

Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Piazza Leonardo da Vinci,32
20133 Milano

“Verifiche e prove di laboratorio a carattere geotecnico ed idraulico su alcune miscele di materiali”.



Relazione finale



Relatore:
Prof. Ing. Roberto Nova

Introduzione

Come richiesto dal committente, obiettivo primario del seguente è stata la caratterizzazione meccanica di alcune miscele cementizie da utilizzarsi per la messa in sicurezza della cava Carale sita in territorio comunale, utilizzata fino agli inizi degli anni '70 per l'estrazione di gesso. Obiettivo secondario invece è stata la caratterizzazione preliminare del gesso intatto in prove monoassiali e triassiali. In seguito si riporta in disciplinare tecnico della Sperimentazione (Allegato A e B) del contratto che riassume le prove richieste dal committente.

La presente relazione è suddivisa in due parti; nella prima parte (parte A) vengono esposte con completezza tutte le prove sperimentali effettuate sulle miscele cementizie, nella seconda parte (parte B) invece vengono riportati i risultati ottenuti sulle prove effettuate sul gesso.

Allegato B

**CONTRATTO DI CONSULENZA TRA IL POLITECNICO DI MILANO ED IL
COMUNE DI SANTA BRIGIDA (BG)**

**“Verifiche e prove di laboratorio, a carattere geotecnico ed idraulico, su alcune
miscele di materiali”**

DISCIPLINARE TECNICO DELLA SPERIMENTAZIONE

Le verifiche e le prove di laboratorio da effettuare sono di seguito dettagliate:

1 – PROVE DI COMPRESSIONE TRIASSIALE

Esecuzione di n° 3 prove, su spezzoni di gesso, con determinazione dei parametri caratteristici dell'ammasso roccioso

2 – PROVE DI LABORATORIO SU MISCELE DI MATERIALI

Due tipi di sperimentazione:

- maturazione delle miscele in acqua con caratteristiche chimiche specifiche (solo per le miscele 3,4,5 e 6)
- maturazione delle miscele in ambiente asciutto (per tutte le miscele)

Miscele da sperimentare:

Miscela n°	Acqua (litri)	Pozzolana (kg)	Cemento (kg)	Limo e argilla (kg)
1	6	20	0.5	0
2	5	20	0.2	0
3	3.5	5	0.3	10
4	3.5	5	0.4	10
5	3.5	5	0.8	10
6	3.5	5	1.6	10

Tempistica delle prove e parametri di interesse:

Miscela iniziale	densità e peso di volume
2 giorni	peso di volume, resistenza a rottura
7 giorni	peso di volume, resistenza a rottura
15 giorni	peso di volume, resistenza a rottura
30 giorni	peso di volume, resistenza a rottura, permeabilità
60 giorni	peso di volume, resistenza a rottura, permeabilità

Incontri, referti, ecc.

Referto parziale dopo i primi 30 giorni di sperimentazione
Referto definitivo al termine della sperimentazione
1-2 incontri presso il Politecnico di Milano con Comune e Progettisti
1 incontro presso al Regione Lombardia a fine sperimentazione per illustrare i risultati

NOTA: Il reperimento di tutti i materiali da testare è a carico del Comune, come anche la consegna degli stessi presso il Politecnico di Milano

Parte A:
Caratterizzazione meccanica delle miscele cementizie

1. Classificazione dei materiali costituenti le miscele

La tipologia delle miscele cementizie così come la loro composizione (vedi Tab. 1) è stata fornita dal Comune di Santa Brigida (allegato B), che ha inoltre provveduto a fornire il materiale necessario per tutte le prove sperimentali eseguite.

Innanzitutto si è ritenuto opportuno operare un'appropriate classificazione e caratterizzazione dei materiali sciolti (aggregati) costituenti le miscele eseguendo analisi standard adottate in Meccanica delle Terre .

TIPOLOGIA	Acqua [l]	Pozzolana [kg]	Cemento [kg]	Limo-Argilla [kg]
Miscela 1	6	20	0.5	-
Miscela 2	5	20	0.2	-
Miscela 3	3.5	5	0.3	10
Miscela 4	3.5	5	0.4	10
Miscela 5	3.5	5	0.8	10
Miscela 6	3.5	5	1.6	10

Tab. 1: Composizione delle Miscele da Allegato B

Le miscele in oggetto sono costituite, in differenti proporzioni, dai seguenti materiali:

- Pozzolana:

Tra i costituenti delle miscele vi è la pozzolana prelevata dai terreni della cava "Rossolera" del comune di Borgo Priolo (Pavia).

La pozzolana naturale è un materiale sedimentario di origine piroclastica, cioè derivante dalla sedimentazione di materiale eruttato dai vulcani che ha prodotto depositi incoerenti (come le pozzolane flegree o laziali) o invece compatti (come i tufi napoletani) che nel tempo si sono più o meno alterati chimicamente.

Si può definire come pozzolana, o meglio come materiale ad attività pozzolanica, ogni sostanza silicea o silico-alluminosa , che in forma finemente suddivisa e in presenza di acqua, sia capace di reagire a temperatura ambiente con l'idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per formare composti cementanti. Quando la silice è in grado di reagire, nelle condizioni sopra indicate con l'idrossido di calcio, viene detta anche silice reattiva.

Quindi affinché un materiale esibisca attività pozzolanica, è necessario che contenga silice in misura sufficientemente elevata, che sia in forma reattiva e cioè non cristallina ed inoltre che il materiale abbia uno sviluppo superficiale molto elevato, in modo da venire a contatto con la fase acquosa presente nella pasta di cemento, nella quale è disciolto l'idrossido di calcio.

Per quanto riguarda il materiale pozzolanico pervenutoci in laboratorio, è opportuno citare alcuni parametri chimico-fisici rilevati tramite analisi specifiche condotte precedentemente e legate alla fase del reperimento in cava ad opera di Geocave s.r.l.

È stata effettuata un'analisi di permeabilità sui terreni della cava "Rossolera", riscontrando sui terreni in oggetto, un valore di permeabilità $k = 10^{-7}$ m/s.

Sono state inoltre compiute alcune analisi diffrattometriche su quattro campioni relativi ai terreni della cava: si tratta di particolari analisi chimiche tipiche per i materiali dotati di attività pozzolanica, dalle quali emergono le concentrazioni dei componenti del materiale pozzolanico tra cui SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O , CaCO_3 ; tra esse

assumono grande importanza le concentrazioni dell'ossido di calcio CaO e dello ione OH⁻ espresse in mmol/l, che sono necessarie per determinare la pozzolanicità del materiale.

Solitamente quando si parla di saggio di pozzolanicità ci si riferisce a quella prova che permette di definire un cemento "pozzolanico" o "non pozzolanico", stabilendo se il materiale aggiunto al Portland è sufficientemente reattivo nei confronti della calce di idrolisi. Il cemento impastato con acqua è sottoposto ad un periodo di idratazione accelerata a 40° C di 7 giorni. La soluzione di contatto, per l'idratazione del C₃S diventa presto sovrassatura di Ca(OH)₂, ma in presenza di pozzolana attiva, il contenuto di Ca(OH)₂ deve scendere al di sotto del valore di saturazione. Se dopo la prova la soluzione risulta insatura di Ca(OH)₂, il saggio di pozzolanicità è considerato positivo, se invece è sovrassatura esso risulta negativo.

La normativa BS EN 196-5 descrive il metodo per misurare la pozzolanicità di un "cemento pozzolanico". I risultati ottenuti dalle analisi diffrattometriche sono mostrati in Tab. 2

	CaO [mmol/l]	OH ⁻ [mmol/l]
Campione 1	9.05	51
Campione 2	7.78	48.60
Campione 3	7.55	48
Campione 4	8.50	50

Tab. 2:- Risultati delle analisi diffrattometriche

Riportiamo le concentrazioni di CaO e OH⁻ rispettivamente dei quattro campioni sul grafico del saggio di pozzolanicità, che descrive l'andamento della solubilità dell'idrossido di calcio in funzione dell'alcalinità totale della soluzione: i valori si trovano al di sotto della curva di solubilità, il saggio risulta dunque positivo e il materiale si presenta reattivo.

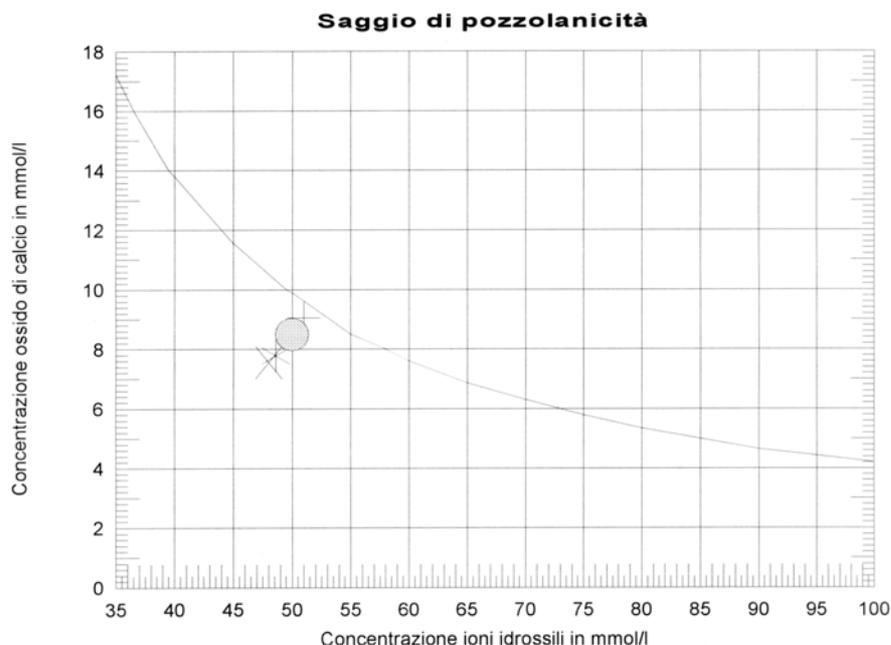


Fig. 1: Grafico del saggio di pozzolanicità

- Cemento portland al calcare:

Il cemento Portland al calcare è utilizzato come legante idraulico; esso ha classe di resistenza CEM II /B LL/32.5 R . Questo tipo di cemento è stato introdotto e largamente utilizzato in Francia e Spagna allo scopo di poter utilizzare gli scarti della produzione degli aggregati calcarei, dei cementi in cui al clinker viene aggiunta della polvere di calcare (CaCO_3 , filler calcareo). Tale materiale, anche per la sua finezza, risulta dotato di una certa reattività, formando dei carboalluminati in combinazione con gli alluminati del clinker; inoltre la sua presenza contribuisce a una miglior “chiusura” degli impasti cementizi (effetto tipico dei filler). Questi cementi, che ovviamente devono rispondere ai requisiti di resistenza delle relative classi hanno dato prova di possedere caratteristiche non dissimili da quelle dei cementi Portland.

- “Limo-Argilla”:

Il terzo costituente coinvolto nell’impasto delle miscele è un terreno sciolto a grana fine denominato in seguito “Limo e Argilla”. Data l’elevata disponibilità di tale materiale in loco (abbondante presenza nei depositi superficiali limoso-argillosi-sabbiosi di alterazione, che ricoprono i gessi presenti nel sottosuolo) ne è stato previsto l’utilizzo per contenere i costi delle miscele.

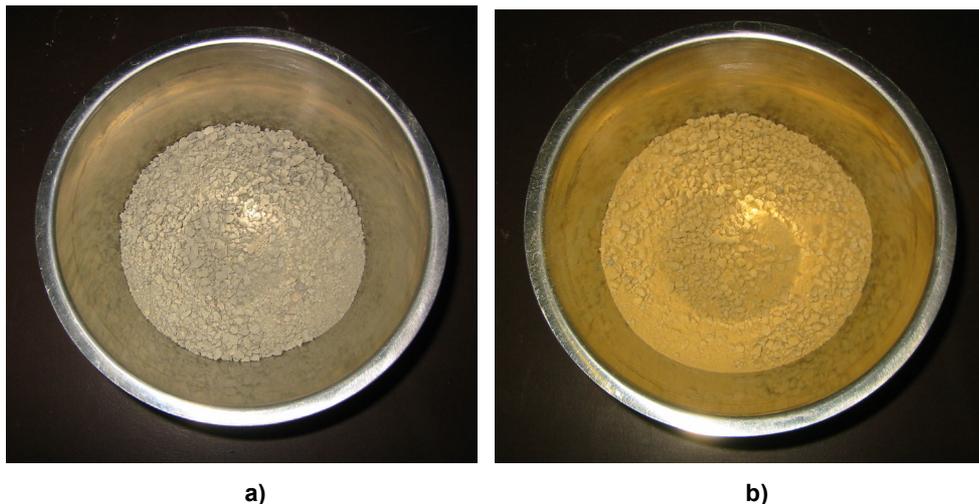


Fig. 2: - Campione di pozzolana (a) e di limo-argilla (b).

1.1. Analisi granulometriche

Queste analisi forniscono un criterio di classificazione dei terreni e consentono di ricavare informazioni utili sul comportamento meccanico del materiale valutandone il possibile impiego. L’analisi granulometrica individua la relazione tra la distribuzione delle dimensioni medie delle particelle costituenti il terreno e le percentuali in peso dei grani, riferite al peso secco iniziale del campione.

Sono state svolte, seguendo le normative ASTM, su campioni di pozzolana e di limo-argilla (per il cemento si è considerata la curva granulometrica del cemento Portland standard). Si è utilizzato il metodo della setacciatura per le particelle aventi diametro superiore a 0.075 mm, mentre per le particelle aventi diametro inferiore si è utilizzato il metodo della sedimentazione.

I risultati, rappresentati in scala semilogaritmica sono riportati in Fig. 3.

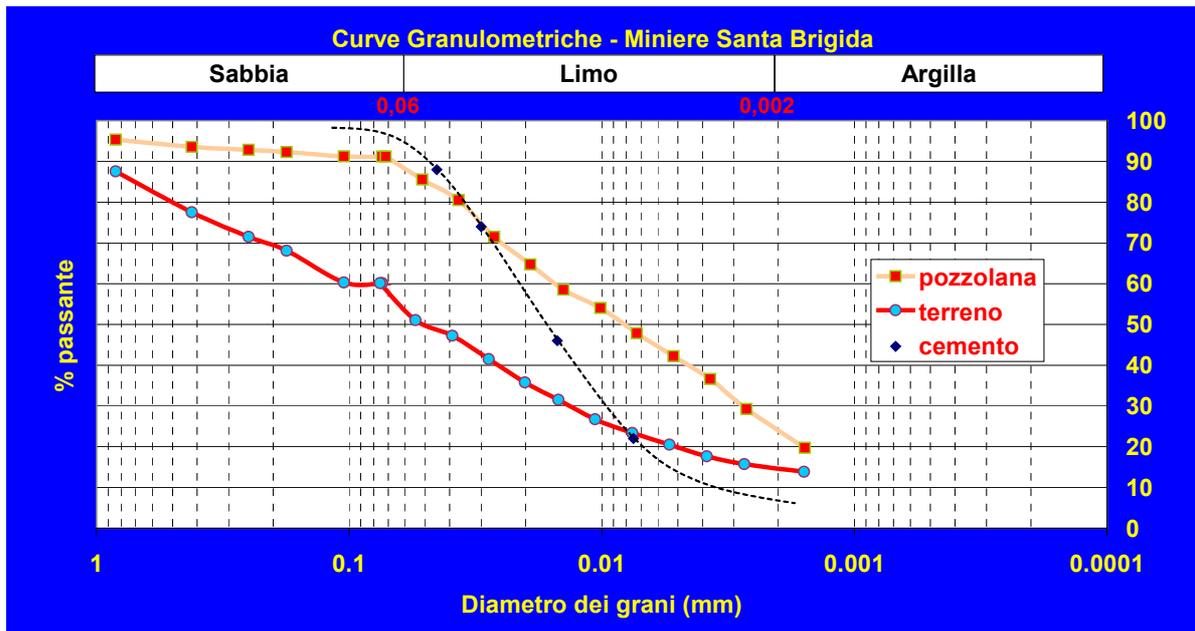


Fig. 3: Curva granulometrica dei costituenti le miscele

Per la pozzolana ed il limo-argilla è stato possibile pertanto individuare le percentuali di sabbia, limo ed argilla presenti ed effettuare una prima classificazione del materiale secondo la metodologia U.S.D.A (United States Department of Agriculture) che prevede l'utilizzo di un diagramma di forma triangolare, la cui area interna è suddivisa in 12 zone rappresentanti altrettante classi di terreni; ogni zona è definita in base alle percentuali di sabbia, limo e argilla riportate sui lati del triangolo stesso (Fig. 1.7).

Riportando le percentuali relative ai campioni si ottiene la definizione di *Loam* per il "limo-argilla" e di *Silt Loam/Silty clay loam* per la pozzolana.

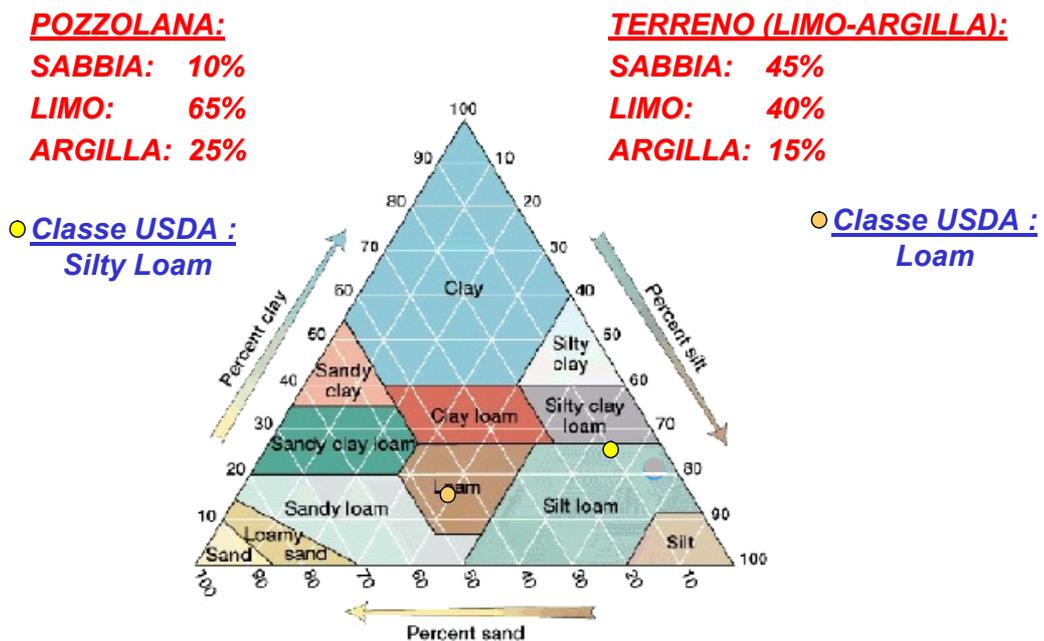


Fig. 4: Classificazione USDA per Pozzolana e Limo ed Argilla

1.2. Determinazione della gravità specifica G_s

La gravità specifica o peso specifico dei grani, rappresenta il valor medio del peso unitario delle particelle granulari che compongono il terreno; esso permette di calcolare, noto il peso specifico secco del terreno, la porosità, l'indice dei vuoti e il grado di saturazione del terreno stesso ed inoltre interviene nelle formule di calcolo della curva granulometrica per mezzo del densimetro (sedimentazione).

In generale il peso specifico di qualsiasi materiale è definito come il peso unitario della sostanza stessa, con riferimento alla densità dell'acqua distillata alla temperatura di 4° C :

$$G_s = \frac{\gamma_{\text{mat}}}{\gamma_w(4^\circ\text{C})}$$

Indicando con V_0 i volumi sia di acqua distillata e della componente solida e definito come W_s il peso delle particelle solide e con W_w il peso dell'acqua distillata alla temperatura di 4° C si ottiene che:

$$G_s = \frac{\frac{W_s}{V_0}}{\frac{W_w}{V_0}} = \frac{W_s}{W_w}$$

La procedura di determinazione del G_s prevede dunque la misurazione di un determinato volume di particelle solide, il quale verrà poi diviso per il peso di uno stesso volume di acqua distillata. Poiché in laboratorio viene mantenuta una temperatura superiore ai 4° C richiesti, le normative consentono di riferirsi a temperature pari ai 20°C, commettendo così un errore trascurabile inferiore allo 0.3%, che può essere trascurato.

Durante la prova effettuata utilizzando i picnometri secondo normativa, si sono registrati :

W_1 = peso del picnometro riempito di acqua distillata e completo di tappo;

W_2 = peso del picnometro completo di tappo pieno di acqua distillata e del campione saturato;

W_s = peso del materiale essiccato in forno;

Da tali dati è possibile calcolare la massa di ugual volume d'acqua W_w :

$$W_w = W_1 + W_s - W_2$$

e di conseguenza il valore di G_s :

$$G_s = \frac{W_s}{W_w}$$

Tale valore di gravità specifica è però riferito alla temperatura di prova e pertanto è stato corretto tramite una costante K tabulata: dato che le prove sono state tutte eseguite a 20.5 °C, il valore di K è pari a 0.9999.

In Tab. 3 e Tab. 4 sono riportati i valori ottenuti per i due campioni: i risultati ottenuti sono in linea con i valori tipici di G_s per terreni, solitamente compresi tra 2.65 e 2.75.

DETERMINAZIONE DELLA GRAVITA' SPECIFICA		
Peso terreno secco W_s	69.55	g
Temperatura delle prove t°	19.9	$^{\circ}\text{C}$
Peso picnometro + acqua a t° , W_1	670.6	g
$W_s + W_1$	740.15	g
Peso picnometro + acqua + terreno, W_2	714.58	g
$W_s + W_1 - W_2$	25.57	g
Gravità specifica terreno G_s (20°C)	2.72	-
Peso specifico terreno γ_s	26.6	kN/m^3

Tab. 3: Riepilogo dei dati sperimentali per il calcolo di G_s per il terreno ("Limo e Argilla")

DETERMINAZIONE DELLA GRAVITA' SPECIFICA		
Peso terreno secco W_s	67.15	g
Temperatura delle prove t°	19.3	$^{\circ}\text{C}$
Peso picnometro + acqua a t° , W_1	670.66	g
$W_s + W_1$	737.81	g
Peso picnometro + acqua + terreno, W_2	713.08	g
$W_s + W_1 - W_2$	24.73	g
Gravità specifica pozzolana G_s (20°C)	2.71	-
Peso specifico pozzolana γ_s	26.6	kN/m^3

Tab. 4: Riepilogo dei dati sperimentali per il calcolo di G_s per la Pozzolana

2. Preparazione delle miscele.

Scopo del presente lavoro sperimentale è la caratterizzazione meccanica delle miscele in funzione del tempo di maturazione. A tal fine si è deciso di effettuare 2 campagne sperimentali differenti: una prima serie di prove effettuate con un'attrezzatura semplice e portatile, il Pocket Penetrometer, che ha consentito di avere un immediato riscontro (preliminare) dell'effettivo grado di cementazione in relazione al tempo di maturazione ed una seconda e più estesa campagna sperimentale di prove di compressione monoassiale volta alla stima della resistenza σ_c del materiale e della rigidità E sempre al variare del tempo di maturazione.

Per le prove Pocket Penetrometer sono stati preparati una coppia di cubi di lato 15 cm per ciascuna miscela sia per le condizioni di maturazione asciutte denominate nel seguito "secco" sia per le condizioni di maturazione della miscela in acqua solfatata denominato in seguito "bagnato" prelevata al livello -3 della cava di Gesso in località Carale nel Comune di Santa Brigida. Complessivamente per questa serie di prove sono stati preparati circa 24 cubi.

Differentemente per le prove di compressione monoassiale si è deciso di utilizzare provini cilindrici aventi diametro D pari a 38 mm ed altezza H pari a 76 mm. Tali dimensioni soddisfano i requisiti previsti da normativa essendo il rapporto H/D pari a 2. Le dimensioni relativamente "ridotte" di tali provini sono da ritenersi più che accettabili dal momento che tutti i materiali costituenti le miscele hanno dimensioni medie dei grani inferiori ad 1 mm (vedi Fig. 3).

A differenza della prima serie in cui su un singolo cubo potevano essere effettuate più prove a tutti i tempi di maturazione richiesti dal Committente, per le prove monoassiali il singolo provino è ovviamente da ritenersi "monouso" dal momento che si raggiunge la rottura del campione. Pertanto, volendo verificare anche la ripetibilità della singola prova, si è deciso di preparare per ciascun tempo di maturazione indicato (2,7,15,30,60 giorni), per ciascuna condizione di maturazione ("secco" o "bagnato") e per ciascuna miscela almeno 4 provini uguali. In totale pertanto si sono preparati un numero complessivo di provini pari a circa 250 unità. Tutti i provini, in entrambe le condizioni di maturazione, sono stati fatti maturare in camera umida.

Una parte di questi provini cilindrici è stata utilizzata per la stima dei pesi specifici al variare del tempo di maturazione (solo per provini secchi) e per la stima della permeabilità della singola miscela, così come prescritto in allegato B.

Nei seguenti paragrafi dopo aver dettagliato la metodologia utilizzata per la preparazione dei vari provini verranno presentati i risultati in relazione ai tempi di maturazione nel seguente ordine: pesi specifici, resistenza alle penetrazioni del Pocket Penetrometer, prove di compressione monoassiale e da ultimo prove di permeabilità.

2.1. Preparazione e conservazione dei provini

Al fine di garantire l'omogeneità delle miscele e quindi massimizzare la ripetibilità delle prove il materiale è stato accuratamente preparato: parte di esso, soprattutto per quanto riguarda il limo-argilla che si presentava umido, è stato sottoposto a essiccazione in stufa a 110° C ; è stata effettuata una selezione del materiale poiché sia il limo-argilla sia la pozzolana presentavano agglomerati di materiale addensato, con presenza di sassi e ciotoli di varie dimensioni. Tolta quella frazione estranea che avrebbe potuto ostacolare la miscelazione, tutto il materiale è stato manualmente sminuzzato e frantumato, in modo

da ottenerne una pezzatura regolare ed omogenea e in seguito sottoposto a vagliatura mediante setaccio di luce pari a 5 mm. La frazione superiore ai 5 mm (modesta) è stata scartata.

Una volta preparati come detto i vari componenti si è proceduto a pesare le varie frazioni in modo da preparare le varie miscele rispettando i quantitativi indicati. Gli impasti veri e propri sono stati ottenuti aggiungendo acqua alla frazione solida e miscelando il tutto o mediante betoniera e manualmente in appositi contenitori a seconda del tipo e delle quantità di provini da realizzare.

In fase di preparazione delle prime miscele si è potuto constatare una bassa lavorabilità di esse, pertanto in accordo con la Committenza (sopralluogo dell'ing. Castellanza a Santa Brigida in data 7/10/2004) si è deciso di aumentare il contenuto d'acqua (per aumentare la lavorabilità dell'impasto) rispetto a quanto indicato nell'allegato A e B. Tutte le quantità dei componenti effettivamente impiegate nella realizzazione delle miscele sono riportate nella seguente Tab. 5:

TIPOLOGIA	Acqua [l]	Pozzolana [kg]	Cemento [kg]	Limo-argilla [kg]
Miscela 1	8	20	0.5	0
Miscela 2	7	20	0.2	0
Miscela 3	5.2	5	0.3	10
Miscela 4	5	5	0.4	10
Miscela 5	4	5	0.8	10
Miscela 6	5	5	1.6	10

Tab. 5: quantità dei componenti effettivamente utilizzati



Fig. 5: Impasto delle miscele e relativa consistenza

Le fasi di preparazione dei provini cubici e cilindrici sia nel caso “secco” che “bagnato” sono mostrate in Fig. 6 e Fig. 7 rispettivamente. Nel caso dei cubi si sono utilizzate delle cubiere standard per blocchi di calcestruzzo, mentre per i provini cilindrici sono stati utilizzati dei cilindretti in ottone. Il getto è stato effettuato previa oliatura con olio scasserante delle pareti interne. Inoltre per quanto concerne le fasi di preparazione si ritiene opportuno precisare che:

- i provini cubici “secchi” sono stati vibrati con tavola vibrante standard;
- i provini cubici “bagnati” non sono stati vibrati e per riprodurre l'iniezione della miscela in cavità allagate in cui è presente acqua solfatata si immessa la miscela nell' cubiere già riempite con l'acqua di cava fornita al Committente, inoltre le cubiere non sono state riempite completamente per poter sempre avere 1 cm di acqua e tenere così il cubo sommerso (Fig. 6) ;
- i provini cilindrici secchi sono stati vibrati anch'essi con tavola vibrante

- i provini cilindrici bagnati hanno seguito la stessa procedura dei provini cubici con l'unica differenza che per la maturazione in acqua sono stati raggruppati in cubiere utilizzate qui come contenitore per l'acqua (Fig. 7).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fig. 6: Preparazione cubi: a) e b) provino secco; c),d) e),f) fasi preparazione provino bagnato

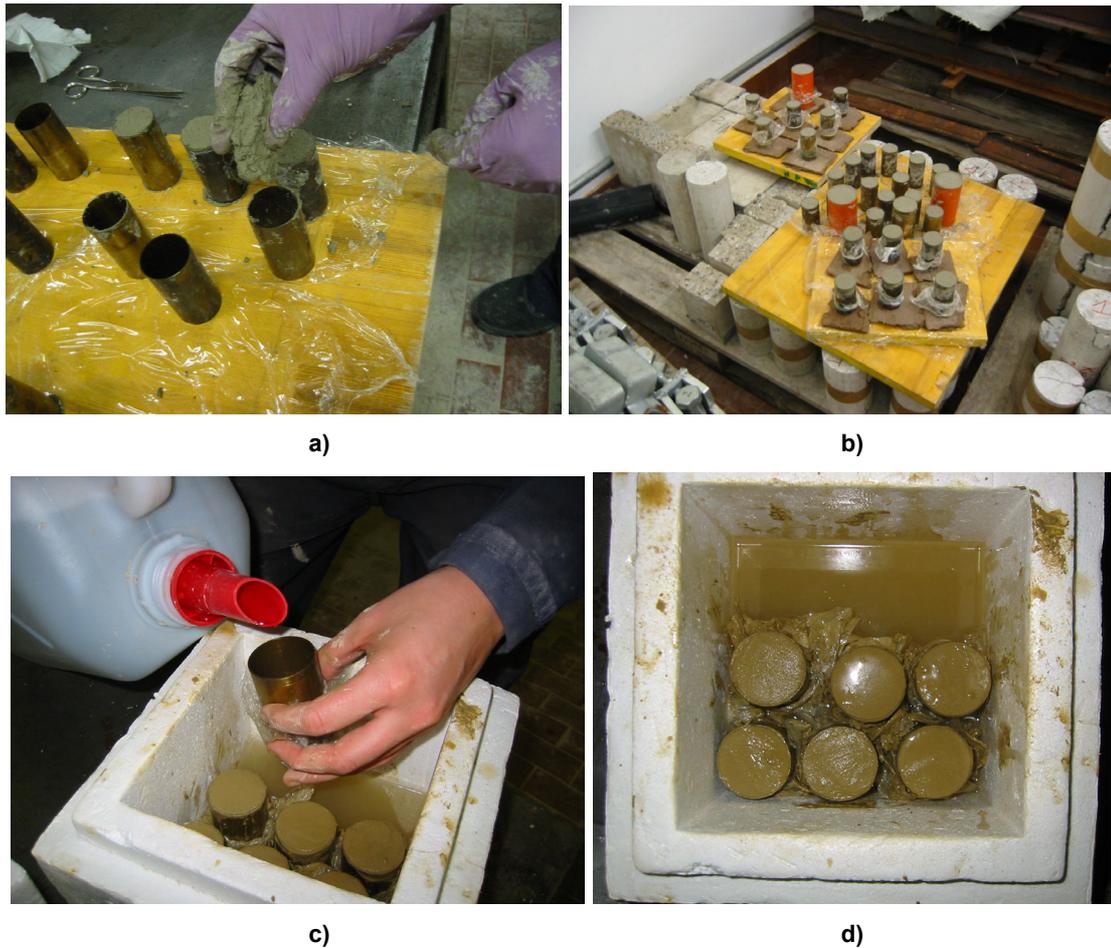


Fig. 7: Preparazione cilindri: a) e b) provino secco; c),d) fasi preparazione provino bagnato

Per minimizzare eventuali errori dovuti alla preparazione dell'impasto si è provveduto in genere alla preparazione di un singolo impasto per ciascuna miscela in una sola volta; da esso sono stati preparati tutti i cubi ed i cilindri necessari per la caratterizzazione meccanica sia nelle condizioni secche che in acqua e per tutti i tempi di maturazione indicati nell'allegato B.

La stagionatura dei cilindretti e dei cubi, sia secchi che bagnati, è avvenuta in camera umida, come da normativa UNI EN 12390-2 del 1 Giugno del 2002. Infatti per garantire le condizioni ottimali per l'idratazione è necessario mantenere il getto in condizioni di elevata umidità (saturo o quasi saturo); inoltre la temperatura non deve raggiungere valori troppo bassi o alti. Infatti, poichè l'idratazione si produce solo per azione della fase acquosa presente nei pori capillari, è necessario evitare che questi si svuotino sia per evaporazione verso l'esterno (causata soprattutto dalle radiazioni solari e dal vento), che per autoessiccamento, in quanto l'acqua viene consumata dalla stessa reazione di idratazione. In caso di maturazione non adeguata, la resistenza meccanica del calcestruzzo rimane modesta e nel contempo risulta elevata la sua vulnerabilità ai cicli di gelo-disgelo e agli attacchi di tipo chimico, oltre che alla penetrazione dei cloruri e alla carbonatazione. La camera umida è quindi un locale opportunamente attrezzato dove la temperatura deve essere di 20 ± 2 °C e l'umidità relativa costantemente superiore al 95%. Questa stanza serve di conseguenza anche ad uniformare i provini delle varie miscele, portandoli alle stesse condizioni ambiente.

3. Risultati delle prove sperimentali sulle miscele

3.1. Pesi specifici in relazione al tempo di maturazione

Come richiesto dall'allegato B, si è interessati a valutare l'influenza del tempo di maturazione sul peso specifico e quindi sulla densità delle miscele. A tal fine una parte dei provini cilindrici secchi in fase di maturazione nella camera umida è stata periodicamente pesata (nei tempi di maturazione di 2, 7, 15, 30, 60 giorni) su bilancia di precisione con sensibilità pari a 0.01g. Noto quindi il peso P ed stimando il volume V (dato dal diametro interno del cilindro e dall'altezza del campione misurata con il calibro) è stato possibile ottenere il peso specifico dalla relazione:

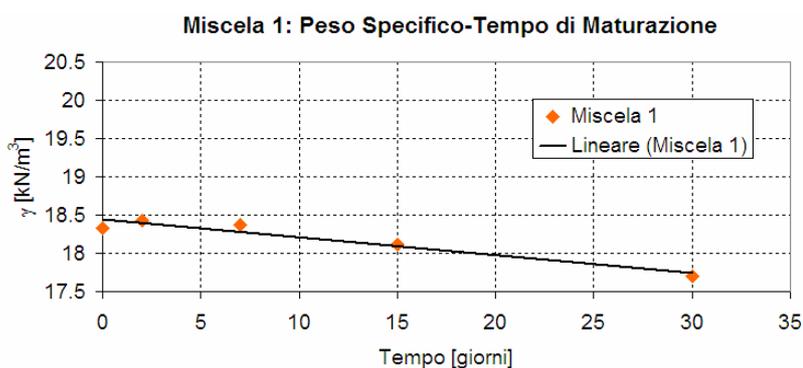
$$\gamma = \frac{P}{V} \quad [\text{KN/m}^3]$$

ove con γ si intende il *peso di volume naturale*; la densità ρ puo' essere calcolata dividendo la γ per l'accelerazione di gravita g .

Sono di seguito riportati i valori medi del peso, del peso di volume o peso specifico della densità relativamente a ciascuna miscela:

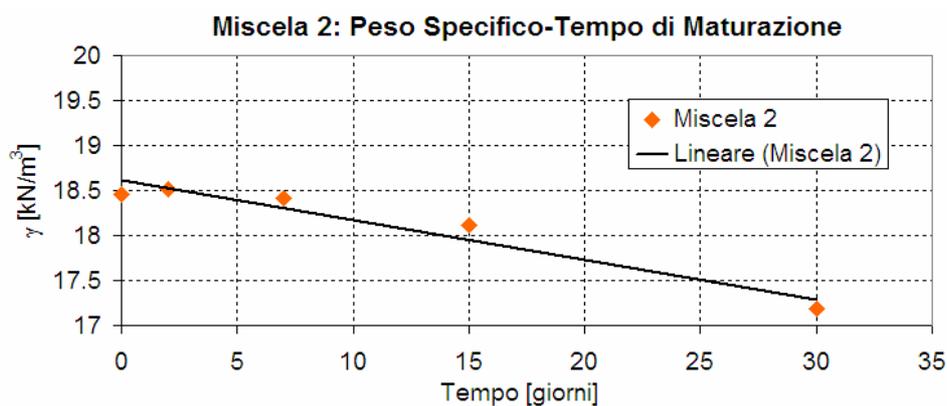
Miscela 1

Maturazione [giorni]	γ_{media} [kN/m ³]	ρ_{media} [kg/m ³]
0	18.33	1869.05
2	18.42	1877.91
7	18.36	1872.53
15	18.11	1846.15
30	17.70	1804.56
60	16.97	1730.84



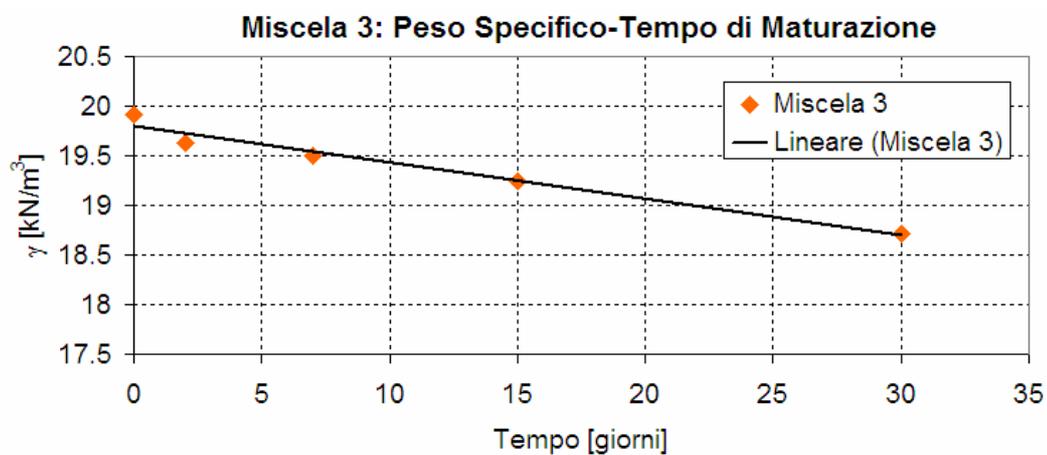
Miscela 2

Maturazione [giorni]	γ_{media} [kN/m ³]	ρ_{media} [kg/m ³]
0	18.46	1881.53
2	18.51	1886.93
7	18.41	1877.35
15	18.11	1846.99
30	17.18	1751.40
60	16.47	1679.38



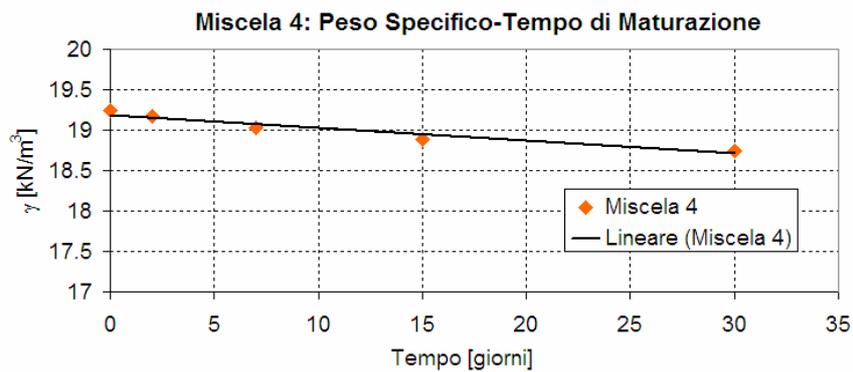
Miscela 3

Maturazione [giorni]	γ_{media} [kN/m ³]	ρ_{media} [kg/m ³]
0	19.91	2029,74
2	19.63	2001.26
7	19.50	1988.41
15	19.24	1961.66
30	18.71	1908.02
60	17.33	1767.39



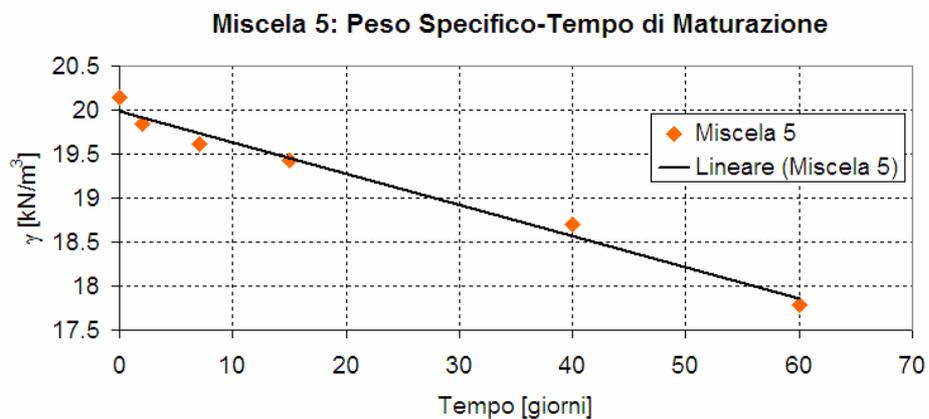
Miscela 4

Maturazione [giorni]	γ_{media} [kN/m ³]	ρ_{media} [kg/m ³]
0	19.25	1962.23
2	19.16	1953.87
7	19.02	1939.07
15	18.89	1925.62
30	18.67	1903.37
60	17.48	1782.36



Miscela 5

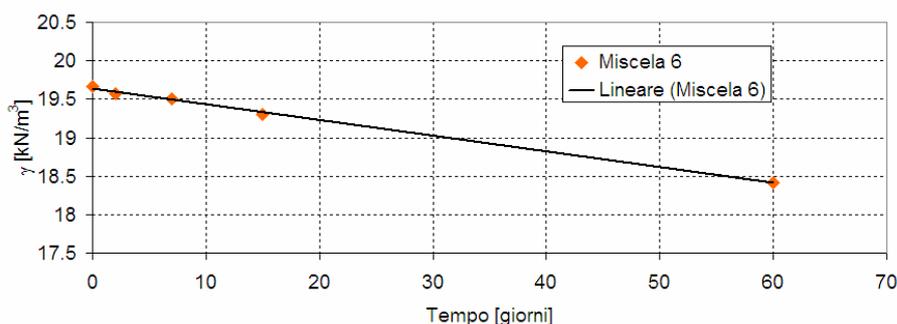
Maturazione [giorni]	γ_{media} [kN/m ³]	ρ_{media} [kg/m ³]
0	20.15	2053.69
2	20.04	2042.83
7	19.61	1999.26
15	19.42	1980.17
30	18.70	1906.31
60	17.78	1813.02



Miscela 6

Maturazione [giorni]	γ_{media} [kN/m ³]	ρ_{media} [kg/m ³]
0	19.66	2005.32
2	19.57	1996.68
7	19.50	1985.57
15	19.29	1968.18
30	18.98	1954.18
60	18.41	1877.53

Miscela 6: Peso Specifico-Tempo di Maturazione



Come si può osservare dai grafici precedentemente esposti e da quanto riassunto in Fig. 8 si osserva una riduzione lineare comune a tutte le miscele di circa 2 kN/m³ rispetto al valore iniziale al crescere del tempo di maturazione.

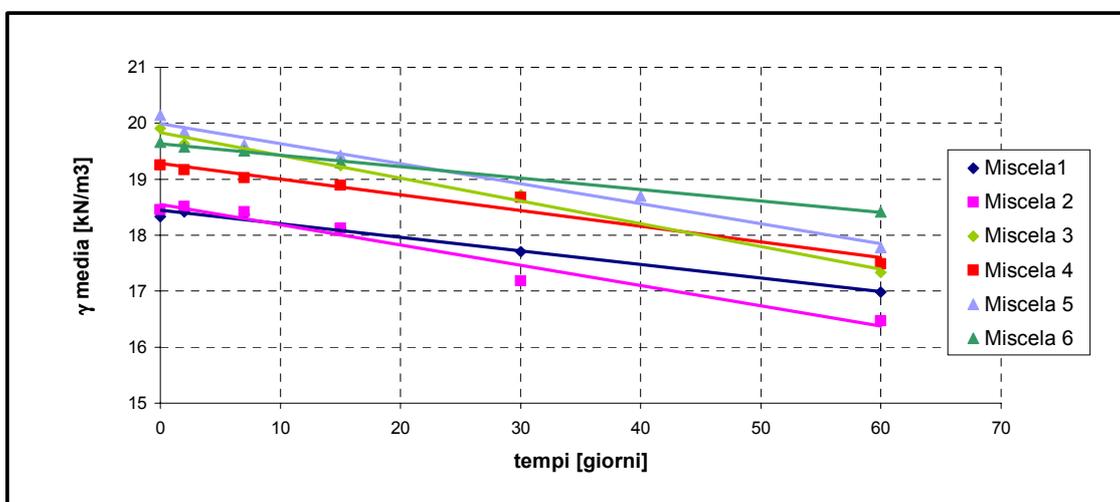


Fig. 8: - Variazione del peso specifico in relazione al tempo di maturazione per tutte le miscele

3.1.1. Variazioni dimensionali

Osservando i provini "secchi" al crescere del tempo di maturazione si sono potuti osservare alcune variazioni dimensionali del diametro e dell'altezza: la diminuzione è stata generalmente pari ad 1-2 mm in altezza e più contenuta per il diametro che si è ridotto talvolta di circa 0.5-1 mm.

Sempre nel caso dei provini del secco, non si assiste a una fessurazione marcata tuttavia si osservano sulla superficie laterale e in corrispondenza delle basi, alcune microfessure che manifestano l'avvenuto ritiro.



Fig. 9: Ritiro e formazione di microfessure per provini secchi

Al contrario, sulla serie in acqua si è generalmente riscontrato un rigonfiamento del provino: il diametro ovviamente è rimasto pari alle dimensioni della “mold” che li conteneva, mentre l’altezza in alcuni casi è aumentato di 1-2 mm. Si è inoltre osservato che il materiale ha aderito alle pareti cilindriche, opponendo resistenza all’estrusione.



Fig. 10: – Rigonfiamento per provini umidi

3.2. Stima della resistenza mediante Pocket Penetrometer

Come già discusso precedentemente è stata eseguita una campagna di prove sperimentali con uno strumento di immediato utilizzo quale il Pocket Penetrometer atto a fornire indicazioni degli effetti della progressiva cementazione. Queste prove hanno il vantaggio di non essere distruttive nei confronti del campione (per ogni cubo si possono eseguire più prove e per ogni tempo di maturazione) e di essere estremamente semplici da eseguire.

Al contrario danno origine a valori dispersi seppur in prove sul medesimo campione, e non consentono di avere una stima affidabile della resistenza a compressione monodimensionale né tantomeno dei parametri di resistenza. Da ultimo va sottolineato che il fondoscala limitato (la forza è applicata dall'operatore) non consente di effettuare la prove per materiali mediamente cementati.

Ciononostante nell'ambito del presente lavoro hanno fornito indicazioni assai utili; in primo luogo hanno consentito di accertare da subito il fatto che le miscele 1 e 2 in condizioni di maturazione in acqua (bagnato) non forniscono alcuna significativa resistenza alla penetrazione della punta del Pocket. Questo ha consentito di evitare una poco fruttuosa campagna sperimentale delle miscele 1 e 2 bagnate e di concentrarsi su nuove miscele quali la 5 e la 6. Inoltre gli andamenti ottenuti rappresentano una conferma di quanto ottenuto nella serie di prove monoassiali.

Il Pocket Penetrometer, come si può vedere dalla Fig. 11, è uno strumento piccolo e molto maneggevole. Permette di ricavare il valore di compressione istantaneamente, semplicemente esercitando una determinata pressione con le mani.



Fig. 11: Il pocket penetrometer e relativa prova su cubo

Nel seguito si mostrano i valori ottenuti, presentando per chiarezza espositiva i risultati delle miscele nelle seguenti coppie 1-2, 3-4, 5-6; alla fine si presenteranno i risultati complessivi.

Miscela 1 e 2

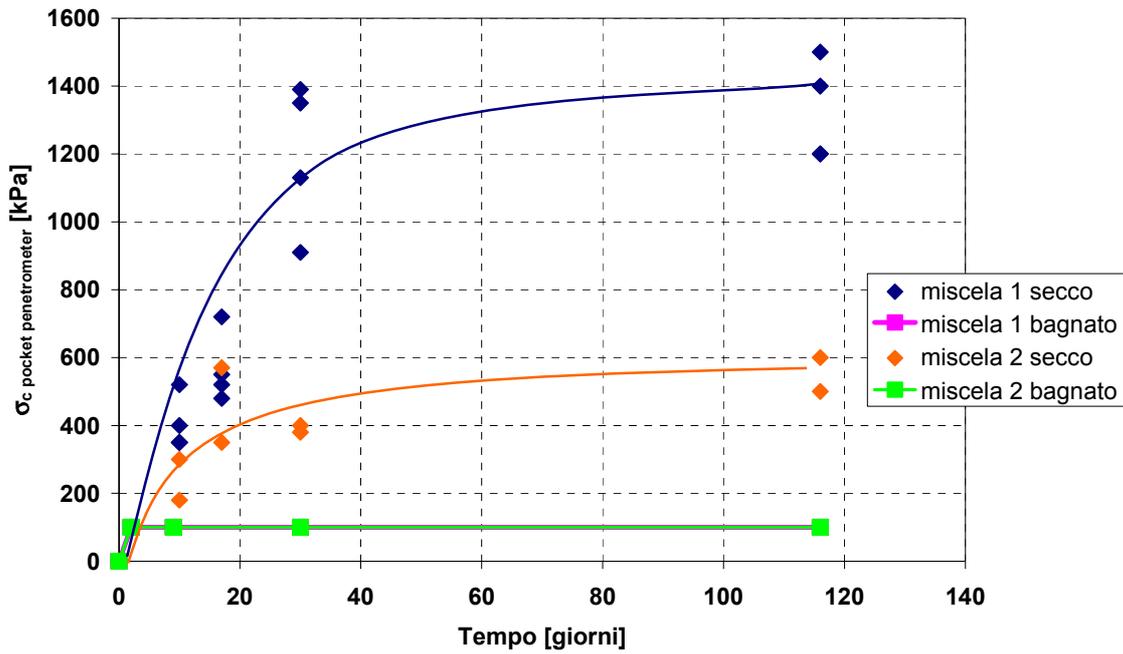


Fig. 12: Resistenza-Tempo di maturazione per le miscele 1 e 2

Miscela 3 e 4

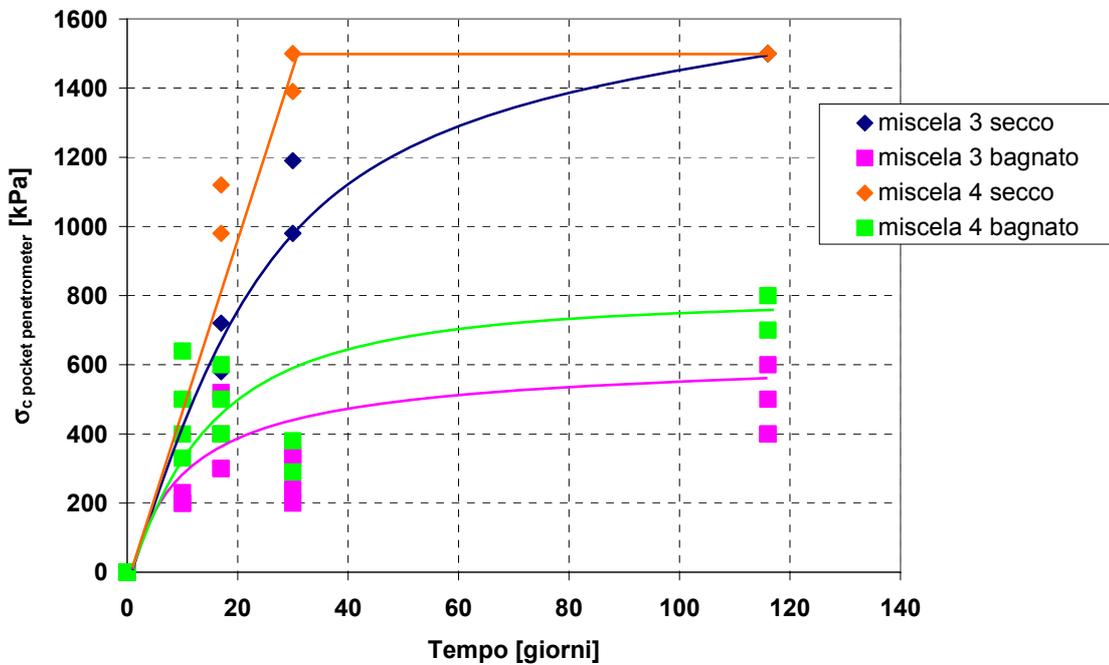


Fig. 13: – Resistenza-Tempo di maturazione per le miscele 3 e 4

Miscela 5 e 6

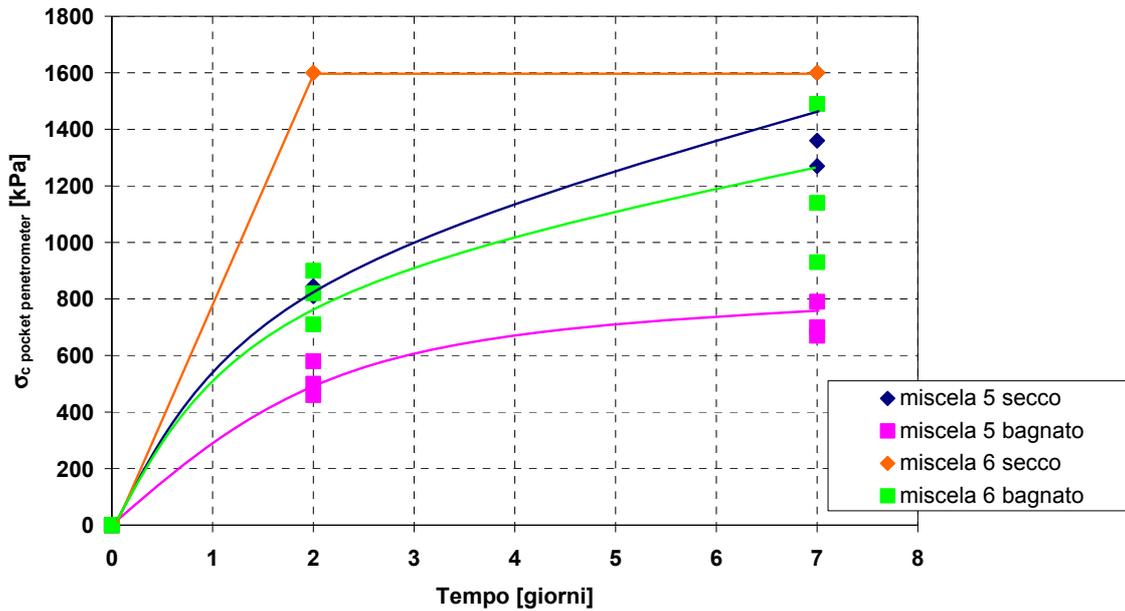


Fig. 14: Resistenza-Tempo di maturazione per le miscele 5 e 6

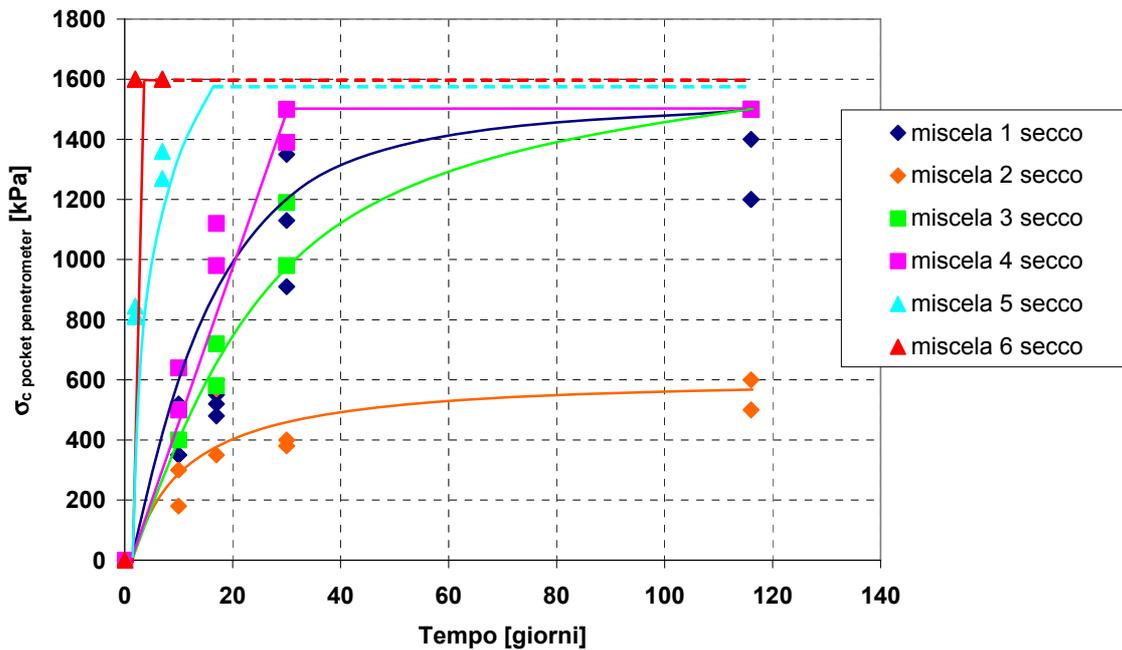


Fig. 15:– Resistenza-Tempo conclusivo per la campagna a “secco” (tratteggio=fondoscala)

Per la sperimentazione a “secco”, osservando i dati di Fig. 15 si può notare che la miscela 2 presenta i valori più bassi di resistenza rispetto a tutte le altre; questo fatto è in accordo con il modesto contenuto di cemento che le compete; inoltre si può osservare che le miscele 1, 3 e 4, denotano un andamento simile con valori molto vicini, posizionabili in uno stesso range. Diversamente la 5 e la 6, come già sottolineato, denotano già per bassi tempi di maturazione alti valori di resistenza alla penetrazione di Pocket Penetrometer (le linee tratteggiate indicano il raggiungimento del fondoscala dello strumento).

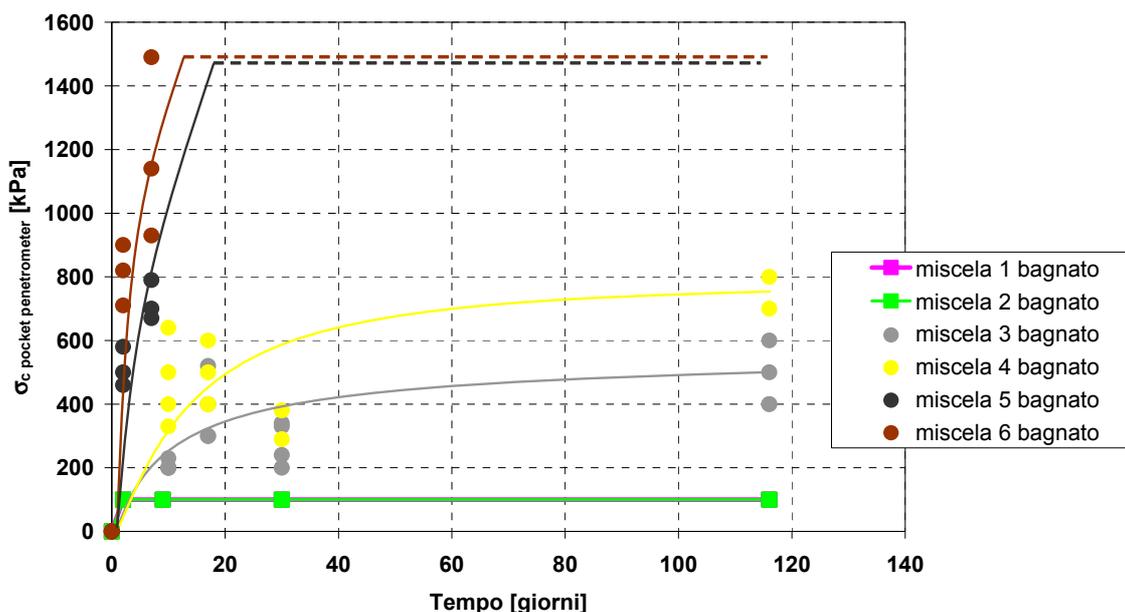


Fig. 16:– Resistenza-Tempo conclusivo per la campagna in acqua “bagnato” (tratteggio=fondoscala).

Per la sperimentazione in acqua (Fig. 16) si assiste invece ad una separazione più netta. Come già evidenziato la miscela 1 e 2 non oppongono alcuna significativa resistenza alla penetrazione; diversamente le miscele 3 e 4 si collocano in una zona intermedia in ogni caso inferiore alla metà della resistenza delle miscele 5 e 6. Per queste ultime miscele già dopo una settimana il Pocket raggiunge il fondoscala (max resistenza misurabile) pertanto da lì in avanti non è stato possibile effettuare le prove Pocket.

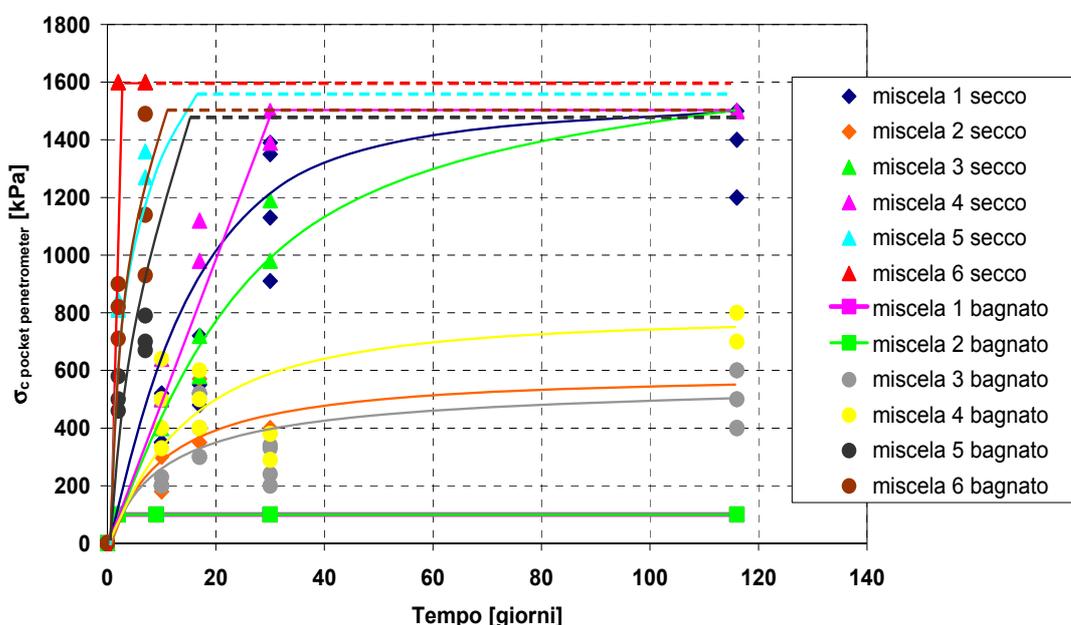


Fig. 17:– Resistenza-Tempo per tutte le miscele (tratteggio=fondoscala).

Infine in Fig. 17 vengono riportate per completezza tutte le curve ottenute per le differenti miscele maturate in condizioni secche o “bagnate”. Mostrando ancora una volta che la resistenza delle miscele 5 e 6 è marcatamente superiore a quella delle altre miscele e che la maturazione in acqua solfatata abbatte di circa la metà la resistenza delle miscele maturate nelle condizioni ideali di camera umida.

3.3. Prove di compressione monoassiale

Nel presente paragrafo vengono mostrati i risultati ottenuti dalle prove di compressione monoassiale eseguiti sistematicamente sulla serie di provini cilindrici.

Come detto i provini sono stati preparati in numero sufficiente per eseguire almeno tre prove per ciascuna miscela per ciascun tempo di maturazione (vedi allegato B) e per le 2 condizioni di maturazioni richieste (secca ed in acqua).

Tutte le prove sono state eseguite con presse di carico in controllo di spostamento imponendo una velocità di avanzamento della base di 0.3mm/min. Nel corso della prova sono stati registrati da opportuni sistemi di acquisizione lo spostamento assiale imposto (avvicinamento della testa di carico alla base di carico del provino) denominato δh [mm] e la reazione del provino in termini di carico assiale denominato F [N]. Pertanto dalle letture in continuo dello spostamento assiale e del carico assiale è stato possibile ricavare, nell'ipotesi di assumere uno stato tensionale e deformativo omogeneo all'interno del provino, sia la deformazione assiale che lo sforzo assiale dalle relazioni:

$$\varepsilon_a = \left(-\frac{\delta H}{H_0} \right) \quad (3.1)$$

$$\sigma_a = \frac{N}{A} \quad [\text{kPa}] \quad (3.2)$$

dove H_0 è l'altezza del provino cilindrico pari a 76mm ed A è l'area di base sempre del provino cilindro calcolata come $A = \pi D^2/4$ ove D è rappresenta il diametro del provino pari a 38mm.

In Fig. 18 sono mostrate le apparecchiature di prova utilizzate ed il telaio di carico con guida e snodo adatto a prove monoassiale per provini cilindrici aventi diametro di 38 mm.



Fig. 18:– Apparecchiatura sperimentale per prove monoassiali

Da una prova monoassiale in cui vengono registrate la deformazione e lo sforzo assiale si ottiene tipicamente una curva del tipo indicato in Fig. 19; in questo grafico vengono calcolati sia il parametro vero e proprio di resistenza a compressione monoassiale indicato come σ_c in [kPa] definito come il massimo sforzo assiale sopportato dal campione sia il modulo di rigidità tangente al tratto iniziale indicato con E in [MPa] definito il coefficiente angolare al tratto lineare iniziale della curva sforzi deformazioni. Tali grafici sono stati ottenuti per tutte prove effettuate (circa 200) consentendo così di valutare per ciascuna miscela la variazione della resistenza e della deformabilità al variare del tempo di maturazione, della composizione e delle condizioni di maturazione (secco o in acqua).

Sforzi - Deformazioni

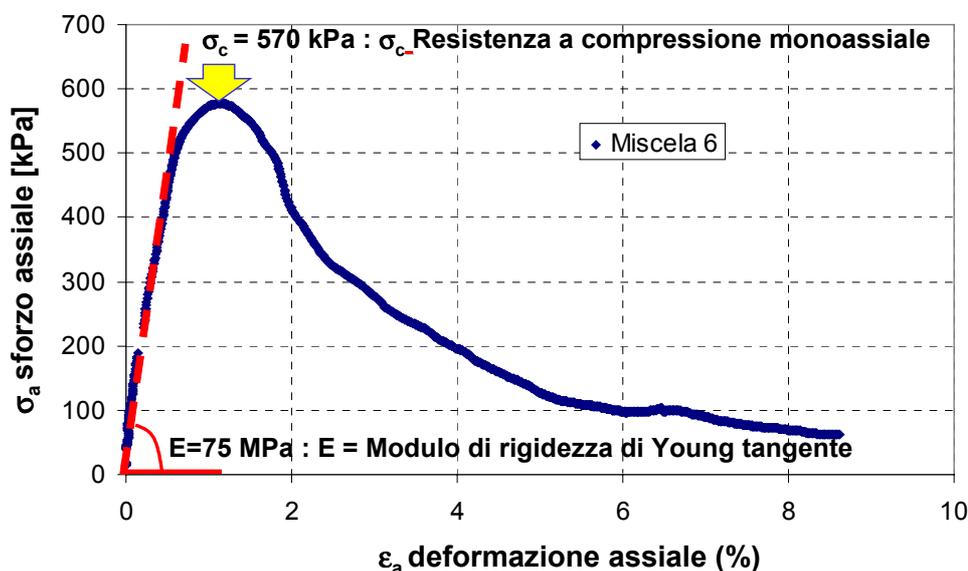


Fig. 19:– Tipica curva sforzi-deformazioni assiali (miscela 6 secco a 7 giorni di maturazione) in cui si definisce σ_c come resistenza alla compressione monoassiale ed E modulo rigidezza tangente di Young

Nei successivi paragrafi verranno presentati i risultati ottenuti con lo stesso criterio di quanto adottato per esporre i risultati dei Pocket Penetrometer. Pertanto verranno presentati i dati per coppie di miscele (1-2, 3-4 e 5-6) ed infine verranno raffrontati tutti i risultati nel loro insieme per poter giungere a delle conclusioni generali sulla campagna sperimentale effettuata.

3.3.1. Miscele 1 e 2

Le prime due miscele testate sono quelle che non prevedono il Limo-Argilla nella composizione, come è visibile in Tab. 6. Nell'ultima colonna viene riportato anche il rapporto acqua/cemento identificato con il parametro a/c .

	Acqua [l]	Pozzolana [kg]	Cemento [kg]	Limo-Argilla [kg]	a/c adim.
Miscela 1	8	20	0.5	0	16
Miscela 2	7	20	0.2	0	35

Tab. 6:- – Composizione delle miscele 1 e 2

Le prove preliminari effettuate con il Pocket Penetrometer hanno evidenziato una resistenza alla compressione nulla per la miscela 1 e 2 maturata in condizioni “bagnate” ovvero in acqua solfata. Pertanto dal momento che non si aveva alcuna cementazione in tali condizioni, non è stato possibile effettuare queste serie di prove monoassiali.

Per la miscela 1 si è proceduto anche ad eseguire un'ulteriore campagna sperimentale (serie denominata in seguito Miscela 1bis) per cercare di comprendere i possibili effetti delle variabili di preparazione dei provini. Per la Miscela 1 bis i provini sono stati realizzati infatti senza seguire le procedure canoniche descritte nei capitoli precedenti, ovvero

senza vibrazione e senza setacciatura del materiale: si è pensato cioè di impastare gli ingredienti così come sono stati forniti. Pertanto nel seguito la serie Miscela 1 fa riferimento alle condizioni utilizzate per tutte le altre miscele (setacciatura e vibrazione per il “secco”) mentre la serie Miscela 1 bis a provini i preparati senza setacciatura e vibrazione.

In Fig. 20 è riportata una tipica curva sforzi deformazioni di questa serie di prove ed il relativo aspetto del campione dopo la prova. Invece in Fig. 21 i risultati complessivi ottenuti per la Miscela 1 e 2 in termini di resistenza σ_c . In Fig. 22 invece sono mostrati le curve sforzi e deformazioni della miscela 1 all stesso tempo di maturazione per mostrare la ripetibilità delle prove e la relativa dispersione dei risultati di σ_c .

Si rimanda all'Appendice A per le tabelle riassuntive con i dati della Miscele 1 e 2.

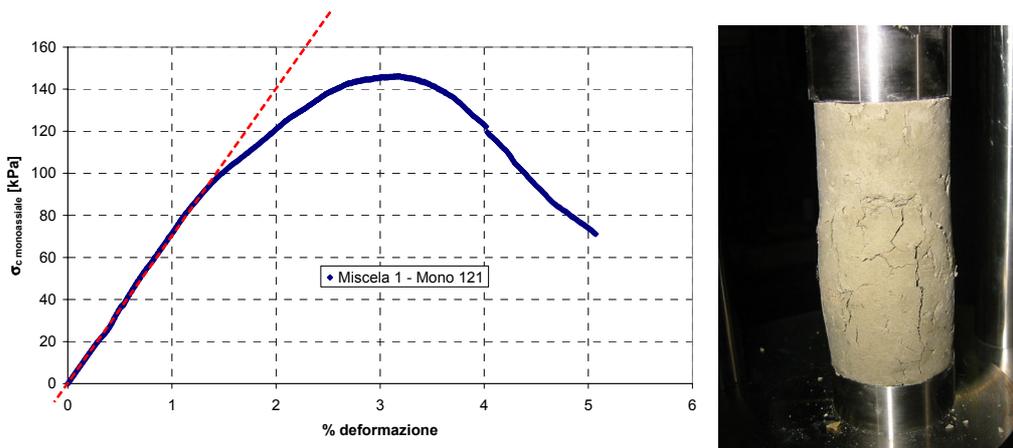


Fig. 20:– Tipica curva sforzi deformazioni-assiale e immagine provino a fine prova Miscela 1 a 59 giorni.

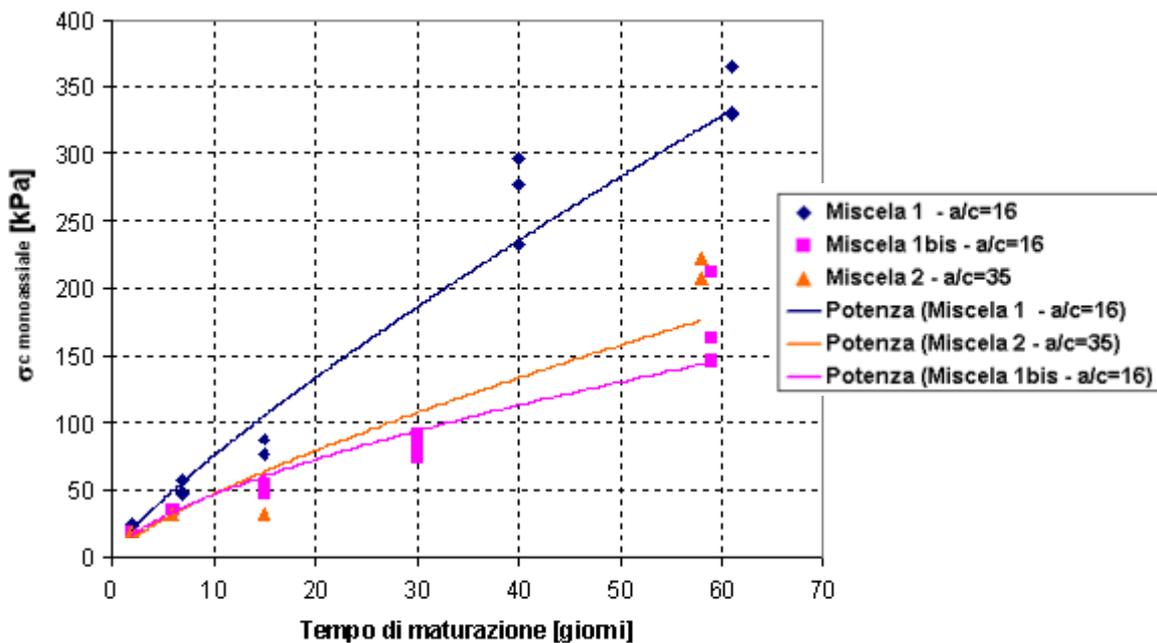


Fig. 21:– Resistenza-tempo riassuntivo per le miscele 1, miscela 1bis e miscela 2 (secche)

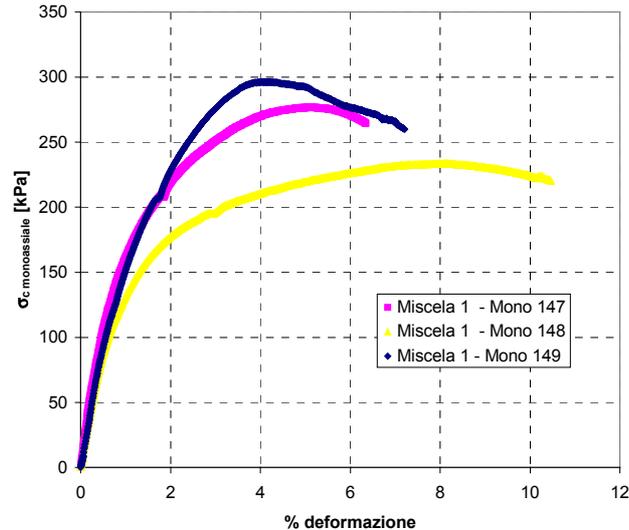


Fig. 22: Curve sforzi-deformazioni assiale per tre provini della miscela 1 allo stesso tempo di maturazione (40g)

Come si può dai risultati riportati in Fig. 21 tutte queste miscele mostrano risultati di resistenza alla compressione monoassiale relativamente modesti. Va sottolineato il fatto che il metodo di preparazione delle miscele influenza il comportamento meccanico. Infatti la miscela 1 mostra valori di resistenza a compressione maggiori della corrispondente miscela 1bis non setacciata e non vibrata. Questo effetto è correlato con il fatto che setacciando e vibrando la miscela si riescono ad ottenere provini più omogenei e più compatti in modo tale da favorire la cementazione. Nel seguito come detto precedentemente si è deciso di setacciare tutte le miscele in modo da avere un fuso granulometrico inferiore ai 5 mm e di vibrare solo le miscele secche. Pertanto sulla luce di quanto emerso dal confronto tra la miscela 1 e miscela 1bis e sulla base dei dati preliminari ottenuti dalle prove con il Pocket si può affermare che i risultati che si otterranno per le maturazioni in acqua (“bagnato”) sono riferiti al comportamento meccanico delle miscele nelle condizioni più sfavorevoli.

Sempre in Fig. 21 è da notare che la minor resistenza della Miscela 2 rispetto alla Miscela 1 dipenda in modo diretto dal minor contenuto di cemento della Miscela 2 rispetto alla Miscela 1 dal momento che entrambe sono state preparate in modo identico con setacciatura e vibrazione.

Infine come visibile in Fig. 22 i valori di rigidità raggiunti dalla Miscela 1 a 40 giorni sono di circa 15 MPa, mentre si segnala che per le altre 2 serie di prove (Miscela 1bis e Miscela 2) i valori di rigidità sono sempre stati inferiori a 10 MPa.

3.3.2. Miscele 3 e 4

Nel presente paragrafo si mostrano i risultati ottenuti per le Miscele 3 e 4 (Tab. 7); esse, e le successive, si differenziano dalle precedenti per la presenza del “limo-argilla” ed da una minor quantità di pozzolana.

	Acqua [l]	Pozzolana [kg]	Cemento [kg]	Limo-Argilla [kg]	a/c adim.
Miscela 3	5.25	5	0.3	10	17.5
Miscela 4	5	5	0.4	10	12.5

Tab. 7: Composizione delle miscele 3 e 4

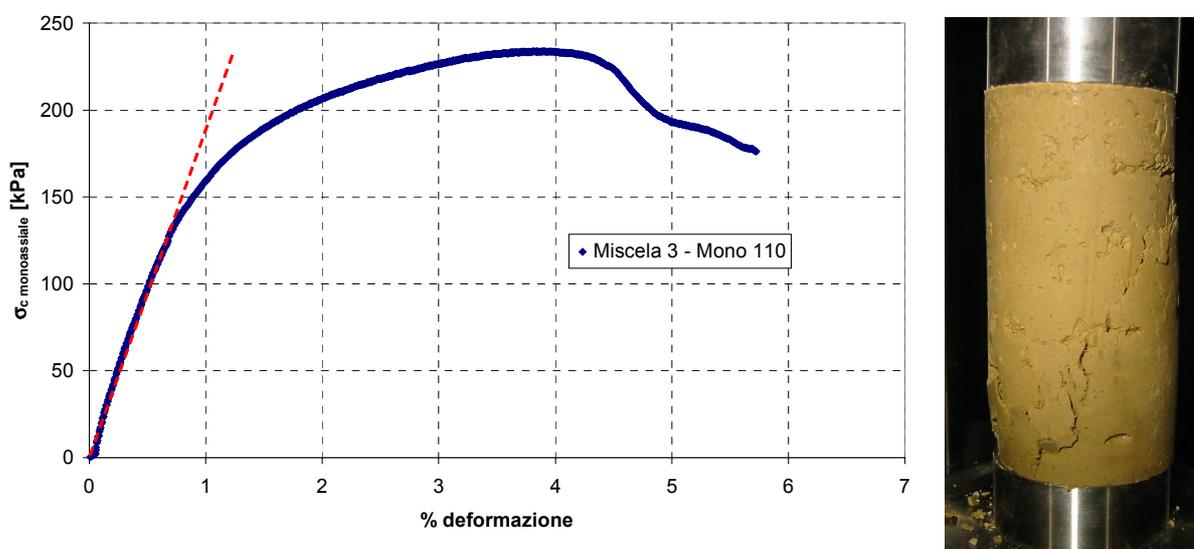
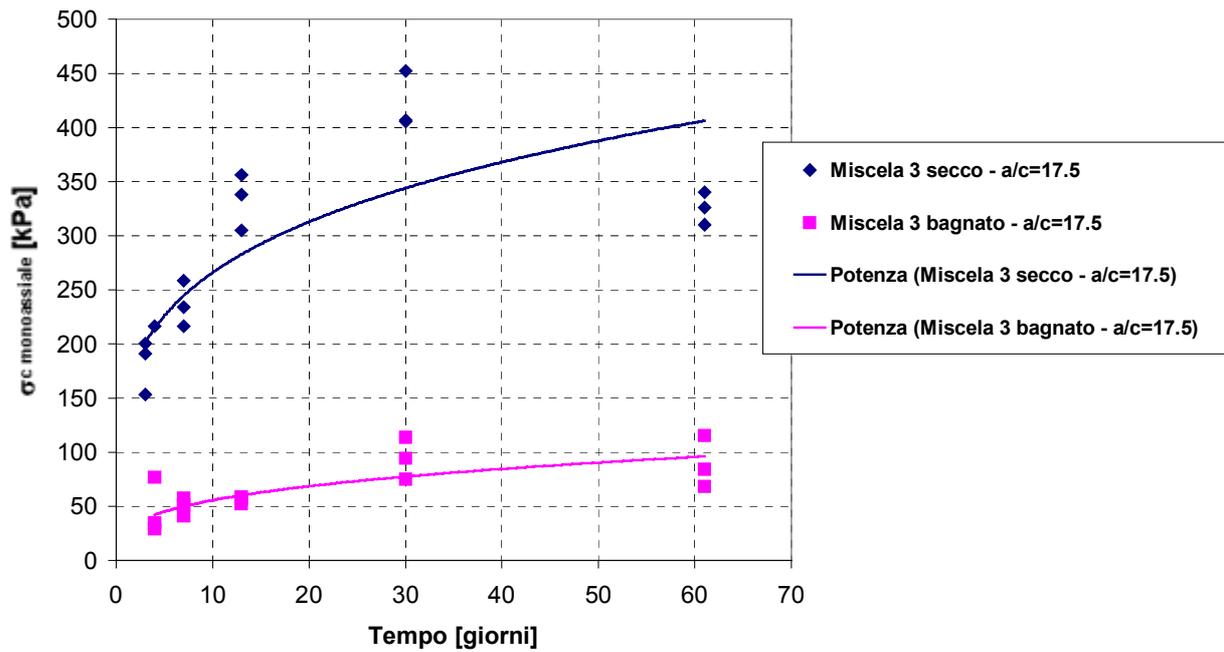


Fig. 23:– Curva sforzi- deformazioni assiale e immagine provino a fine prova per Miscela 3 a 7 giorni.

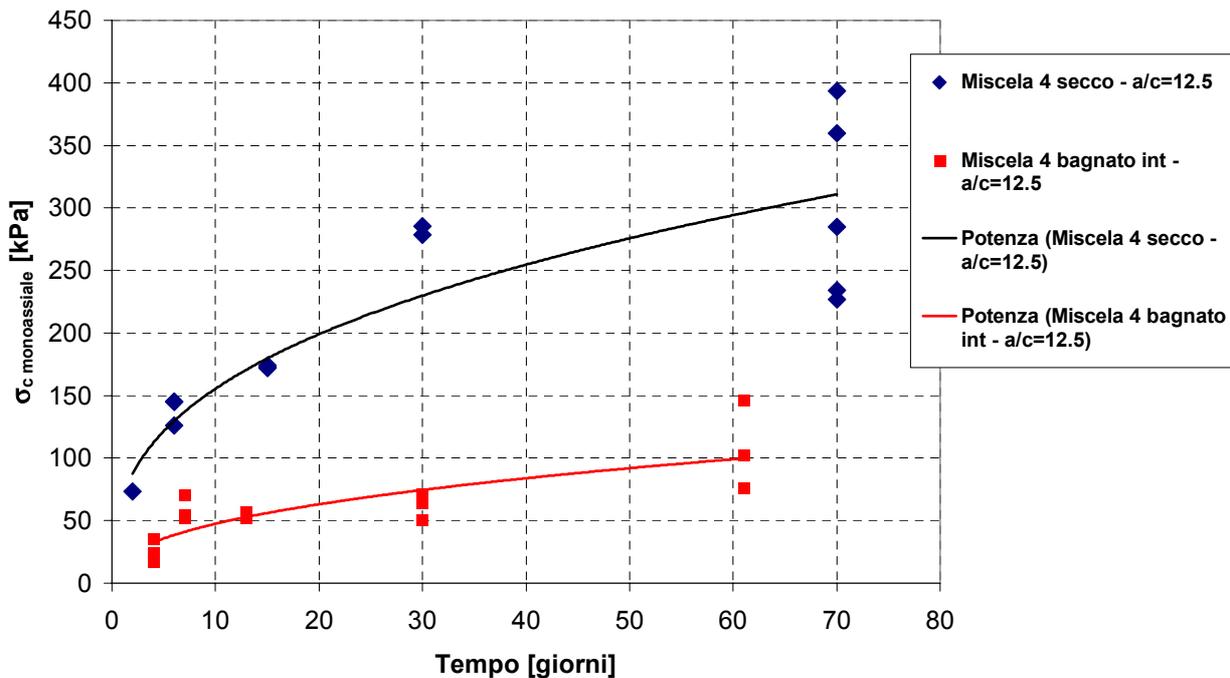
In Fig. 23 è riportata una tipica curva sforzi deformazioni di questa serie di prove ed il relativo aspetto del campione dopo la prova.

Questa serie di prove ha visto la sperimentazione sia su provini maturati in condizioni “secche” (maturazione in camera umida) che in condizioni “bagnate” (in acqua) . Pertanto in Fig. 24a e Fig. 24b si mostrano i risultati complessivi ottenuti per la Miscela 3 e 4 in termini di resistenza σ_c in funzione del tempo di maturazione sia per la serie “secco” che “bagnato”. Per la Miscela 3 in Fig. 25 vengono riportati i riepiloghi delle curve sforzo-deformazione assiale ed le relative stime della rigidezza E tangente in relazione al tempo di maturazione. Da ultimo per la Miscela 4 in Fig. 26 si presentano i riepiloghi delle curve sforzo-deformazione assiale come nella figura precedente per il caso secco e bagnato.

Si rimanda all’Appendice A per i dati dettagliati mostrati in queste figure ed ulteriori approfondimenti sulle prove monoassiali delle Miscele 3 e 4.



a)



b)

Fig. 24: Resistenza monoassiale σ_c in funzione del tempo di maturazione per la miscela 3 (a) e per la miscela 4 (b) sia per il “secco” che per il “bagnato”.)

Osservando i grafici riportati in Fig. 24a Fig. 24b si osserva innanzitutto che la serie maturata in acqua solfata (denominata “bagnato”) presenta una resistenza σ_c molto bassa (circa $\frac{1}{4}$) rispetto alla resistenza evidenziata nel caso secco. Inoltre l’esigua differenza di cemento (vedere Tab. 7) fa sì che la resistenza meccanica σ_c delle due miscele sia sostanzialmente la stessa sia nelle due condizioni di maturazione.

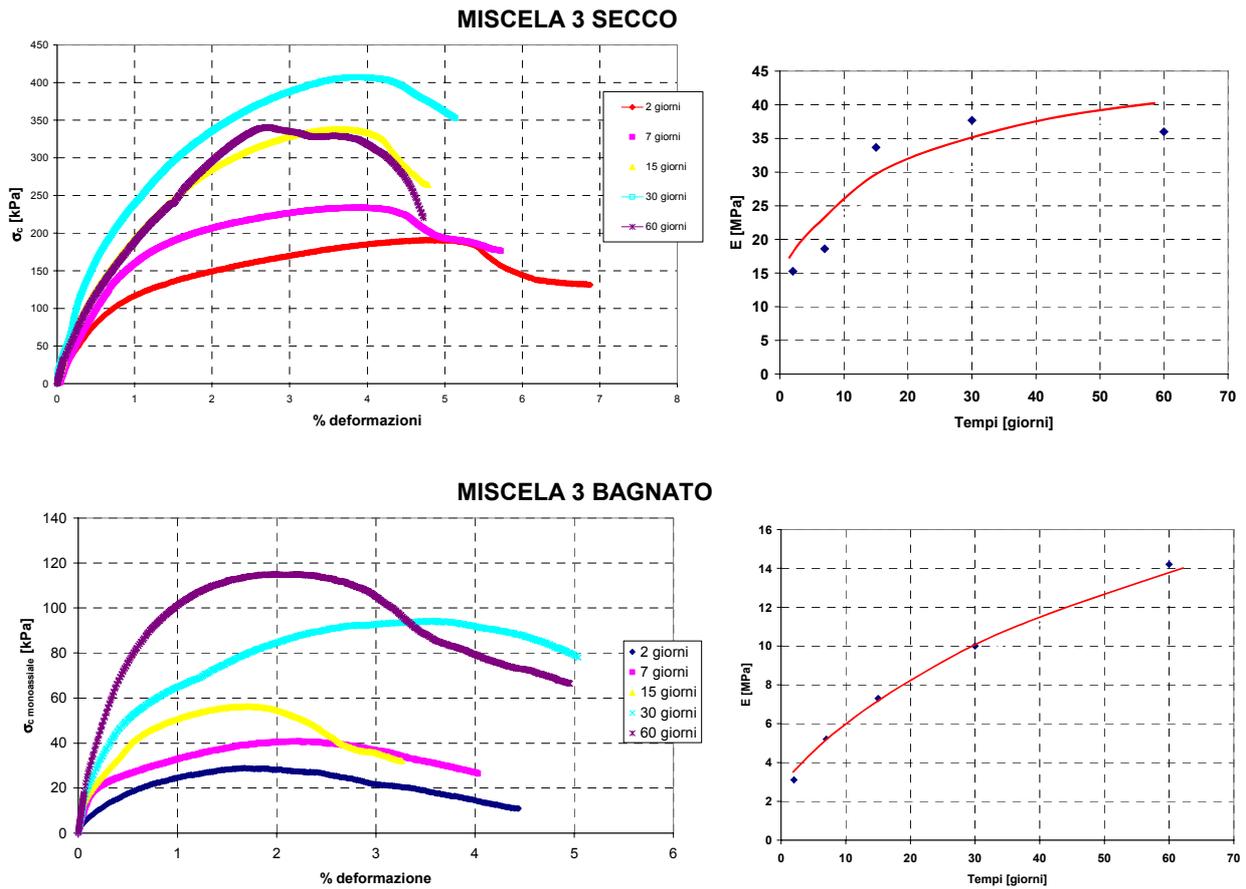


Fig. 25: Riepilogo curve sforzo-deformazione assiale e relativi valori della rigidità E in relazione al tempo di maturazione per la Miscela 3 “secco” e “bagnato”

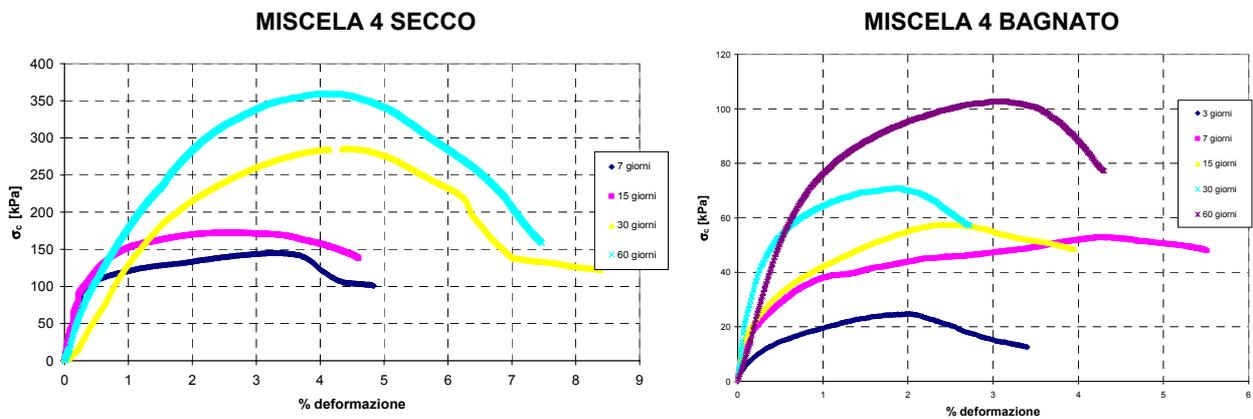


Fig. 26: Riepilogo curve sforzo-deformazione assiale in relazione al tempo di maturazione per la Miscela 4 “secco” e “bagnato”

Le curve sforzo-deformazione assiale di queste miscele sono generalmente caratterizzate da una marcata non linearità con un comportamento duttile fino al raggiungimento di un massimo (σ_c) per deformazioni assiali superiori a 2%; successivamente si osserva una progressiva diminuzione della resistenza spesso a valori residui non nulli. La rigidità tangente tratto iniziale E si mantiene comunque modesta; intorno ai 30 MPa per il secco e non superiore ai 15 MPa per il “bagnato” (Miscela 3).

3.3.3. Miscele 5 e 6

Nel presente paragrafo si mostrano i risultati ottenuti per le Miscele 5 e 6 (Tab. 8); esse hanno lo stesso contenuto di limo-argilla e pozzolana delle precedenti ma presentano un contenuto di cemento assai più elevato.

	Acqua [l]	Pozzolana [kg]	Cemento [kg]	Limo-Argilla [kg]	a/c adim.
Miscela 5	4.05	5	0.8	10	5.1
Miscela 6	5	5	1.6	10	3.1

Tab. 8: Composizione delle miscele 5 e 6

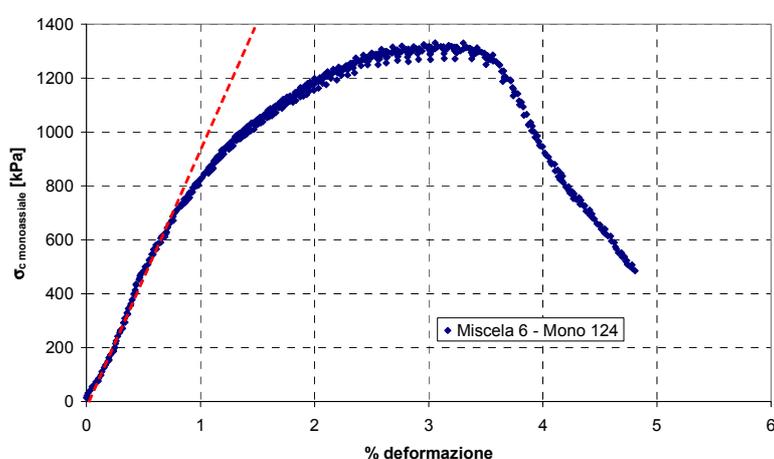
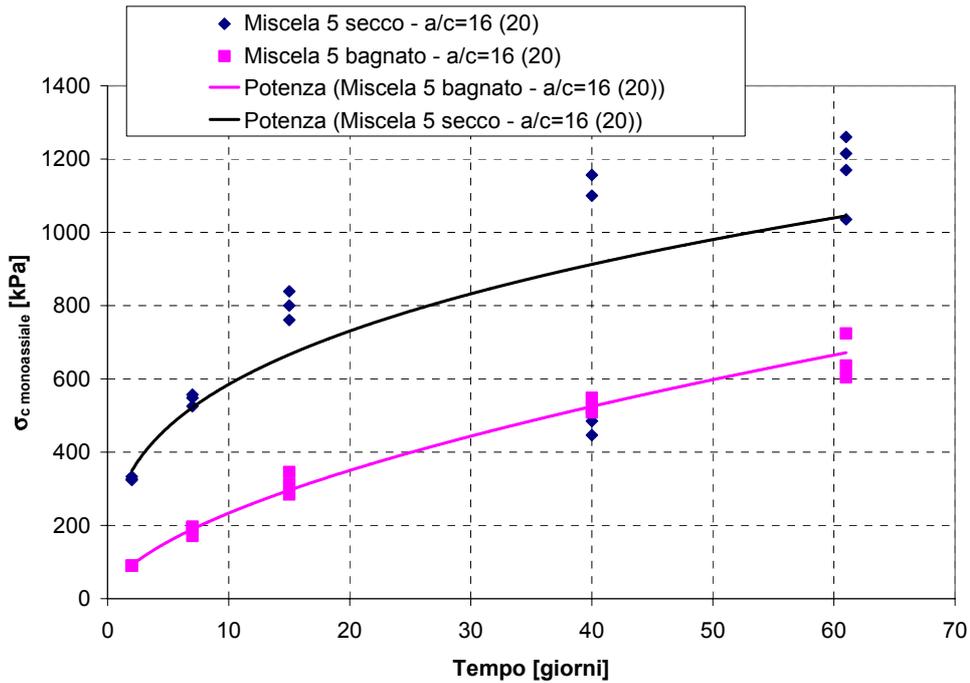


Fig. 27:– Tipica curva sforzi deformazioni-assiale e immagine provino a fine prova Miscela 6 a 40 giorni.

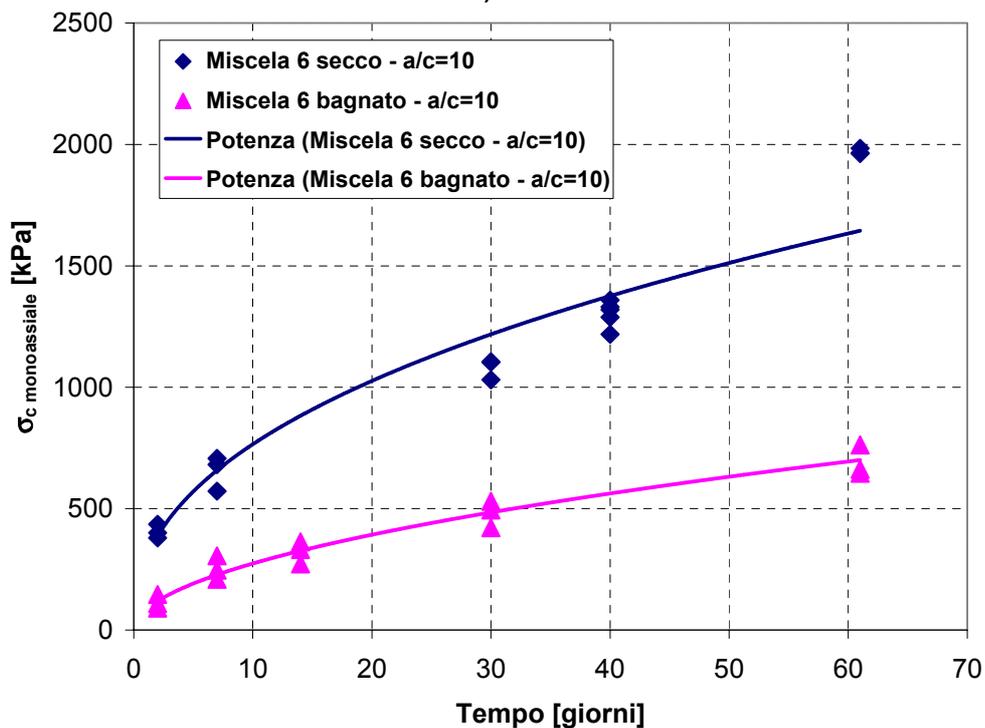
In Fig. 27 è riportata una tipica curva sforzi deformazioni di questa serie di prove ed il relativo aspetto del campione dopo la prova.

Anche questa serie di prove ha visto la sperimentazione sia su provini maturati in condizioni “seche” (maturazione in camera umida) che in condizioni “bagnate”. Pertanto in Fig. 28a e Fig. 28b si mostrano i risultati complessivi ottenuti per la Miscela 5 e 6 in termini di resistenza σ_c in funzione del tempo di maturazione sia per la serie “secco” che “bagnato”. Successivamente in Fig. 29 e Fig. 30 per entrambe le miscele vengono riportati i riepiloghi delle curve sforzo-deformazione assiale ed le relative stime della rigidezza E tangente in relazione al tempo di maturazione.

Si rimanda all'Appendice A per i dati mostrati in queste figure.



a)

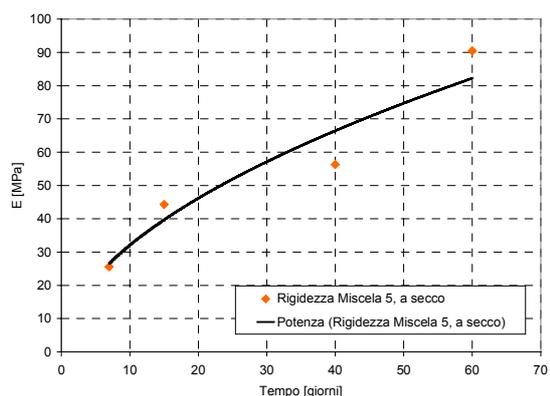
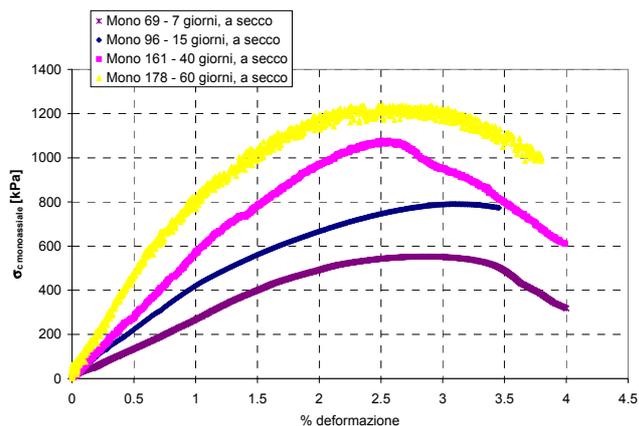


b)

Fig. 28: Resistenza monoassiale σ_c in funzione del tempo di maturazione per la miscela 5 (a) e per la miscela 6 (b) sia per il “secco” che per il “bagnato”.)

Osservando i grafici riportati sopra si osserva nuovamente che la serie maturata in acqua solfata (denominata “bagnato”) presenta una resistenza σ_c ridotta di circa 1/3 rispetto alla resistenza del caso secco, ma in questo caso si raggiungono valori assai più elevati dei casi precedenti: fino a 2000 kPa per il “secco” e fino 700 kPa per il “bagnato”. Si può invece notare che il doppio contenuto di cemento della miscela 6 rispetto alla 5 non si riflette in un altrettanto grande incremento delle resistenze; mentre per il “secco” l’incremento di σ_c è del 30% per il “bagnato” la resistenza è pressochè la medesima.

MISCELA 5 SECCO



MISCELA 5 BAGNATO

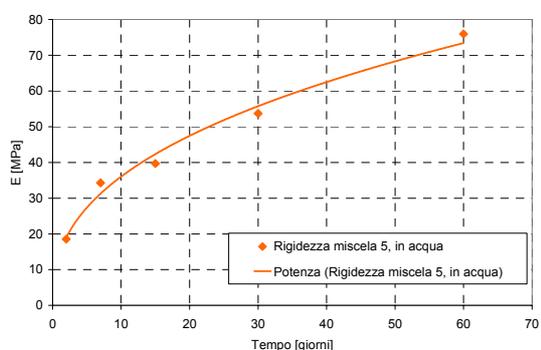
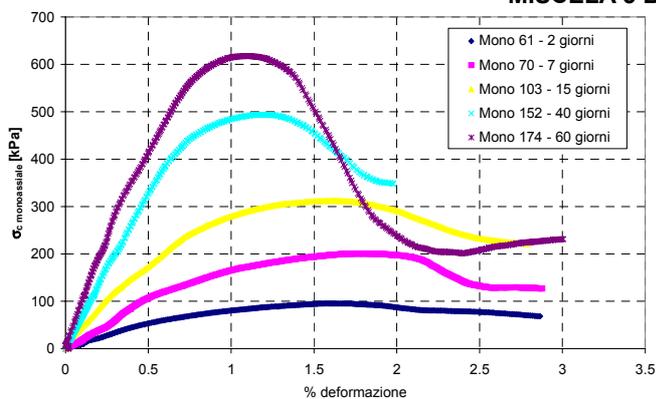
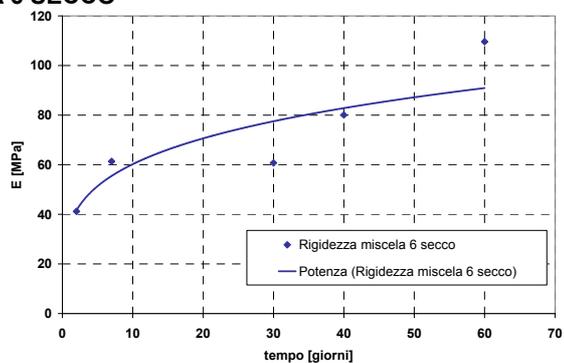
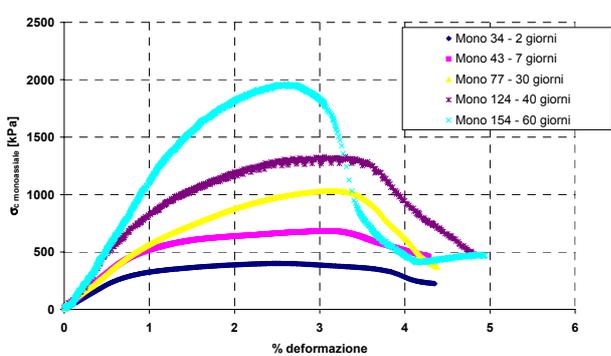


Fig. 29: Riepilogo curve sforzo-deformazione assiale e relativi valori della rigidezza E in relazione al tempo di maturazione per la Miscela 5 "secco" e "bagnato"

MISCELA 6 SECCO



MISCELA 6 BAGNATO

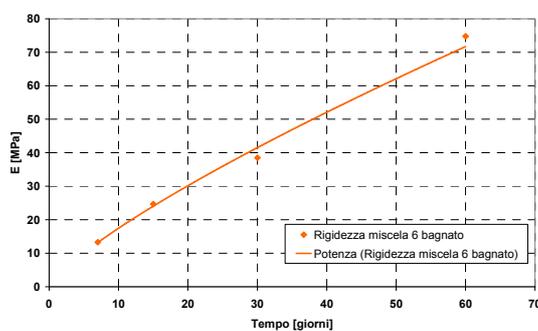
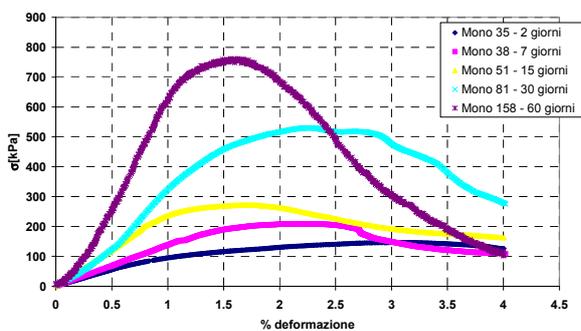


Fig. 30: Riepilogo curve sforzo-deformazione assiale e relativi valori della rigidezza E in relazione al tempo di maturazione per la Miscela 6 "secco" e "bagnato"

Le curve sforzo-deformazione assiale di queste miscele 5 e 6 sono caratterizzate da un iniziale tratto lineare generalmente più esteso rispetto ai casi precedenti, successivamente si osserva sempre un tratto con una marcata non linearità fino al raggiungimento di un massimo (σ_c). In queste serie di prove è assai più evidente la transizione da un comportamento duttile ad un comportamento fragile al crescere del tempo di maturazione segno del progressivo effetto di cementazione del legante; si osservi a riguardo in particolare il riepilogo delle curve sforzi-deformazioni per la miscela 5 “bagnato”.

Da notare in particolare che in queste serie la rigidità tangente tratto iniziale E assume valori significativi sia per il “secco” che per il “bagnato” raggiungendo a 60 giorni valori intorno ai 70 MPa per entrambe le miscele. Anche per la rigidità si può notare che il doppio contenuto di cemento della miscela 6 rispetto alla 5 non si rifletta in un altrettanto incremento di E tangente: mentre per il secco l’incremento di E è di circa il 20% per il bagnato la rigidità è pressoché la medesima.

3.3.4. Considerazioni conclusive sulle prove monoassiali

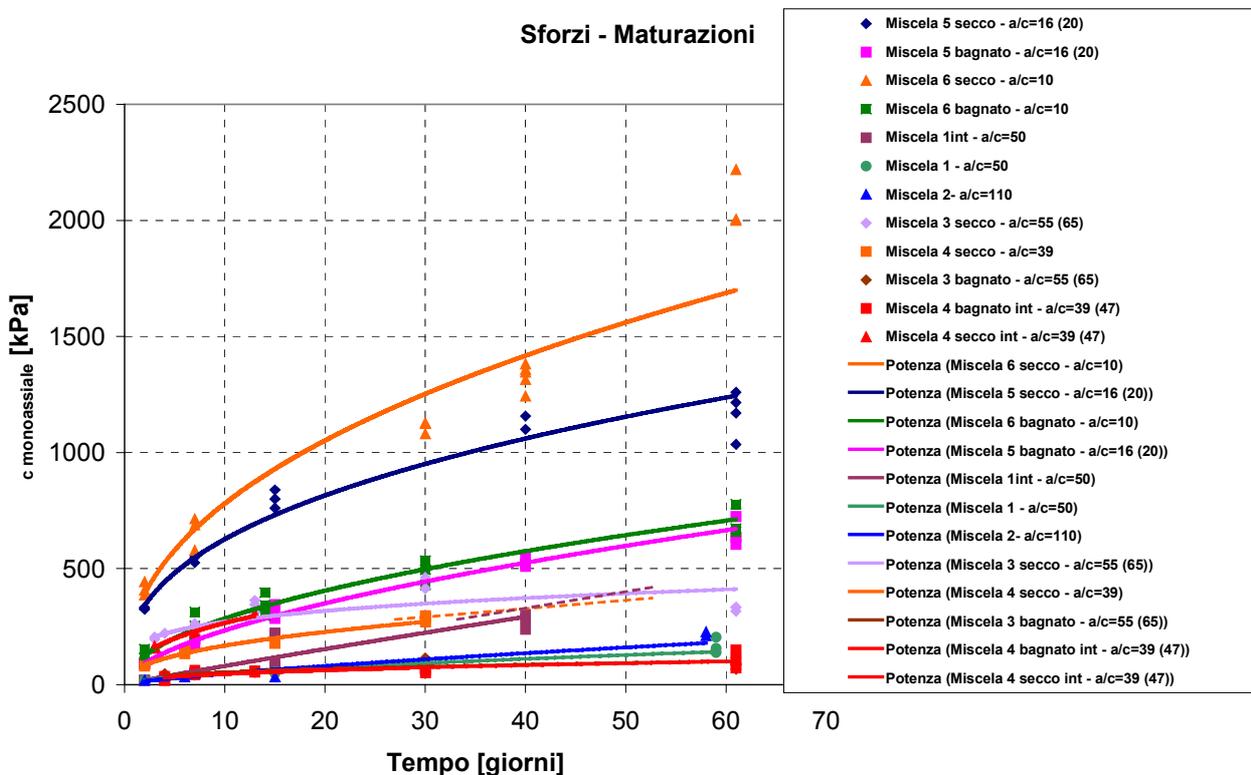


Fig. 31: Resistenza monoassiale σ_c in funzione del tempo di maturazione per tutte le miscele (sia per il “secco” che per il “bagnato”).

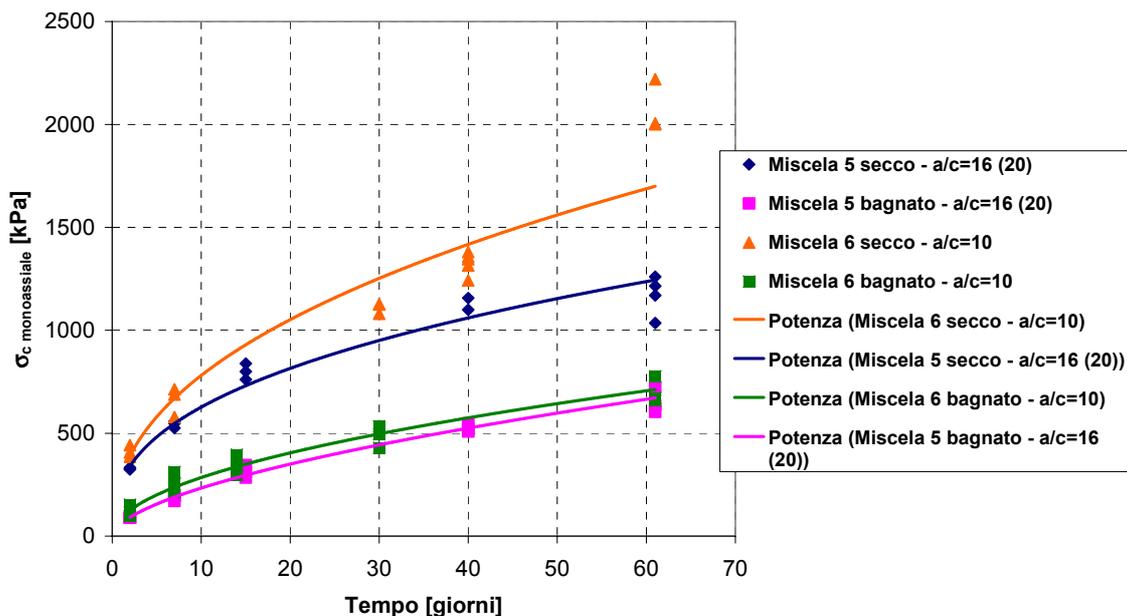


Fig. 32: Riepilogo curve sforzo-deformazione assiale e relativi valori della rigidezza E in relazione al tempo di maturazione per la Miscela 6 "secco" e "bagnato"

In Fig. 31 sono riportati gli andamenti della resistenza a compressione monoassiale σ_c in relazione ai tempi di maturazione per tutte le sei miscele per le 2 modalità di maturazione ("secco" e "bagnato"). Si può notare chiaramente che quattro curve raggiungono livelli più elevati rispetto a tutte le altre, quelle relative sia al "bagnato" che al "secco" della miscela 5 e 6. Tali curve infatti sono le uniche che dopo un tempo di maturazione superiore ai 30 giorni raggiungono valori di resistenza alla compressione monoassiale superiore ai 500 kPa.

A questo punto pare opportuno effettuare un confronto diretto della miscela 5 e 6 così come mostrato in Fig. 32. Da tale sovrapposizione emerge ancor più chiaramente che il doppio contenuto di cemento della miscela 6 rispetto alla 5 non solo si riflette solo del 30% per le serie maturate in camera umida ("secco") ma non ha alcuna significativa influenza per le serie maturate in acqua "bagnato".

Pertanto si può concludere che tra le miscele esaminate così come richiesto dall'Appendice B del Contratto e volendo minimizzare per come possibile i costi dei costituenti le suddette miscele, la miscela 5 si mostra essere quella con le migliori caratteristiche di resistenza e rigidezza.

3.4. Risultati delle prove di permeabilità sulle miscele

Le prove di permeabilità vengono eseguite al fine di determinare in laboratorio il coefficiente di permeabilità k , ovvero quel parametro che caratterizza numericamente la suscettività di una terra a farsi attraversare dall'acqua.

Esse si basano su un concetto comune: determinare la quantità d'acqua che filtra attraverso il campione di terreno in un certo intervallo di tempo, per effetto di un carico idraulico noto. I tempi di prova richiesti variano notevolmente a seconda del tipo di terreno, per questa ragione sono state sviluppate differenti metodologie "convenzionali" di laboratorio:

- la prova a carico idraulico costante, per terre con coefficiente di permeabilità k maggiore di 10^{-3} cm/s : è riservata alle ghiaie ed alle sabbie pulite, a miscele di sabbia e ghiaia e comunque a terre a grana grossa con percentuali di passante al setaccio ASTM 200 inferiori al 10%;
- la prova a carico idraulico variabile, per terre con coefficiente k compreso tra 10^{-6} e 10^{-3} cm/s: è riservata alle sabbie fini, ai limi organici ed inorganici, alle miscele di sabbia, limo e argilla;
- la prova di consolidazione edometrica, per terre con coefficiente k minore di 10^{-6} cm/s: a differenza delle precedenti destinate alla determinazione diretta del coefficiente k , essa viene effettuata sulle terre coesive poco permeabili e consente di valutare l'entità di k indirettamente rifacendosi a parametri ottenuti dall'elaborazione della prova stessa.

Per misurare la permeabilità di miscele di materiale cementato, si è deciso di impiegare l'apparecchiatura triassiale che in certi casi è preferibile alle convenzionali procedure sopra menzionate: il principio che sta alla base di questo tipo di prova è quello di mantenere un flusso di acqua all'interno del campione attraverso una nota differenza di pressione, e di misurarne l'entità mentre esso è soggetto ad un noto sforzo efficace.

Ne derivano alcuni vantaggi: il campione innanzitutto viene saturato mediante incrementi della back-pressure, riducendo così o eliminando le bolle di aria che possono ostacolare il flusso e la saturazione in questo modo viene raggiunta più velocemente rispetto ad un flusso prolungato.

Tali prove sono state eseguite su quelle miscele che potrebbero essere destinate al riempimento dei livelli allagati (miscele 3,4,5,6): oltre a soddisfare adeguatamente le proprietà meccaniche richieste, un altro requisito fondamentale che esse dovranno possedere è un basso valore di permeabilità.

3.4.1. Descrizione della strumentazione

L'apparecchiatura di prova è la stessa utilizzata per l'esecuzione di prove triassiali, ad eccezione del sistema di applicazione delle forze verticali, poiché lo scopo non era quello di determinare i parametri di resistenza a taglio delle miscele in esame; essa consiste dunque in due parti distinte:

- il sistema di applicazione delle pressioni in cella grazie ad un dispositivo idraulico o a mercurio;
- la cella è composta da un cilindro trasparente di plexiglass, confinato tra due basamenti rigidi di acciaio. Le uscite verso l'esterno previste in ciascuna di essa sono quattro: il tubo di adduzione dell'acqua, la valvola di sfiato e i drenaggi che collegano le facce superiore e inferiore del provino con l'esterno.

L'abbassamento verticale viene invece misurato con un micrometro millesimale di sensibilità pari al centesimo di millimetro.

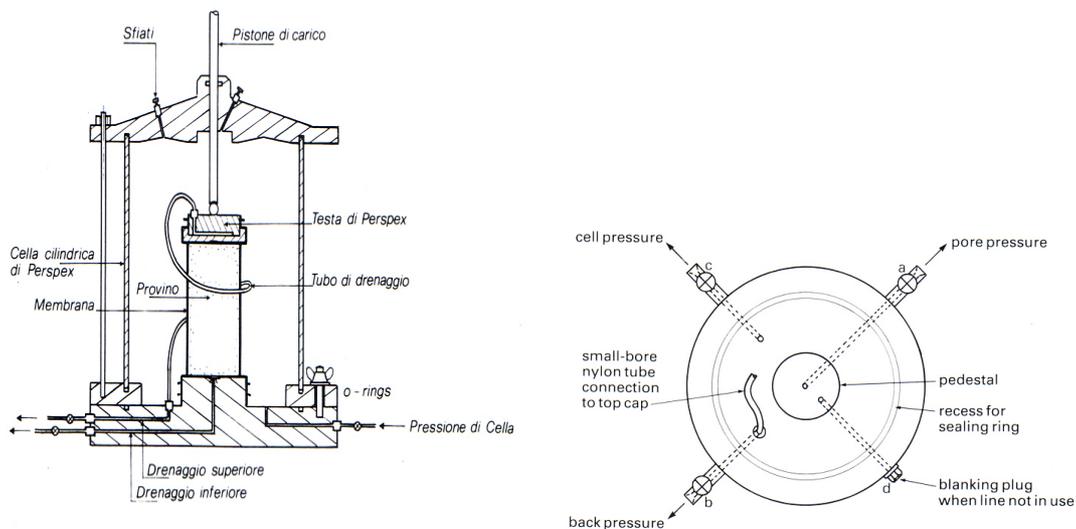


Fig. 33: Schema cella triassiale: sezione e base.

Completano l'apparecchiatura di prova due pietre porose circolari di diametro pari a quello del provino, la membrana di rivestimento e gli o-rings, gli anelli per la sigillatura delle teste del provino. L'acquisizione dei dati è avvenuta principalmente mediante calcolatore. Poiché le letture da strumentazione elettronica sono sensibili alle variazioni termiche, si è cercato di mantenere il più possibile stabili le condizioni di temperatura all'interno del Laboratorio, sia di giorno che di notte.

3.4.2. La preparazione dei provini

Le misure di permeabilità sono state eseguite sui provini cilindrici aventi le stesse dimensioni di quelli utilizzati per le prove di compressione monoassiale, infatti sono stati utilizzati provini delle stesse serie maturate in acqua "bagnato" utilizzate nelle prove monoassiali.

Sui provini una volta tolti dalla camera umida, ed estratti mediante fustella dai cilindri di ottone usati come "mold" è stato spalmato del grasso di silicone sulla superficie laterale, dopodiché il provino è stato avvolto in una membrana di lattice di protezione che ha la funzione di isolarlo completamente dall'acqua di cella. Tale operazione effettuata mediante un'apparecchiatura in grado di realizzare il vuoto è mostrata in Fig. 34.

Sulle basi del provino sono stati collocati due dischi di carta da filtro in corrispondenza della superficie laterale non sono state poste le strisce di carta da filtro, normalmente utilizzate nelle prove triassiali, che altererebbero la determinazione del coefficiente di permeabilità.

Infine il provino è stato collocato tra due pietre porose collegate con l'esterno e viene sigillato con anelli di gomma, detti o-rings nella parte superiore ed inferiore per mantenerlo stabilmente fissato alle teste di drenaggio.



Fig. 34: preparazione dei provini; spalmatura del grasso di silicone e posizionamento del provino nella membrana



Fig. 35: Sistemazione del provino prima dell'esecuzione della prova.

3.4.3. Procedura di prova

Collocato il provino al centro del piedistallo di base, viene calata la cella di plexiglas. Essa viene chiusa ermeticamente e riempita con acqua. I circuiti idraulici come il sistema di drenaggi, le valvole e i canali trasduttori vengono deareati e saturati con acqua come avviene per l'esecuzione di una prova triassiale standard.

La prima fase consiste nell'applicazione istantanea di una pressione idrostatica di contenimento o pressione di cella σ_c con i drenaggi collegati alle teste del campione mantenuti chiusi.

Si procede alla saturazione del provino attraverso incrementi successivi della back pressure di 100 kPa ciascuno applicata generalmente all'estremità inferiore del provino. Tuttavia per mantenere costante la pressione effettiva sul campione, la pressione di cella deve essere aumentata della stessa quantità. Il volumometro, per mezzo del quale è possibile controllare il volume d'acqua entrante nel campione, a saturazione ultimata registra un valore costante.

La verifica sperimentale dell'avvenuta saturazione viene ottenuta chiudendo la valvola d'entrata della back pressure, inserendo sul drenaggio inferiore un trasduttore di pressione, applicando un incremento istantaneo di pressione in cella in corrispondenza del quale si registra una variazione di pressione dei pori nel campione.

Viene quindi valutato il coefficiente dei pori B (Skempton 1973) definito come:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad (3.3)$$

dove al numeratore si hanno gli incrementi della pressione dei pori e al denominatore quelli della pressione di cella, che in questo caso sono stati costanti e pari a 100 kPa.

Skempton dimostrò inoltre che l'indice di saturazione S è correlabile al valore di B , ovvero alle caratteristiche meccaniche dei materiali testati.

Tecnicamente il test viene eseguito impedendo il drenaggio del provino ed incrementando a velocità controllata la pressione di cella: ciò comporta la compressione e la dissoluzione dell'aria presente all'interno del provino.

Per lo svolgimento delle prove di permeabilità, si è ritenuto sufficiente che tutti i provini avessero una saturazione pari al 95%.

Al termine del B-test vengono aperti i drenaggi in modo da consentire un flusso d'acqua all'interno del campione.

Ottenuto dunque il valore di saturazione desiderato, si è dato inizio alla fase di consolidazione isotropa che avviene ad una pressione efficace di confinamento pari a 5 kPa, mantenendo aperti i drenaggi della back pressure.

Se la fase di saturazione presenta una durata che dipende dal tipo di materiale e dall'iniziale grado di saturazione e può anche non essere eccessivamente prolungata, la misura della permeabilità è influenzata dal tempo che è stato necessario al campione per consolidare, che può variare da alcune ore a diversi giorni.

Tale fase si ritiene completata quando la pressione dei pori in eccesso viene dissipata; successivamente viene applicato un gradiente idraulico: una differenza di pressione di 20 kPa applicata tra le basi del provino, può essere sufficiente per dare inizio ad un flusso internamente al provino.

Per le miscele 3 e 4 l'applicazione di tale gradiente si è rivelata sufficiente; ciò non è avvenuto per la miscela 5, per la quale si è cominciato con 20 kPa e in un secondo tempo si è reso necessario un incremento fino a 30 kPa.

Per la miscela 6, che contiene la maggior quantità di cemento e la cui prova di permeabilità è stata eseguita dopo la 5, si è applicato un unico ed iniziale gradiente idraulico pari a 30 kPa.

La permeabilità può quindi essere ricavata dalla legge di Darcy:

$$k = \frac{q}{i \cdot A} \quad (3.4)$$

dove :

- q è la portata di flusso espressa in m^3/s
- A è l'area della sezione del provino [m^2]: si è assunto il diametro di 38mm.
- i è il gradiente idraulico (definito come il rapporto tra il gradiente idraulico Δh ed il percorso di filtrazione Δs pari all'altezza del provino H_0 di 76mm (si è considerata una differenza di pressione di 1 kPa è equivalente a una colonna di acqua pari a 101.94 mm.)

3.4.4. Risultati delle prove permeabilità'

Nel seguito si mostrano nel dettaglio le prove effettuate per determinare la permeabilità delle miscele 5 e 6 e in sintesi i risultati delle miscele 3 e 4

Miscela 5

La saturazione è la fase che ha presentato una maggiore durata, pari all'incirca a 100 ore, a conseguenza del fatto che la miscela contiene una elevata quantità di cemento e il provino ha avuto una maturazione in acqua superiore ai 60 giorni; esso presentava una superficie laterale priva di vuoti o danneggiamenti, il flusso d'acqua all'interno del provino

non è dunque avvenuto attraverso canali preferenziali ma attraverso una struttura abbastanza compatta e cementata.

Al termine della fase di consolidazione, è stato applicato un gradiente pari a 20 kPa e dopo circa 24 ore, attraverso l'espressione precedentemente citata [4.1] è stato determinato un valore di permeabilità pari a $2.65 \cdot 10^{-9}$ cm/s.

Per avere una conferma successiva al risultato ottenuto, è stato incrementato il gradiente fino a 30 kPa e trascorse 24 ore, si è rilevato un coefficiente $k = 8.07 \cdot 10^{-9}$ cm/s, valore che si è mantenuto pressochè costante nelle successive 48 e 96 ore. In Fig. 36 si presenta l'andamento della pressione dei pori al trascorrere del tempo, durante le fasi di saturazione, di consolidazione, di applicazione dei gradienti idraulici e di determinazione della permeabilità (punti A e B).

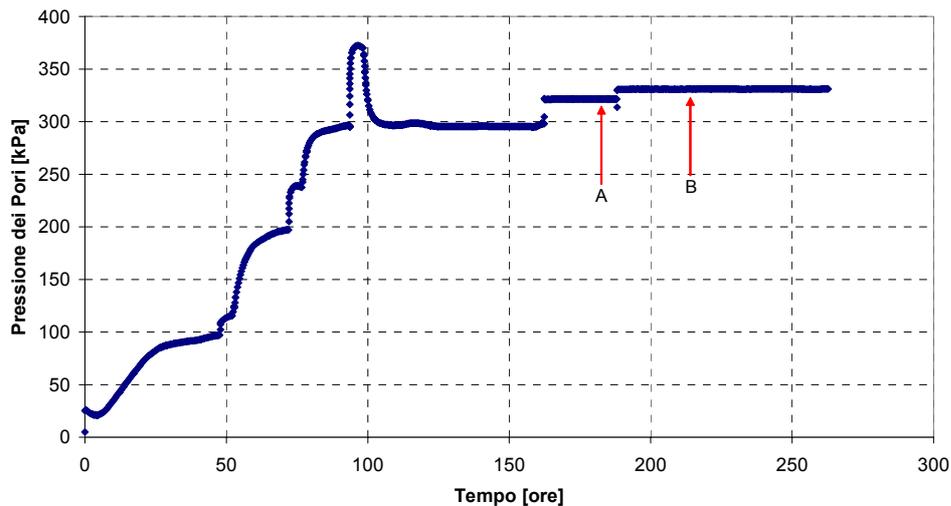


Fig. 36: Miscela 5: andamento della pressione dei pori nelle varie fasi della prova di permeabilità

	Miscela 5: A(24 h)	Miscela 5: B(48 h)
q [cm ³]	0.05	0.30
ΔH [cm]	200	300
k [cm/s]	$2.65 \cdot 10^{-9}$	$8.07 \cdot 10^{-9}$

Tab. 9:- Riepilogo delle misure di permeabilità.

Miscela 6

La fase di saturazione anche per la miscela 6 è stata superiore a 200 ore; le condizioni in cui si trovava il provino prima dell'esecuzione della prova sono le medesime precedentemente accennate per la miscela 5 e la maturazione ancora superiore ai 60 giorni.

Al termine della fase di consolidazione è stato applicato un carico idraulico pari a 30 kPa e trascorse 24 ore, si è registrato un valore di permeabilità pari a $9.86 \cdot 10^{-9}$ cm/s.

Per le letture successive non si sono riscontrate variazioni sensibili.

La miscela 6 presenta un valore di permeabilità che è dello stesso ordine di grandezza di quello ottenuto per la 5.

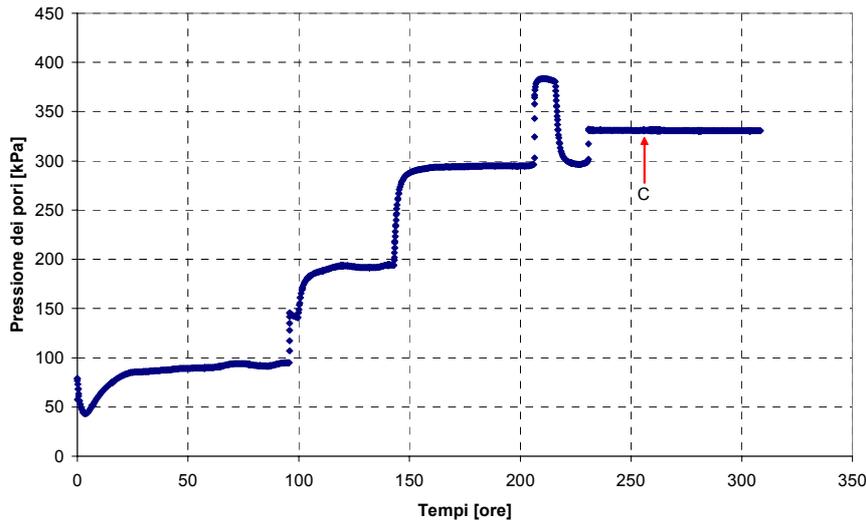


Fig. 37: Miscela 6: andamento della pressione dei pori nelle varie fasi della prova di permeabilità

	Miscela 6: C(24 h)
q [cm ³]	0.40
ΔH [cm]	300
k [cm/s]	9.86 * 10 ⁻⁹

Tab. 10: Riepilogo della misura di permeabilità, miscela 6.

Miscela 3 e 4

La fase di saturazione per la miscela 3 e 4 sono state brevi rispetto alle precedenti: le condizioni in cui si trovavano i provini erano differenti. Infatti l'esigua quantità di cemento presente nella composizione, ha conferito ai provini una struttura solida ma non altrettanto compatta ed impenetrabile all'acqua. La maturazione per entrambe le miscele è stata superiore ai 60 giorni. Le prove di permeabilità sulla miscele 3 e 4 sono state analoga alle precedenti ed i valori ottenuti sono riportati in Tab. 11.

	Miscela 3: E (48 h)	Miscela 4: D(24 h)
q [cm ³]	11.1	4.3
ΔH [cm]	200	200
k [cm/s]	2.26* 10 ⁻⁷	1.77 * 10 ⁻⁷

Tab. 11: Riepilogo della misura di permeabilità, miscela 3 e 4.

Osservazioni conclusive

In Tabella sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di permeabilità rispettivamente per le quattro miscele testate:

Miscela 3	k= 2.26 * 10 ⁻⁷ cm/s
Miscela 4	k= 1.77 * 10 ⁻⁷ cm/s
Miscela 5	k= 8.07 * 10 ⁻⁹ cm/s
Miscela 6	k= 9.86 * 10 ⁻⁹ cm/s

Tabella: Riepilogo dei risultati

Si evince che le miscele a più bassa permeabilità sono la 5 e la 6, contenenti quantità di cemento sufficientemente elevate di ridurre il numero di vuoti comunicanti fornendo così un materiale in grado di opporsi efficacemente all'attraversamento da parte dell'acqua.

Tuttavia confrontando i risultati ottenuti per la Miscela 5 e la Miscela 6, si osserva che sono dello stesso ordine di grandezza, nonostante le quantità di cemento di cui differiscono siano esattamente il doppio: il legante non è dunque l'unico fattore ad avere influenza rilevante ed esclusiva sulla permeabilità, che invece appare condizionato anche dalla natura degli aggregati presenti nella miscela e dalla procedura di deposizione dell'impasto nel provino, che rappresenta, come è naturale, una variabile aleatoria dell'analisi.

La scelta finale si orienta a favore della miscela 5, il cui impiego permette di ottenere buoni risultati, riducendo ancora una volta i costi dell'intervento.