lo scassero e prima di ogni prova di compressione (Figura 2.9b) a diversi tempi di stagionatura a umido (1, 7, 28 e 90 giorni).



Figura 2.7 - Valutazione della lavorabilità di una miscela mediante prova con tavola scossa (a) e misura dello spandimento (b).

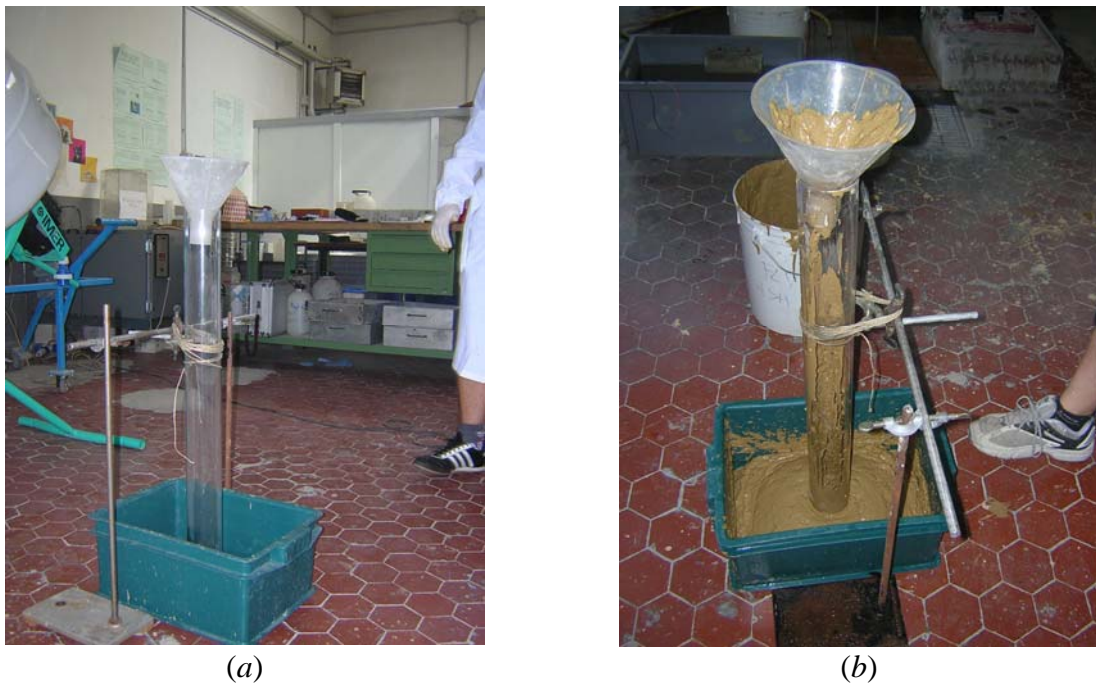


Figura 2.8 - Valutazione della colabilità di una miscela gettata dall'alto mediante un tubo all'interno di un contenitore (a) ed esempio di risultato (b).

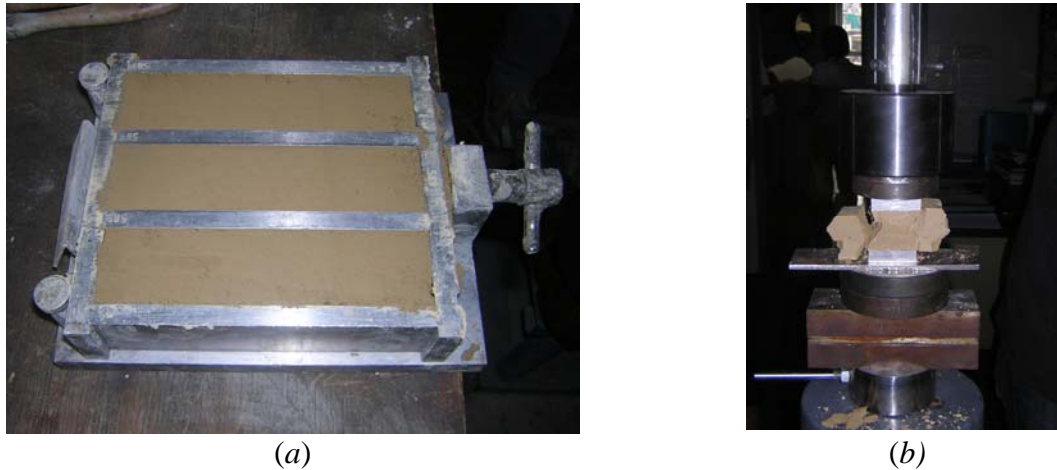


Figura 2.9 - Cassero per confezionare provini prismatici (a) utilizzati per la prova di resistenza a compressione (b).

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 l'area della superficie sollecitata durante la prova (1600 mm²).

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. Inizialmente è stata confezionata una miscela, analoga a quella proposta da un precedente lavoro, 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).

4.1 Miscela proposta e modifiche

Per confezionare la miscela 5 (§2) sono stati mescolati, secondo i dosaggi indicati in Tabella 2.3, cemento, acqua, terreno *Arg1* e pozzolana; l'impasto confezionato presenta un rapporto acqua/cemento (*a/c*) pari a 5.

Getto M85. È stata confezionata la miscela indicata con la sigla M85 di composizione analoga alla miscela 5 (Tabella 2.1). Un volume di impasto di 2.5 litri è stato ottenuto miscelando (Tabella 2.4) 80 kg/m^3 di cemento CEM II/B-LL 32.5R, 400 kg/m^3 acqua, oltre a 1000 kg/m^3 di terreno Arg1 e 500 kg/m^3 di pozzolana (entrambi vagliati con un setaccio con diametro pari a 4.75 mm). L'impasto M85 non è lavorabile e non presenta alcuna fluidità. 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.

Tabella 2.4 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti dai getti preliminari.

Sigla	M85	M85-A	M85-B	M85-C
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 Arg1 (kg/m^3)	1000	938	858	858
Tipo di aggregato	-	-	-	-
Aggregato (kg/m^3)	-	-	-	-
Additivo superfluidificante (kg/m^3)	-	-	-	26
Additivo aerante (kg/m^3)	-	-	-	1.1
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
$R_{c,2\text{giorno}}$ (MPa)	-	-	-	-
$R_{c,7\text{giorni}}$ (MPa)	-	0.73	-	0.32-0.34
$R_{c,28\text{giorni}}$ (MPa)	-	0.86-0.90	-	0.35-0.42
$R_{c,90\text{giorni}}$ (MPa)	-	-	-	0.86-0.89

Il modesto aumento del dosaggio d'acqua (437 kg/m^3 rispetto a 400 kg/m^3) non ha sostanzialmente modificato le caratteristiche allo stato fresco dell'impasto, indicato in tabella 2.4, con la sigla M85-A. La Figura 2.10 evidenzia la scarsa consistenza dell'impasto M85-A a causa della quale si sono complicate le operazioni di confezionamento e costipazione di 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/m^3 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 (§3.3).

Al fine di ottenere una miscela fluida si è tentato anche l'impiego di additivi superfluidificanti e aeranti. All'impasto si è inizialmente 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.

L'effetto è analogo in seguito all'aggiunta di un additivo aerante (1.1 kg/m^3) che non è risultato efficace e ha permesso di inglobare una percentuale di aria pari a solo 2% e conferire all'impasto una densità di 1802 kg/m^3 . Seppure l'impasto sembra avere una consistenza spugnosa (Figura 2.11a), non manifesta alcuno spandimento nella prova alla tavola a scosse (Figura 2.11b).

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 2.4) risulta che la miscela con rapporto a/c pari a 5.8 presenta, dopo una settimana di stagionatura, resistenze a compressione medie modeste 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 del 50%; si sono misurate mediamente resistenze pari a 0.33 e 0.38 MPa, rispettivamente dopo 7 e 28 giorni di stagionatura.

4.2 Miscela fluidificate

Tra le modifiche da apportare alla miscela di riferimento si è considerata anche la completa sostituzione della pozzolana con del terreno.



Figura 2.10 - Confezionamento di provini prismatici con la miscela M85-A.



(a)



(b)

Figura 2.11 - Impasto M85-C (a) sottoposto alla prova di consistenza con la tavola a scosse (b).

Si sono effettuati, quindi, diversi getti per verificare la possibilità di confezionare impasti realizzati con solo cemento, acqua e terreno. L'esperienza suggerisce che, per poter realizzare miscele di questo tipo, è necessario fluidificare inizialmente terreno con acqua e, solo quando si è ottenuto un impasto omogeneo, si procede all'aggiunta di cemento.

Getto M87. Per ottenere la miscela M87-1 si sono miscelati 1160 kg/m^3 di terreno, precedentemente essiccato e vagliato con un setaccio di apertura pari a 4.75 mm , con 540 kg/m^3 di acqua (tabella 2.5) sino a ottenere un impasto omogeneo. A tale scopo si è utilizzato un "agitatore" meccanico che ha reso più efficace la miscelazione. Successivamente si è aggiunto cemento (97 kg/m^3) ottenendo una miscela con rapporto a/c pari a 5.5 che presenta una maggiore lavorabilità rispetto alle miscele precedenti; si è, infatti, misurato uno



spandimento medio di 170 mm corrispondente a una consistenza del 70%. Con tale miscela sono stati confezionati provini prismatici sottoposti a prove di compressione dopo 2, 7, 22 e 90 giorni di stagionatura. Per la miscela, che indurita presenta una densità media di 1656 kg/m³, si sono misurate resistenze a compressione modeste. Dopo 2 giorni di stagionatura la resistenza media a compressione è pari a 0.11 MPa; con il procedere dell'idratazione si raggiungono resistenze superiori (0.76 MPa dopo 28 giorni).

Tabella 2.5 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M87 e M89.

Sigla	M86	M88	M87-1	M87-2	M87-3	M89-7
Data getto	17/06/2005	05/07/2005	05/07/2005	05/07/2005	07/07/2005	07/07/2005
Cemento (kg/m ³)	145	145	97	195	146	129
Acqua (kg/m ³)	218	218	540	524	531	649
Tipo di terreno	-	-	<i>Arg1</i>	<i>Arg1</i>	<i>Arg1</i>	<i>Arg2</i>
Umidità terreno (%)	-	-	0	0	0	21.2
Vagliatura	frantumato	tondeggiante	passante a 4.75 mm	passante a 4.75 mm	passante a 4.75 mm	no
Terreno secco (kg/m ³)	1900	1900	1160	1119	1142	836
Acqua / terreno (a/t)	-	-	0.47	0.47	0.47	0.78
Acqua / cemento (a/c)	0.2	0.5	5.57	2.68	3.64	5
Spandimento D ₁ (mm)	-	-	170	175	165	153
Spandimento D ₂ (mm)	1.5	1.5	170	175	165	153
Consistenza (%)	-	-	70	75	65	53
Densità fresco (kg/m ³)	2228	1606	-	-	1824	1552
Aria (%)	8	28	-	-	2.2	1
Densità indurito (kg/m ³)	-	0.33-0.38	1656	1787	1826	1522
R _{c,2giorno} (MPa)	-	0.50-0.66	0.11	0.37-0.38	-	-
R _{c,7giorni} (MPa)	-	1.12-1.13	0.26	0.60-0.61	0.55-0.58	0.75-0.80
R _{c,28 giorni} (MPa)	-	-	0.72-0.76 ^(^)	0.70-0.71 ^(^)	0.78-0.90	1.19-1.28 ^(^)
R _{c,90 giorni} (MPa)	M86	M88	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.

Anche a lunghe stagionature non si superano resistenze di 1 MPa. 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 contenuti di cemento superiori a M87-1 (pari a 146 e 195 kg/m^3) e un rapporto acqua/cemento (a/c) rispettivamente pari a 3.64 e 2.68.

Rispetto alla miscela M87-1, la lavorabilità delle miscele M87-3 e M87-2 è leggermente inferiore; 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 (Figura 2.12).

Getto M89. Per valutare 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 1380 kg/m^3 di terreno *Arg2* con 597 kg/m^3 di acqua ottenendo un impasto (M89-4) con consistenza pari a 32.5%. Non avendo l'impasto un'adeguata lavorabilità, si è aggiunta altra acqua (in totale 0.76 litri) alla miscela che ha conferito una consistenza di 77.5% (M89-6).

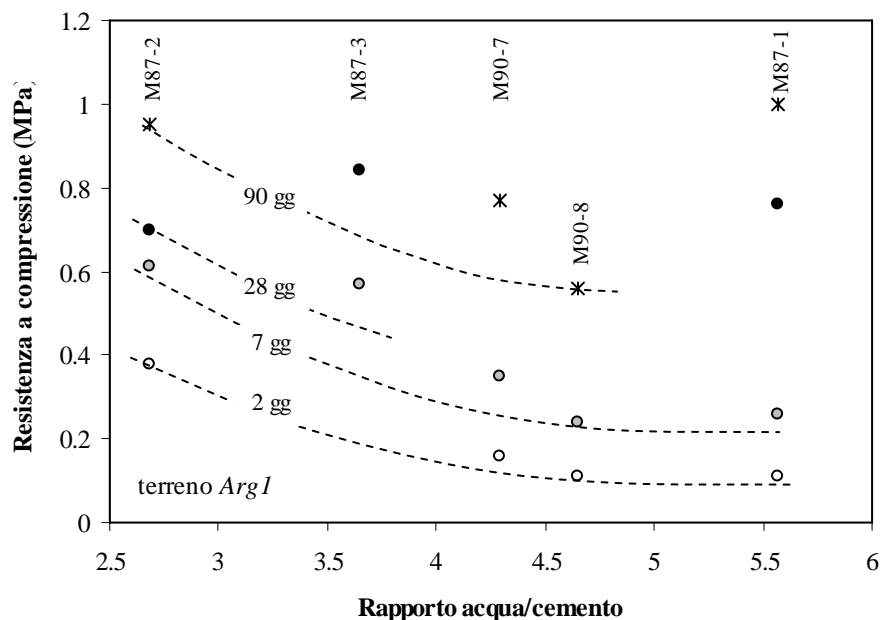


Figura 2.12 - Andamento della resistenza a compressione delle miscele cementizie, confezionate con terreno *Arg1*, in funzione del rapporto acqua/cemento (a/c) (a diversi tempi di stagionatura: 2, 7, 28 e 90 giorni). Le linee tratteggiate indicano i valori minimi ottenuti.

Per raggiungere una lavorabilità confrontabile con quella delle miscele M87, è stato necessario utilizzare, prima ancora di aggiungere cemento, un quantitativo di acqua superiore. A parità di lavorabilità, l'impiego del terreno *Arg2* comporta una richiesta di acqua superiore. In effetti, il terreno *Arg2*, a differenza dei terreni provenienti da Santa Brigida, è costituito in prevalenza (70%) da limo (Tabella 2.2) che, rispetto a argilla e sabbia, presenta particelle con superficie specifica maggiore. Ne consegue un limite plastico inferiore rispetto a quello dei terreni *Arg1* e *Arg1**. Con l'aggiunta di cemento (129 kg/m^3) la miscela M89-7 subisce una diminuzione della fluidità (Tabella 2.5) che è stata compensata solo prevedendo un maggior dosaggio di acqua. Malgrado la miscela M89-7 presenti un rapporto a/c superiore a quello delle miscele 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 ad un effetto filler del terreno *Arg2* che, grazie alla sua maggior finezza, contribuisce a rendere più compatta la miscela cementizia.

4.3 Miscela CLSM

In base ai requisiti di lavorabilità richiesti si è considerata anche l'ipotesi di confezionare un diverso genere di miscele che, secondo la classificazione proposta dall'American Concrete Institute, 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). 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 M86. È stata confezionata la miscela M86 secondo le seguenti proporzioni: 145 kg/m^3 di cemento, 218 kg/m^3 di acqua, 1900 kg/m^3 di aggregato e 0.2 kg/m^3 di additivo aerante

Xarlon. Tale miscela ha inglobato una modesta percentuale di aria (solo 8%) che ha avuto scarsa influenza sulle proprietà di lavorabilità.

Getto M88. In base ai risultati ottenuti dalla miscela M86, si è deciso di confezionare un impasto con analoga composizione (M88) ma con un aggregato tondeggiante, al posto di quello frantumato, e un additivo aerante in polvere in dosaggi superiori (0.5 kg/m^3 di Mapeplast). In particolare per tale miscela si è utilizzato l'aggregato tondeggiante prodotto da Sataf (§3.1.4), suddiviso in diverse frazioni (Figura 2.6) impiegate nelle seguenti percentuali: 9% della frazione con diametro massimo pari a 0.2 mm, 14% della frazione con particelle con diametro compreso fra 0.2 e 0.35 mm, 9% della frazione granulometrica compreso fra 0.2 e 0.35 mm, 9% della frazione granulometrica compreso 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

I getti preliminari 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 troppo 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 in quanto, pur presentando tale miscela una lavorabilità migliore rispetto a quella di altre miscele confezionate in questa fase preliminare della ricerca, le proprietà reologiche non sono comunque sufficientemente adeguate all'applicazione oggetto di studio. Inoltre, i maggiori

costi di produzione e approvvigionamento dei materiali necessari per il confezionamento del CLSM (soprattutto della sabbia) costituiscono un altro motivo per escludere l'impiego di un CLSM. In base a tali considerazioni si è deciso di proseguire lo studio sperimentare 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 preliminari suggeriscono di confezionare miscele cementizie con un dosaggio di cemento intorno a 150 kg/m^3 .

5. DEFINIZIONE DELLA MISCELA

I getti M87 e M89 hanno permesso di verificare la possibilità di confezionare miscele cementizie con solo acqua e terreno. Tuttavia, per utilizzare questo genere di miscela per il riempimento delle gallerie oggetto di studio, è necessario valutare in che proporzioni 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 terreni di diversa provenienza, a parità di caratteristiche finali della miscela. Infine si è verificata la riproducibilità dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione delle diverse miscele.

5.1 Variabilità del terreno

Sono stati effettuati alcuni getti (M90 – M93) per verificare come i diversi parametri di progetto della miscela (rapporto acqua/terreno (a/t) e tipo di terreno) influenzano la lavorabilità dell'impasto,.

Getto M90. Per il getto M90 si è utilizzato inizialmente un dosaggio di 1388 kg/m^3 di terreno *Arg1* che è stato miscelato con progressive aggiunte di acqua, in concomitanza alle quali è stata effettuata la prova di lavorabilità alla tavola a scosse. I risultati di consistenza ottenuti da tale prova sono stati valutati in funzione del rapporto a/t . In particolare, la Figura 2.13 riporta per ogni getto (dal 90 sino al 98) l'andamento della consistenza in funzione del rapporto a/t per le miscele di acqua e terreno e per quelle ottenute con finale aggiunta di cemento (Tabelle 2.6-2.7). Nel seguito le miscele parziali di un medesimo getto verranno indicate con la sigla del getto e un numero progressivo. Riguardo al getto 90, si osserva in Figura 2.13 come all'aumentare del contenuto di acqua si misura proporzionalmente un incremento percentuale

di consistenza. Per ottenere un impasto fluido si sono miscelati 985 kg/m^3 di terreno con 591 kg/m^3 di acqua (M90-6); si è misurata, infatti, una consistenza pari a 132%. 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 (§3.3). Si è osservato che il materiale fluisce rapidamente nel tubo, riempiendo completamente il contenitore. Purtroppo l'aggiunta di cemento alla miscela M90-7 rende meno fluido l'impasto (M90-7) che presenta, infatti, una consistenza del 90% (Tabella 2.6). Ripetendo la prova di colabilità sulla miscela M90-7 si è osservato che tale consistenza non è sufficiente per poter iniettare il materiale all'interno delle gallerie. Successivamente si è aggiunta altra acqua riportando la miscela ad una consistenza pari a 108%. Tale miscela (M90-8) è stata sottoposta alla prova di colabilità; in questo caso però la miscela è stata gettata in un contenitore parzialmente riempito di acqua per verificarne, oltre alle proprietà di colabilità, la mobilità in presenza di acqua, simulando in tal modo la condizione di getto in una galleria parzialmente allagata. Si è osservato che tale consistenza consente alla miscela di scorrere all'interno del tubo. Inoltre, grazie ad una massa volumica superiore e alla spinta gravitazionale, la miscela ha spostato l'acqua e si è depositata sul fondo del contenitore.

In base alle diverse prove di lavorabilità si è definito come requisito di lavorabilità per le miscele da sperimentare una consistenza almeno del 100%.

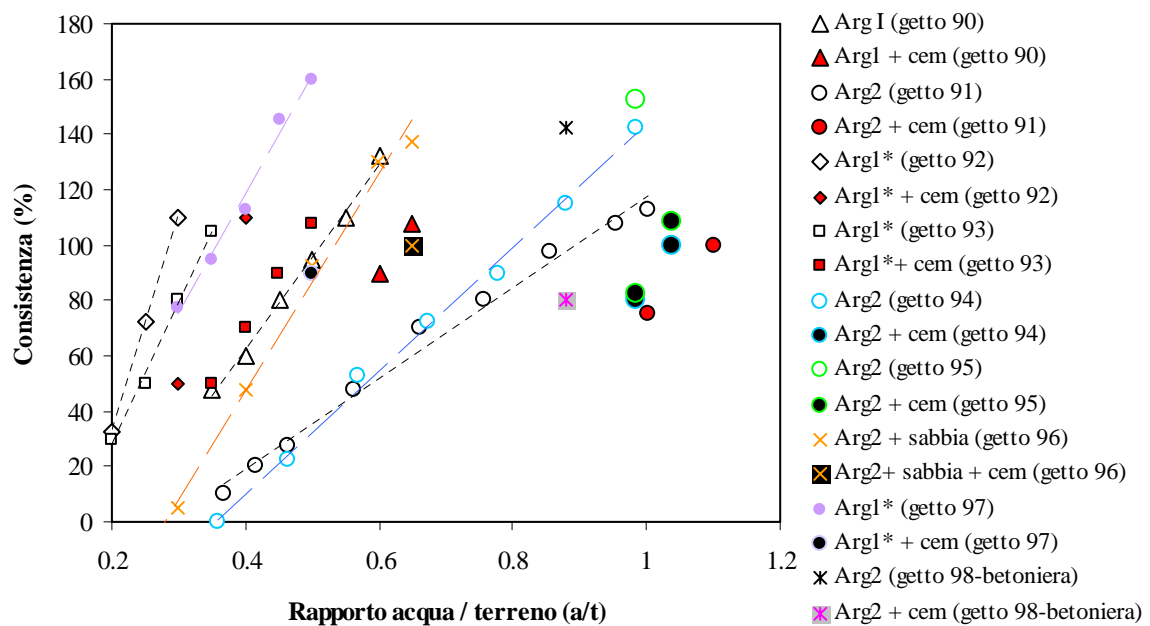


Figura 2.13 - Andamento della consistenza delle miscele in funzione del rapporto acqua/terreno (a/t).

Tabella 2.6 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M90, M91, M92 e M93.

Sigla	M90-7	M90-8	M91-11	M92-5	M93-7	M93-8
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	21.2	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	4.45
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,2giorno} (MPa)	0.16	0.11-0.12	0.26-0.28	-	0.19-0.20	0.14-0.15
R _{c,7giorni} (MPa)	0.35-0.36	0.24-0.25	-	0.30-0.33	0.29-0.33	0.24-0.25
R _{c,28 giorni} (MPa)	-	-	-	0.51-0.56	0.54-0.58	0.40-0.41
R _{c,90 giorni} (MPa)	0.75-0.78	0.56	1.20-1.39	0.41-0.42	-	0.35-0.37

In termini di resistenza a compressione, per le miscele M90-7 e M90-8 si sono misurati valori di 0.11-0.16 MPa dopo 2 giorni di stagionatura, 0.24-0.35 dopo una settimana e 0.56-0.77 dopo un mese (Figura 2.14).

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 diretto

fra consistenza percentuale e rapporto a/t . Inoltre, le prove hanno evidenziato la diversa lavorabilità che si può ottenere a seconda del terreno utilizzato. A parità di rapporto a/t , confrontando l'andamento relativo alla miscela ottenuta impastando acqua e terreno *Arg1* (getto M90) con quello ottenuto dal getto M91 (Figura 2.13), 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 una medesima consistenza. In effetti, per ottenere un impasto colabile, con consistenza superiore al 100%, sono stati miscelati 728 kg/m^3 di terreno *Arg2* con 730 kg/m^3 di acqua (M91-9); si è ottenuta, quindi, una miscela con rapporto a/t pari a 1.0 che si è dovuto incrementare a 1.1 in seguito all'aggiunta di cemento (M91-11). Tale miscela cementizia è stata gettata in un tubo, per buona parte immerso in un contenitore completamente riempito di acqua; la prova ha evidenziato come, per effetto del proprio peso, la miscela è in grado di riempire il contenitore e conseguentemente far fuoriuscire l'acqua che inizialmente era contenuta in esso. In seguito al processo di stagionatura ad umido, le prestazioni meccaniche raggiunte da provini 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 (Figura 3, vedi allegato A).

Getto M92. Il getto M92 è stato effettuato con il terreno *Arg1** che le analisi preliminari (§3.1.3) hanno evidenziato essere differente, in termini di composizione e distribuzione granulometrica, da *Arg1*, seppure entrambi provenienti da Santa Brigida. 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 *Arg1** prevalentemente sabbioso, è più grossolano rispetto agli altri. Ne è conseguita, a parità di rapporto a/t , una migliore lavorabilità dell'impasto. La miscela cementizia (M92-5) con consistenza del 110% è stata confezionata con un rapporto a/t pari a 0.3, inferiore a quello di tutte le miscele sino a questo momento confezionate, e un rapporto a/c pari a 3.8 (Tabella 2.6). 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 (Figura 4, Allegato A).

Getto M93. Visto che per il getto M90 si è utilizzato solo il passante a 4.75 mm del terreno *Arg1*, per effettuare un corretto confronto con tale getto, anche il terreno *Arg1**, prima di essere utilizzato, è stato sottoposto alla medesima vagliatura. Per quanto riguarda le proprietà allo stato fresco, dal grafico di Figura 2.13 si deduce che una consistenza superiore al 100% può essere raggiunta miscelando acqua con il passante del terreno *Arg1**, in proporzioni (*a/t*) pari a 0.35. 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. Per le rispettive miscele cementizie (M92-5 e M93-8), che presentano consistenze simili (110% e 108%), si sono ottenute prestazioni meccaniche confrontabili (Tabella 2.6), 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).

5.2 Riproducibilità

Per verificare la riproducibilità dei risultati ottenuti sono stati ripetuti alcuni dei precedenti getti. In tabella 2.7 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 2.13 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 rapporto *a/t* pari a 1.1 e 1.04 e rapporto *a/c* pari a 4.34 e 4.96, presentano una consistenza analoga (100%). In termini di prestazione meccaniche, per la miscela M91-11, confezionata con rapporto *a/c* inferiore rispetto a quello della miscela M94-9 (Figura 2.14), si ottengono già a 2 giorni prestazioni leggermente migliori, mediamente pari a 0.27 MPa.

Getto M95. Si è ripetuto il getto M94 con la sola differenza che acqua e terreno sono stati miscelati considerando direttamente i dosaggi finali (pari rispettivamente a 704 kg/m³ e 678 kg/m³, Tabella 2.7). A parte una difficoltà iniziale di miscelazione, che ha richiesto un tempo superiore per ottenere un impasto uniforme, non si sono notate in termini di lavorabilità sostanziali differenze, anche dopo l'aggiunta di cemento (Figura 2.13).

Tabella 2.7 - Riepilogo dei principali risultati ottenuti sulle miscele cementizie confezionate con i getti M94, M95, M96, M97 e M98.

Sigla	M94-9	M95-3	M96-8	M97-6	M98-2
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 (%)	15.4	15.4	15.4	0.1	154.4
Vagliatura	No	No	No	passante a 4.75 mm	No
Terreno secco (kg/m ³)	678	678	513	1094	762
Acqua / terreno (a/t)	1.04	1.04	0.65	0.50	0.88
Acqua / cemento (a/c)	4.96	4.96	4.02	3.65	4.45
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,2giorno} (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

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 confrontabile con quello del terreno rende, infatti, più difficoltoso lo “sminuzzamento” di quest’ultimo, a meno di utilizzare un sistema meccanico più efficace. Questo risultato sottolinea la necessità di individuare un adeguato sistema di miscelazione da adottare in cantiere.

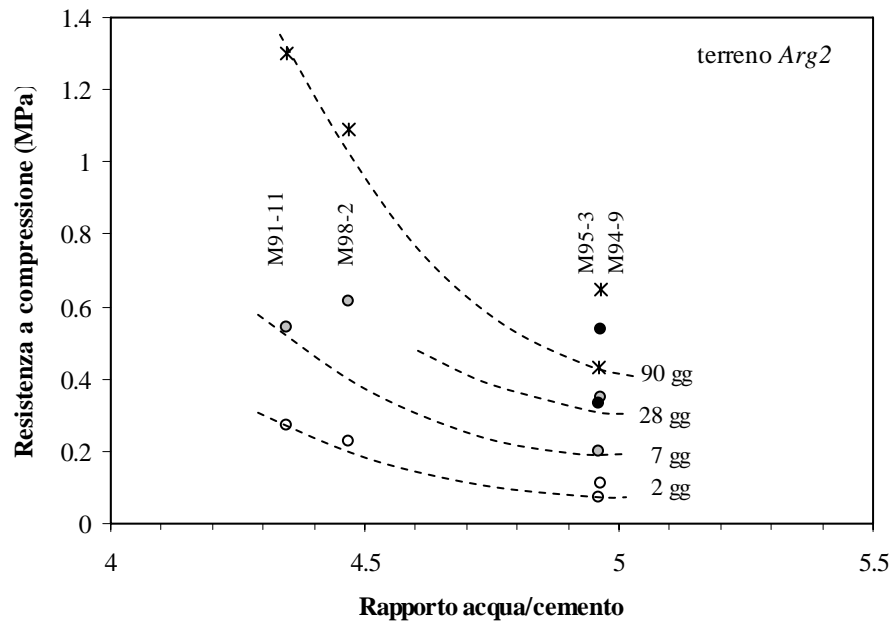


Figura 2.14 - Andamento della resistenza a compressione delle miscele cementizie, confezionate con terreno Arg2, in funzione del rapporto acqua/cemento (a/c) (a diversi tempi di stagionatura: 2, 7, 28 e 90 giorni). Le linee tratteggiate indicano i valori minimi ottenuti.

Inoltre, dalla Figura 2.14 si può notare come le miscele M95-3 e M94-9, pur avendo lo stesso rapporto a/c , mostrano un differente comportamento in termini di prestazioni meccaniche; infatti i valori di resistenza a compressione ottenuti per i provini confezionati con il getto M95-3 risultano inferiori a quelli del getto M94-9 alle diverse stagionature. Da questi risultati si deduce che una non adeguata miscelazione ha un effetto sulle proprietà finali del materiale.

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 2.13), 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. In termini di prestazioni meccaniche, per la miscela M97-3 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 (vedi allegato A).

5.3 Impiego di sabbia

Tenendo conto della diversità dei terreni sinora considerati, si è valutato come garantire una certa riproducibilità delle caratteristiche di questo costituente, la cui provenienza potrà variare in quanto il suo approvvigionamento è garantito dalle operazioni di scavo edile effettuate nelle vicinanze della zona di intervento. Considerando che il volume totale di gallerie da riempire è di circa 60.000 m³ e, conseguentemente, la quantità di materie prime necessarie è ingente, è molto elevata la probabilità che vengano impiegati terreni con caratteristiche diverse. In particolare, 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*. La maggior finezza del terreno *Arg2* implica, infatti, una maggiore richiesta di acqua. Conseguentemente, nel caso si utilizzi terreno *Arg2*, è necessario aumentare anche il dosaggio di cemento per confezionare miscele aventi prestazioni meccaniche analoghe a quelle di miscele con *Arg1*. L'utilizzo di terreni diversi incide quindi diversamente sui costi di confezionamento della miscela. Un terreno con distribuzione granulometrica confrontabile con quella del terreno *Arg1** appare, quindi, 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 (§3.1.4) per ottenere un materiale con distribuzione granulometrica confrontabile con quella del terreno *Arg1** (Figura 2.15). 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 (§3.1.4). Dalla Figura 2.15 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 da tale getto sono stati confrontati con quelli del getto M92 confezionato con *Arg1**.

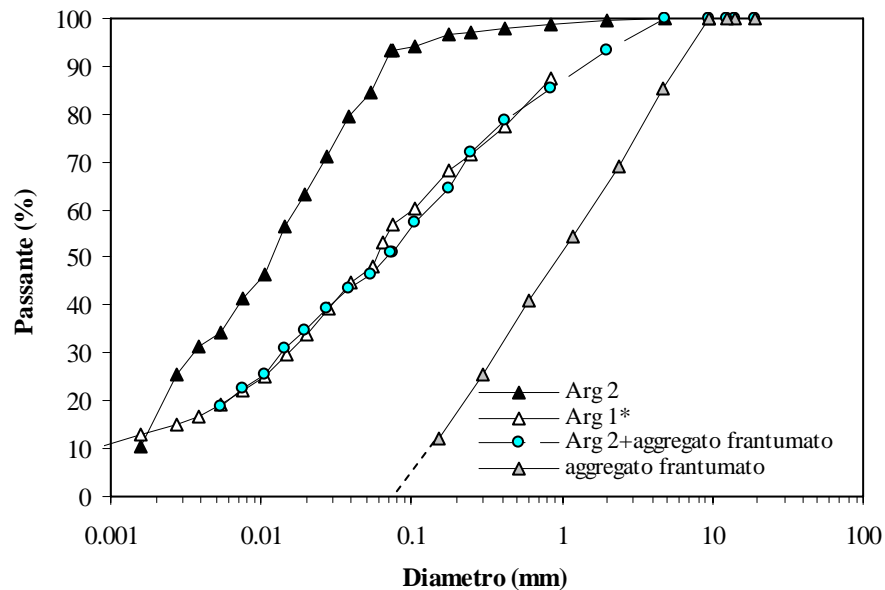


Figura 2.15 – Distribuzione granulometrica della combinazione dell'aggregato frantumato con il terreno *Arg2*.

Dalla Figura 2.13 si osserva che per il getto 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. Tuttavia, si nota come la pendenza della curva che lega la consistenza percentuale e il rapporto a/t del getto M96 è analoga a quella dei getti con *Arg1**. La traslazione dell'andamento della consistenza relativamente al getto M96 rispetto al getto M92, e quindi la maggiore richiesta iniziale di acqua, potrebbe essere attribuibile all'assorbimento della sabbia utilizzata in combinazione del terreno *Arg2*.

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 utilizzi il terreno *Arg2*. In termini di resistenza a compressione si ottengono valori pari a 0.07 MPa, dopo 1 giorno di stagionatura, e 0.33 MPa dopo una settimana (Tabella 2.7).

5.4 Sistema di miscelazione

Tenendo conto delle reali condizioni di getto, si è evidenziata l'importanza del sistema di miscelazione effettuando un getto di volume superiore, rispetto a quelli sinora considerati, e adottando un sistema di miscelazione diverso.

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 confrontabili con quelle delle miscele ottenute con i getti M94 e M95 (Figura 2.13). Successivamente si è aggiunto cemento (150 kg/m^3) ottenendo un impasto con rapporto a/c pari a 4.47. Tale miscela mostra resistenze meccaniche pari a 0.23 e 0.61 MPa, rispettivamente dopo 2 e 7 giorni di stagionatura. Come si può osservare confrontando i risultati riportati in Figura 2.14, tali prestazioni risultano intermedie a quelle di miscele confezionate con lo stesso terreno (*Arg2*) ma diverso rapporto a/c (4.96 per la miscela 94-9 e 4.35 per la miscela 91-11).

6. CONCLUSIONI

I risultati descritti in questa relazione mostrano come sia possibile confezionare una miscela cementizia fluida utilizzando terreno di scavo, acqua e cemento.

La procedura di realizzazione del getto dovrà prevedere dapprima la fluidificazione del terreno argilloso. La quantità di acqua necessaria dipenderà dalla distribuzione granulometrica del terreno di scavo; ad esempio, terreni poco sabbiosi potranno richiedere un maggiore dosaggio di acqua. Sarà tuttavia possibile l'aggiunta di sabbia in cantiere per ridurre il dosaggio di acqua. Successivamente, alla miscela fluida si dovrà aggiungere il cemento.

Le prove di laboratorio hanno mostrato che, mediante la quantità di acqua necessaria per fluidificare i terreni considerati, e un dosaggio di cemento pari a 150 kg/m^3 che porta a rapporti a/c compresi fra 3 e 5, si possono ottenere, su provini stagionati a umido a lungo termine (per tempi superiori a 28 giorni), resistenze a compressione di almeno 1 MPa.

Dalla discussione dei risultati preliminari, effettuata in presenza del Prof. L. Bertolini, ing. L. Budelli, ing. M. Carsana, ing. R. Castellana, Prof. R. Nova, dott. G.M Orlandi, e dott. M. Spada, si è concluso che questi risultati sono accettabili e quindi si ipotizza che la miscela di riempimento possa essere confezionata tenendo conto che:



- l'impasto di terreno fluidificato abbia una consistenza di circa 140% che potrà diminuire in seguito all'aggiunta di cemento a valori non inferiori a 100%;
- nel caso di terreni con ridotta frazione sabbiosa si dovrà aggiungere in cantiere della sabbia (in quantità da stabilire) al fine di ottenere materiali che abbiano distribuzioni granulometriche confrontabili, minimizzando in tal modo la variabilità della quantità d'acqua nella miscela;
- si dovrà considerare almeno un dosaggio di cemento di 150 kg/m^3 e un rapporto acqua/cemento variabile fra 3 e 5.

La lavorabilità della miscela dovrà essere controllata, attraverso una procedura semplice e immediata, da stabilirsi attraverso prove di laboratorio e da verificare in campo.

Inoltre, in considerazione delle condizioni al contorno e dei risultati ottenuti, si sottolinea la necessità di:

- verificare la resistenza meccanica dell'impasto quando viene gettato sott'acqua e valutare l'effetto del contatto con l'acqua durante il getto;
- confezionare getti in acqua solfatica, prelevata in situ, al fine di evidenziare eventuali interazioni chimiche di questa con la matrice cementizia, in funzione anche della temperatura in gallerie;
- confezionare getti utilizzando come acqua di impasto quella solfatica per valutare eventuali fenomeni di espansione o di degrado del materiale una volta indurito;
- effettuare prove di lavorabilità a tempi diversi da quello di miscelazione in modo da poter stabilire un tempo entro cui la miscela possa ritenersi colabile e valutare, in funzione della velocità di getto della miscela, la distanza tra i fori di colata;
- organizzare la tempistica dell'intervento di riempimento in base alle caratteristiche di fluidità della miscela e di mantenimento delle stesse e a prove di riempimento che simulano in scala ridotta la situazione reale.



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 tecnica - illustrativa*, Aprile 2005.
- [3] Prof. Roberto Nova, *Relazione finale - Verifiche e prove di laboratorio a carattere geotecnico ed idraulico su alcune miscele di materiali*, Milano, Aprile 2005.



ALLEGATO A

RESISTENZA A COMPRESSIONE

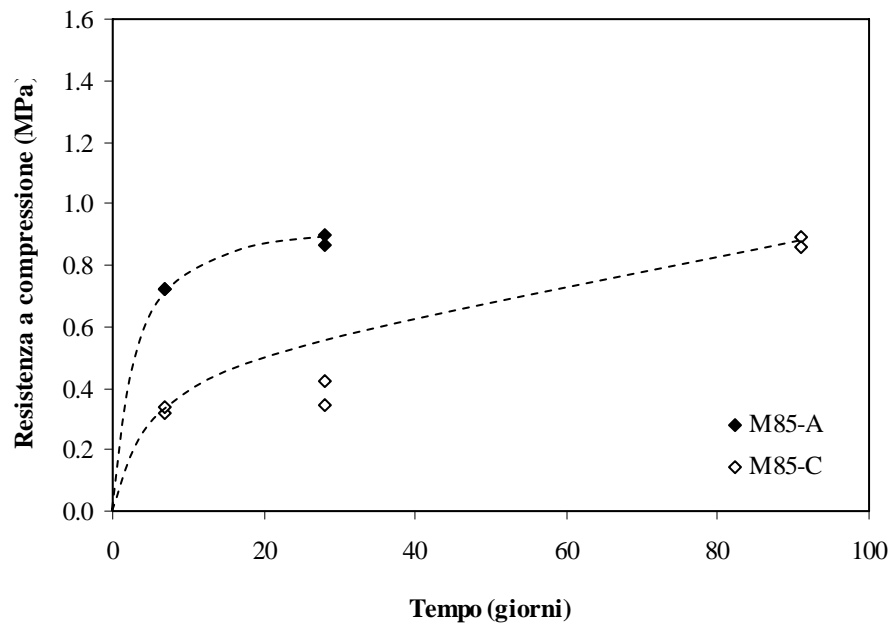


Figura 1 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo della miscela cementizia proposta M85.

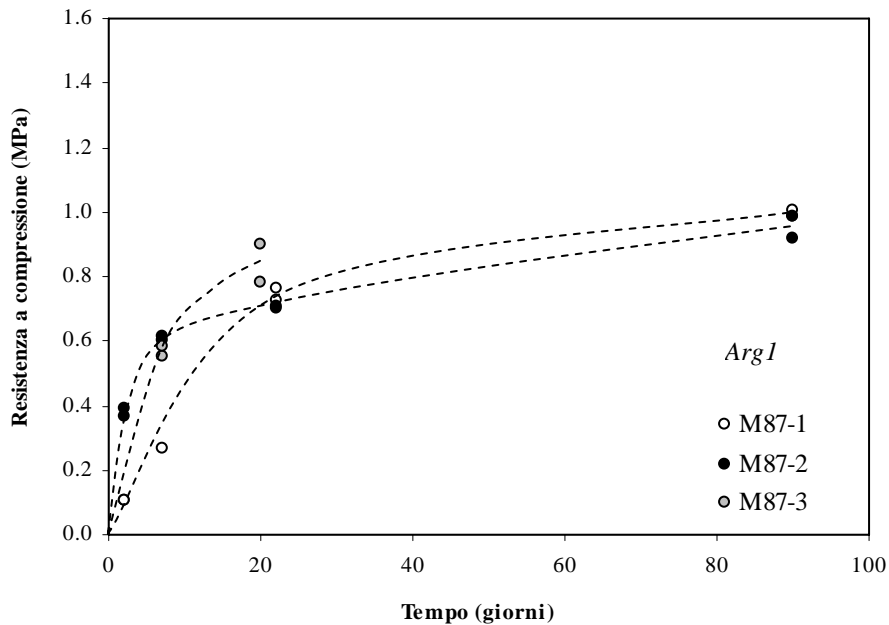


Figura 2 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie fluidificate M87.

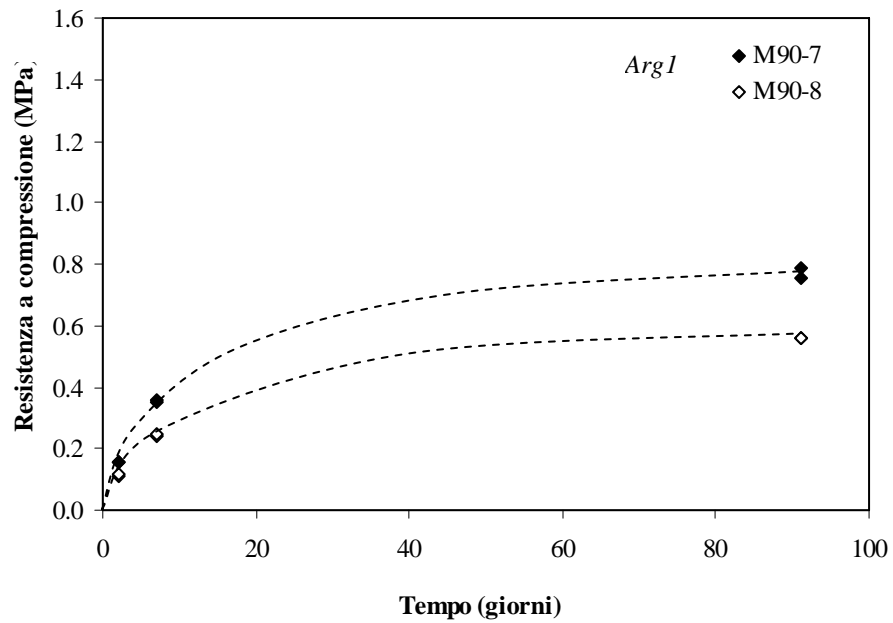


Figura 3 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie fluidificate M90.

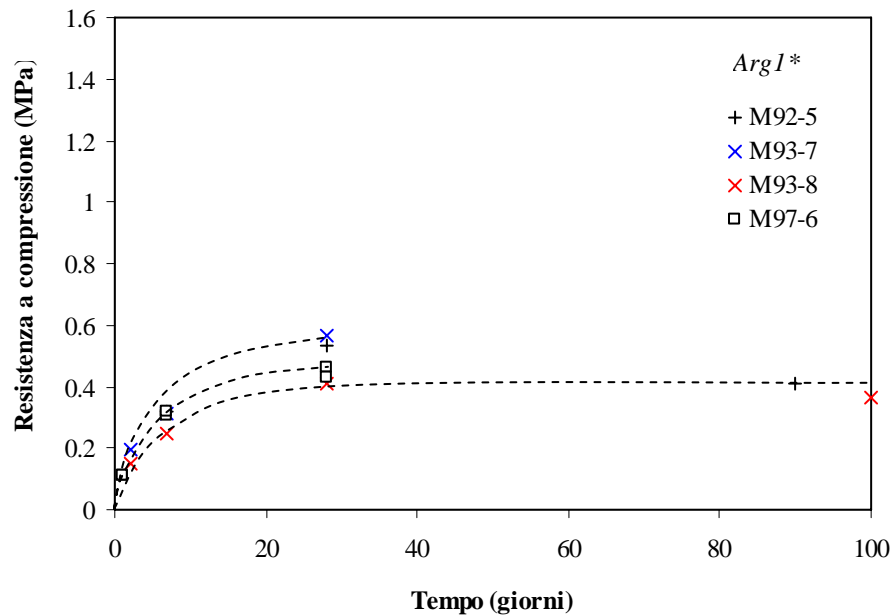


Figura 4 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie fluidificate M92, M93 e M97.

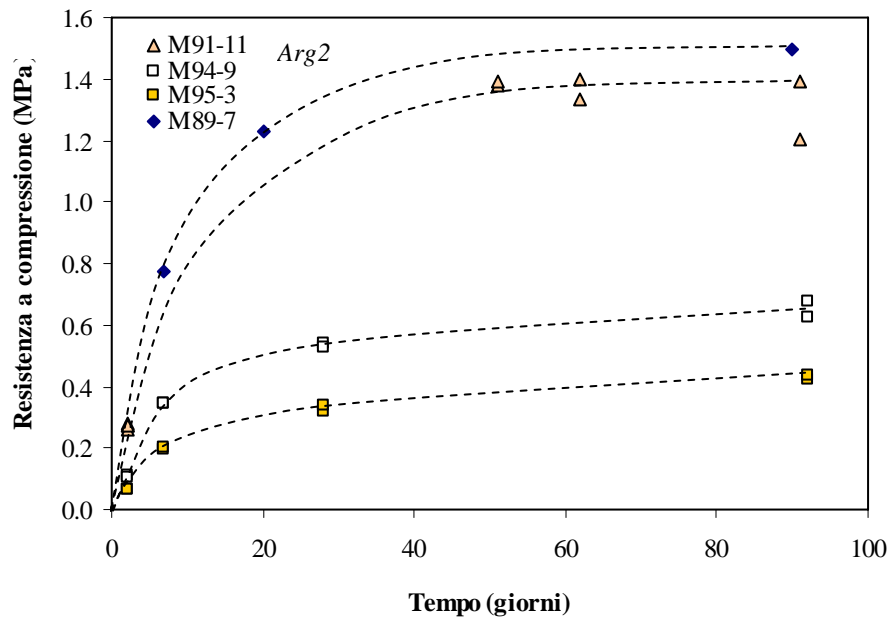


Figura 5 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie fluidificate M89, M91, M94 e M95.

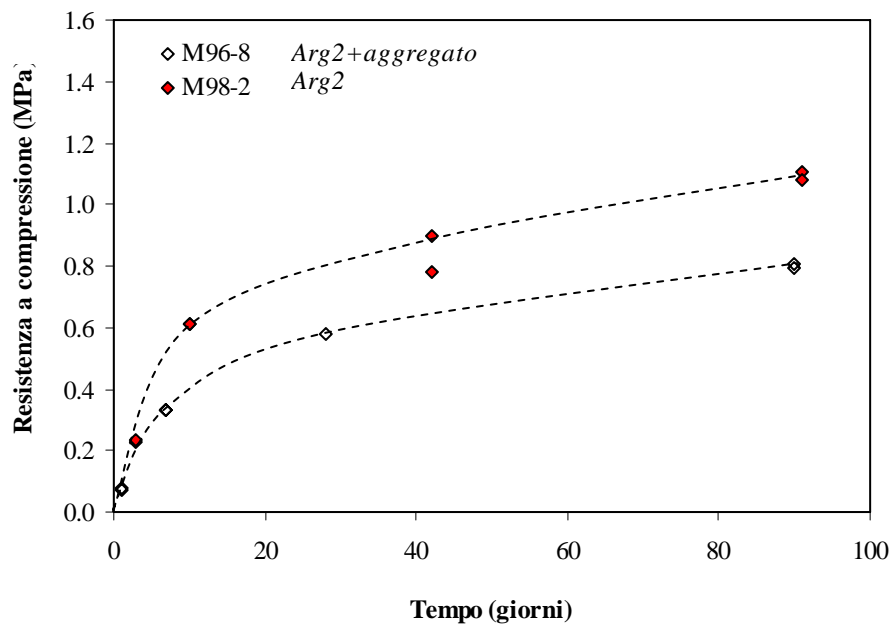


Figura 6 - Andamento della resistenza a compressione nel tempo delle miscele cementizie fluidificate M96 e M98.