

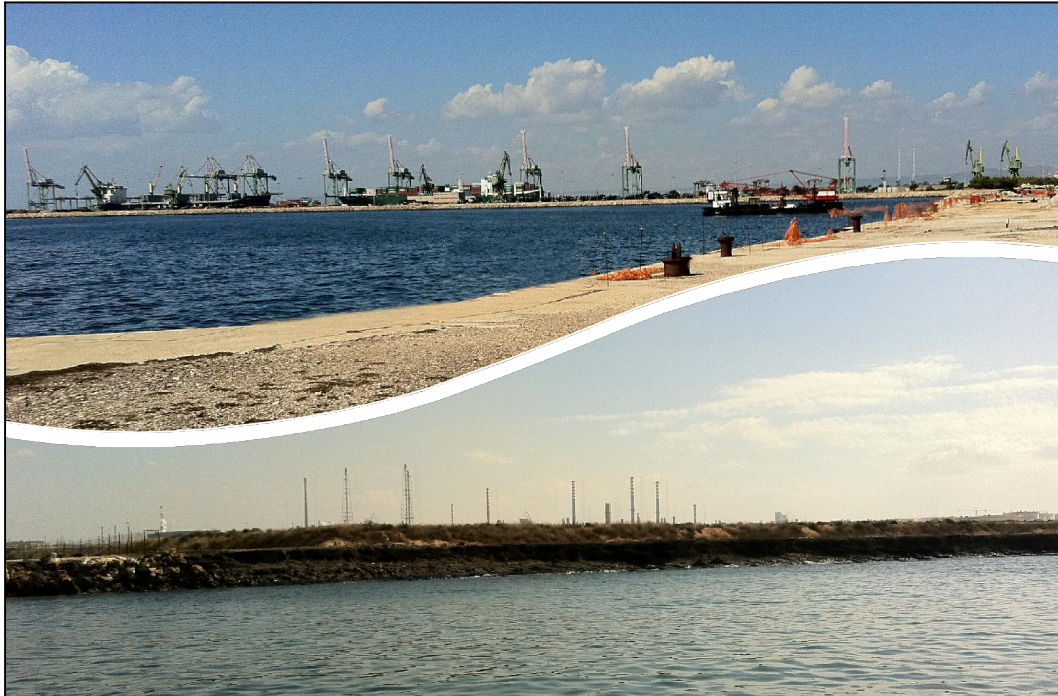
Regione PUGLIA



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE



Autorità Portuale di Taranto



Convenzione Sogesid S.p.A. - Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare
Regione Puglia - Autorità Portuale di Taranto del 19 Luglio 2011

**INTERVENTI PER IL DRAGAGGIO DI 2,3 Mm³ DI SEDIMENTI IN AREA MOLO
POLISSETORIALE E PER LA REALIZZAZIONE DI UN PRIMO LOTTO DELLA CASSA DI
COLMATA FUNZIONALE ALL'AMPLIAMENTO DEL V SPORGENTE DEL PORTO DI TARANTO
PROGETTO DEFINITIVO**

Titolo elaborato

ALLEGATO 2 - GEOTECNICA

Elaborato

ED 006b

Redatto da



Cod. Commessa

PUG102

Codice

PD ED 0 0 6b

Nome file

PUG102PDED006b_0

Data : **Ottobre 2012**

Rev.	Data	Descrizione modifica	verificato	approvato
0	ott/2012	1 ^a Emissione		



AUTORITA' PORTUALE DI TARANTO



POLITECNICO DI BARI

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE E PER LO SVILUPPO
SOSTENIBILE**

RAPPORTO DI RICERCA

**SUGLI ASPETTI GEOTECNICI DELLE
ARGILLE AZZURRE DEL PORTO DI
TARANTO IN RELAZIONE AL LORO
RIUTILIZZO IN CASSA DI COLMATA**

Luglio 2009

**Il Responsabile Scientifico, Dipartimento di Ingegneria
dell'Ambiente e per lo Sviluppo Sostenibile
(Prof. Ing. Antonio M. Federico)**

Collaboratori:

Dott. Ing. Agnese Murianni

Dott. Ing. Maria Nobile

P. Ind. Angelo Miccoli

**Il Responsabile Tecnico, Autorità Portuale di Taranto
(Dr. Ing. Gaetano Internò)**

INDICE

1. PREMESSA	pag. 1
2. GL'INTERVENTI DI DRAGAGGIO PREVISTI NEL PORTO DI TARANTO	pag. 2
3. CARATTERIZZAZIONE FISICO – MECCANICA DEI SEDIMENTI DI CUI E' PREVISTO IL DRAGAGGIO	pag. 4
4. POSSIBILE USO IN COLMATA DELLE ARGILLE DI DRAGAGGIO	pag. 10
5. TRATTAMENTO DEL TERRENO CON CALCE E CEMENTO	pag. 13
6. TRATTAMENTO CON CALCE E/O CEMENTO DELLE ARGILLE DRAGATE NEL PORTO DI TARANTO	pag. 17
6.1 <u>MATERIALI E METODI</u>	pag. 17
6.2 <u>RISULTATI SPERIMENTALI</u>	pag. 21
6.2.1 CARATTERI DI PLASTICITA'	pag. 23
6.2.2 INCREMENTI DI RESISTENZA E RIGIDEZZA DEL SEDIMENTO DRAGATO CONSEGUENTI AL SUO MESCOLOAMENTO CON LEGANTI	pag. 33
6.2.2.1 <i>INCREMENTI DI RESISTENZA AL TAGLIO COL TEMPO</i>	pag. 42
6.2.3 RISULTATI DELLE PROVE EDOMETRICHE	pag. 44
6.2.4 RISULTATI DELLE PROVE TD	pag. 52
7. CONSOLIDAZIONE DELLO <i>SLURRY</i> NELLA CASSA DI COLMATA	pag. 57
7.1 <u>CONSOLIDAZIONE DELLO <i>SLURRY</i> PER PESO PROPRIO</u>	pag. 57
7.2 <u>CONSOLIDAZIONE DELLO <i>SLURRY</i> CON PRECARICO</u>	pag. 61
7.2.1 ACCELERAZIONE DEL CEDIMENTO D CONSOLIDAZIONE CON L'USO DI DRENI PREFABBRICATI	pag. 65
8. ALCUNE CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	pag. 68
BIBLIOGRAFIA	pag. 71
<u>APPENDICE A</u> – Risultati delle prove di laboratorio sulle argille dei fondali del Porto (da Autorità Portuale di Taranto (2004); SGS – SELC, 2009)	pag. 74
<u>APPENDICE B</u> – Mescolamento del terreno in situ	pag. 77
<u>APPENDICE C</u> – Caratteristiche della calce viva usata nelle miscele	pag. 81
<u>APPENDICE D</u> – Caratteristiche del cemento usato nelle miscele	pag. 82
<u>APPENDICE E</u> – Pesi specifici della fase solida delle miscele argilla – legante	pag. 83
<u>APPENDICE F</u> – Limiti di consistenza delle miscele argilla – legante	pag. 86
<u>APPENDICE G</u> – Risultati delle prove di compressione non confinata	pag. 96

ELENCO DELLE FIGURE NEL TESTO

Figura 1: Aree di dragaggio e di colmata previste nel Piano Regolatore del Porto di Taranto.

Figura 2: Ubicazione delle perforazioni di sondaggio S1÷S14 e G01÷G03.

Figura 3: Variazione del rapporto di sovraconsolidazione OCR con la profondità nelle argille azzurre dei fondali del porto. Sondaggi a mare S1÷S14 (da Cotecchia, 2005).

Figura 4: Variazione del contenuto in carbonati con la profondità nelle argille azzurre dei fondali del porto. Sondaggi a mare S1÷S14 (da Cotecchia, 2005).

Figura 5: Risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT nelle argille azzurre dei fondali del porto. Sondaggi a mare S1÷S14 (da Cotecchia, 2005).

Figura 6: Caratteristiche generali di sedimentazione e consolidazione per peso proprio (da Imai, 1981).

Figura 7: Stabilizzazione dei terreni con calce viva (da Broms, 2004).

Fig. 8: Curva granulometrica dell'argilla di base.

Figura 9: a) Sedimentazione di sospensioni dell'argilla di base in varie concentrazioni; b) curva di sedimentazione relativa a $w=3,5w_L$.

Figura 10: Maturazione dei provini in acqua di mare.

Figura 11: (a) Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – calce; (b) Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – calce; (c) Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – cemento; (d) Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – cemento; (e) Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – (calce + cemento); (f) Carta di plasticità di Casagrande alla miscela argilla – (calce + cemento) relativa.

Fig. 12: Scissometro da laboratorio e penetrometro a cono GEONOR.

Fig. 13: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con calce in funzione dei giorni di maturazione.

Fig. 14: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con calce in funzione della quantità di calce.

Fig. 15: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con cemento in funzione dei giorni di maturazione.

Fig. 16: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con cemento in funzione della quantità di cemento.

Fig. 17: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con calce/cemento (25/75) in funzione dei giorni di maturazione.

Fig. 18: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con cemento in funzione della quantità di calce/cemento (25/75).

Fig. 19: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con legante in funzione della quantità del legante medesimo dopo vari periodi di maturazione.

Fig. 20: Confronto tra i valori di resistenza al taglio non drenata dell'argilla ottenuta con la prova scissometrica e col penetrometro a cono in funzione a) della quantità di legante aggiunto e b) del tempo di maturazione.

Fig. 21: Guadagno di resistenza nel lungo termine sulla base di dati giapponesi da rilievi in situ (da Topolnicki, 2004).

Fig. 22a), b), c): Risultati delle prove edometriche sulle miscele argilla – legante.

Fig. 23: Risultati delle prove edometriche nel piano $\log \sigma'_v - \ln(1+e)$.

Fig. 24: Risultati delle prove di taglio diretto su alcune miscele argilla – legante.

Fig. 25: Incrementi dei valori dei parametri di resistenza a taglio in termini efficaci ($c' - \phi'$) conseguenti all'aumento della quantità di legante da 4 ad 8%.

Fig. 26: Prova edometrica sull'argilla di base a $w_0 = 1.5w_L$: a) curva $e - \log \sigma'_v$; b) curve cedimento tempo.

Fig. 27: Schema del sistema cassa di colmata completamente impegnata dallo *slurry* + piattaforma di argilla stabilizzata + rilevato di precarico.

ELENCO DELLE FIGURE NELLE APPENDICI

Fig. B1: Metodi di mescolamento in situ del terreno (da Topolnicki, 2004).

Fig. B2: Utensili di mescolamento (da Topolnicki, 2004).

Fig. B3: Utensili di mescolamento ad asta singola a) e ad asta multipla b), c), d) (da Topolnicki, 2004).

Fig. B4: Stabilizzazione di massa con leganti allo stato secco: a) mescolamento prevalentemente verticale
b) mescolamento verticale ed orizzontale (da Topolnicki, 2004).

ELENCO DELLE TABELLE

Tab. 1: Caratteristiche identificative dell'argilla di base.

Tab. 2: Sintesi dei risultati delle prove di laboratorio sulle miscele argilla – legante.

Tab. 3a), b) e c): Limiti di consistenza dell'argilla di base trattata con legante in funzione dei giorni di maturazione.

Tab. 4: Risultati delle prove scissometriche sull'argilla mescolata con calce.

Tab. 5: Risultati delle prove scissometriche sull'argilla mescolata con cemento.

Tab. 6: Risultati delle prove scissometriche sull'argilla mescolata con calce/cemento (25/75).

Tab. 7: Risultati delle prove edometriche sulle miscele argilla – legante dopo 28 giorni di maturazione in acqua di mare.

Tab. 8: Parametri di resistenza al taglio in tensioni efficaci della miscela argilla – legante (Prove TD drenate su campioni lasciati maturare per 28 giorni).

1. Premessa

L'Autorità Portuale di Taranto ha sottoscritto con il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente e per lo Sviluppo Sostenibile (D.I.A.S.S) del Politecnico di Bari un contratto di ricerca (responsabile scientifico il Prof. Ing. Antonio Federico) avente per oggetto lo studio degli aspetti geotecnici del riutilizzo dei materiali argillosi, incontaminati, dragati nel porto di Taranto per la formazione di terrapieni e rilevati utili all'operatività portuale. Il dragaggio dei fondali del porto, ovvero l'approfondimento dei medesimi, trova motivazione nell'urgente necessità di consentire la manovra e l'ormeggio nel porto tarantino di navi di maggiori dimensioni rispetto alle attuali, in coerenza col nuovo Piano Regolatore del Porto. Che, adottato con deliberazione del Comitato Portuale n. 12 del 30 Novembre 2007, ed attualmente in corso di approvazione, ne prevede la riqualificazione, l'ammodernamento e l'ampliamento della dotazione infrastrutturale per renderlo competitivo nello scenario internazionale.

In questo quadro, l'Autorità Portuale di Taranto ha sottoscritto con l'ISPRA (già ICRAM – Istituto Centrale per la Ricerca Scientifica e Tecnologia Applicata al Mare) un Accordo Quadro al fine di affrontare le problematiche connesse alla tutela dell'ambiente marino, con particolare riferimento alla redazione di Piani di Gestione per Sedimenti “individuando soluzioni di escavo, gestione, riutilizzo, deposito e smaltimento dei sedimenti compatibili con l'ambiente ed economicamente sostenibili”. A tal ultimo riguardo, va segnalato che è in corso la redazione, da parte di ISPRA, del Piano di Gestione dei sedimenti del Porto di Taranto affidatole dall'Autorità Portuale con convenzione sottoscritta in data 17 Marzo 2008.

Il citato Accordo Quadro prevede la possibilità di collaborazioni esterne ad ISPRA per attività specialistiche. Una di tali collaborazioni esterne è rappresentata dal Contratto di Ricerca – di cui all'incipit – formalizzato col D.I.A.S.S del Politecnico di Bari nel mese di Giugno 2008 ed avente per fine gli aspetti geotecnici del possibile riutilizzo in cassa di colmata dei sedimenti argillosi dragati dai fondali del porto.

2. Gl' interventi di dragaggio previsti nel porto di Taranto.

Il nuovo Piano Regolatore del Porto di Taranto prevede, come già detto, la necessità di riqualificare, ammodernare ed ampliare la dotazione infrastrutturale del porto medesimo per renderlo competitivo nello scenario internazionale. Condizione ineludibile per l'attuazione del nuovo Piano Regolatore è l'approfondimento dei fondali di vaste aree nel porto fuori rada, ad ovest di Punta Rondinella (Fig. 1), comportante un volume complessivo di circa 19 milioni di m³ di sedimenti da dragare.

Le potenziali opzioni di gestione di tali sedimenti saranno configurate da ISPRA nel redigendo Piano di Gestione dei sedimenti. Esse opzioni dovranno essere compatibili con la qualità ed i volumi dei sedimenti, in un ventaglio di possibili esiti dei medesimi, tra cui: conferimento in cassa di colmata secondo le necessità del Piano Regolatore del Porto, eventuale trattamento ed utilizzo a scopi ripascitivi, eventuale trattamento ed utilizzo a scopi industriali, smaltimento in discarica controllata, versamento controllato in mare.

La natura pelitica del sedimento dei fondali del Porto di Taranto e la prevista modalità del loro dragaggio (idraulico), ne limitano assai lo spettro di utilizzazione.

In questo rapporto viene considerata, pur con qualche perplessità, la possibile messa a dimora dei fanghi argillosi dragati in casse di colmata. La realizzazione delle quali - peraltro prevista dal Piano Regolatore del Porto -, oltre, in primis, ad essere funzionale alle esigenze operative del porto di Taranto, consentirebbe anche di impegnare ed utilmente smaltire gran parte del volume dei sedimenti, anche se contaminati, derivanti dalle attività di dragaggio.

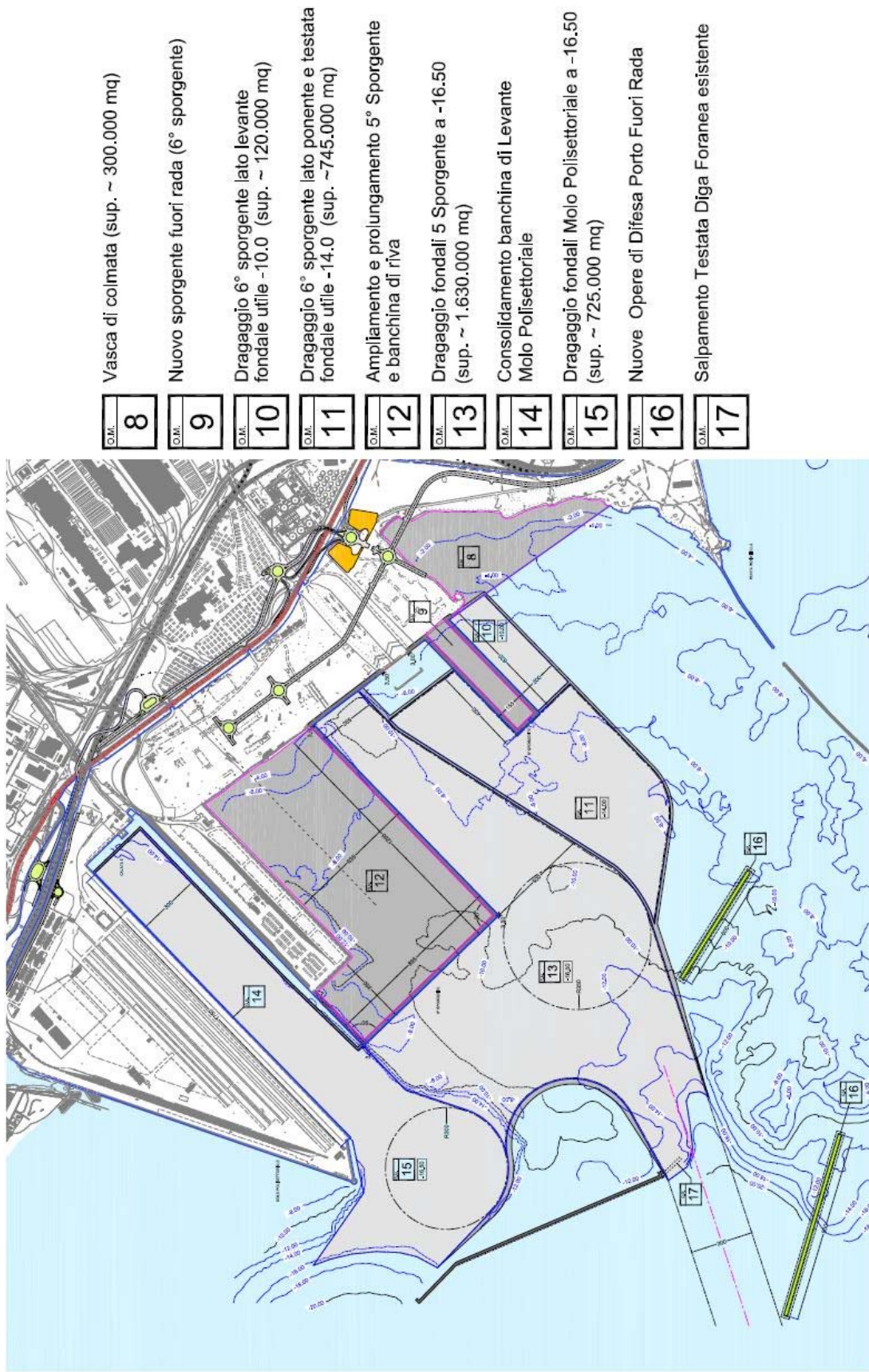


Fig. 1: Aree di dragaggio e di colmata previste nel Piano Regolatore del Porto di Taranto.

3. Caratterizzazione fisico – meccanica dei sedimenti di cui è previsto il dragaggio.

Dettagliate indagini di laboratorio ed in situ hanno fornito un esaustivo inquadramento geolitologico e geotecnico dei sedimenti marini nel porto fuori rada, ad ovest di Punta Rondinella (Autorità Portuale di Taranto, 2004; Cotecchia, 2005; SGS – SELC, 2009).

Tali sedimenti sono rappresentati dalle “Argille Subappennine”, riferibili al Pleistocene Inferiore e trasgressive sulle “Calcareniti di Gravina” o direttamente sul “Calcere di Altamura”.

Depositatesi in parte contemporaneamente alle “Calcareniti di Gravina”, le Argille Subappennine ne sono parzialmente eteropiche e ne costituiscono la naturale prosecuzione verso il largo nell’originario bacino (Mastronuzzi *et al.*, 1999).

Si tratta di argille marnoso – siltose di colore grigio - azzurro¹ o grigio – verde che, in alcune zone della Fossa Bradanica, raggiungono spessori residui anche superiori a 1000 m, mentre, nell’area di studio, il loro spessore è di oltre 100 m (Cotecchia, 2005). Esse affiorano alla base delle falesie che limitano il Mar Grande, in lembi sparsi intorno al Mar Piccolo e, localmente, lungo il perimetro sud-occidentale dell’isola di San Pietro.

La loro caratterizzazione è stata svolta sulla base dei risultati (APPENDICE A) delle perforazioni di sondaggio (S1÷S14 e G01÷G03) eseguite a mare in aree (Fig. 2) prossime a quelle che saranno dragate.

In relazione ai caratteri di apparenza, le argille terebrate a luoghi si presentano con uno strato superficiale giallastro di alterazione chimica, di spessore da pochi decimetri ad alcuni metri e che, comunque, non costituisce un orizzonte continuo. Al di sotto di tale strato alterato, l’argilla si presenta con alternanze di colore grigio-azzurro e grigio-verdastro. Indipendentemente dalla presenza di orizzonti alterati, il tetto delle argille è caratterizzato da una maggiore variabilità nelle caratteristiche fisiche e granulometriche. Tuttavia, in ordine alla resistenza ed alla deformabilità, l’intero banco è sostanzialmente uniforme, sì da potersi considerare, nella caratterizzazione geotecnica, un unico litotipo.

Dal punto di vista compositivo, è da evidenziare la notevole presenza di carbonati- calcite ed, in subordine, dolomite – in queste argille, al punto di qualificarle “marnose”. L’elevato contenuto in carbonati è da ascrivere, principalmente, ad una cementazione carbonatica della struttura dell’argilla ed, in minor misura, alla presenza di frammenti fossili e noduli calcarei, peraltro scarsamente rilevabili all’esame visivo. I minerali argillosi presenti sono, in ordine di

¹ Donde la denominazione di “argille azzurre” con cui più comunemente sono note.

abbondanza: illite, clorite, montmorillonite e caolinite per cui, in coerenza con l'intera formazione delle "Argille Subappennine", queste argille sono prevalentemente illitiche. La loro plasticità è medio-alta.

I risultati delle prove edometriche su campioni indisturbati hanno palesato il carattere di forte sovraconsolidazione di queste argille, in specie nei livelli sommitali (Fig. 3).

I valori estremamente elevati del rapporto di sovraconsolidazione OCR riflettono, in parte, la presenza di legami carbonatici tra particelle e gruppi di particelle di argilla, testimoniata da un contenuto in carbonati (segnatamente: calcite ed, in subordine, dolomite) alto e scarsamente variabile con la profondità (Fig. 4) rispetto al suo valore medio ($\approx 24\%$). Tuttavia, come mostra il confronto tra le Figg. 3 e 4, la cementazione non è il meccanismo principale di sovraconsolidazione, almeno nella parte sommitale di $15 \div 20$ m di spessore del deposito argilloso. Nella quale, invece, la fortissima sovraconsolidazione è da attribuire all'azione combinata di fenomeni di essiccazione e capillarità. Va, infatti, considerato che il deposito argilloso in parola ha sicuramente subito nel Quaternario (Bowen, 1978) gli effetti delle glaciazioni di Günz, Mindel, Riss e Würm.

Con riferimento, ad esempio, alla glaciazione wurmiana, temporalmente più vicina, il livello del mare di 15000 – 20000 anni orsono era, nel golfo di Taranto, di oltre 100 m inferiore a quello attuale.

Ulteriori informazioni sullo stato del materiale in situ sono scaturite dalle prove penetrometriche dinamiche e statiche. La Fig. 5 mostra – per l'intervallo di profondità che sarà soggetto a dragaggio – un valore medio $N_{SPT} = 47$, tipico di argille estremamente consistenti. In entrambe le figure le profondità sono in termini di quota assoluta dal l. m. m. .

Risultati simili sono stati ottenuti con le prove penetrometriche statiche che hanno indicato una resistenza alla punta maggiormente uniforme rispetto a risultati della prova SPT e di valore medio pari a 4,5 MPa, tipico delle argille sovraconsolidate.



Fig. 2: Ubicazione delle perforazioni di sondaggio S1÷S14 e G01÷G03.

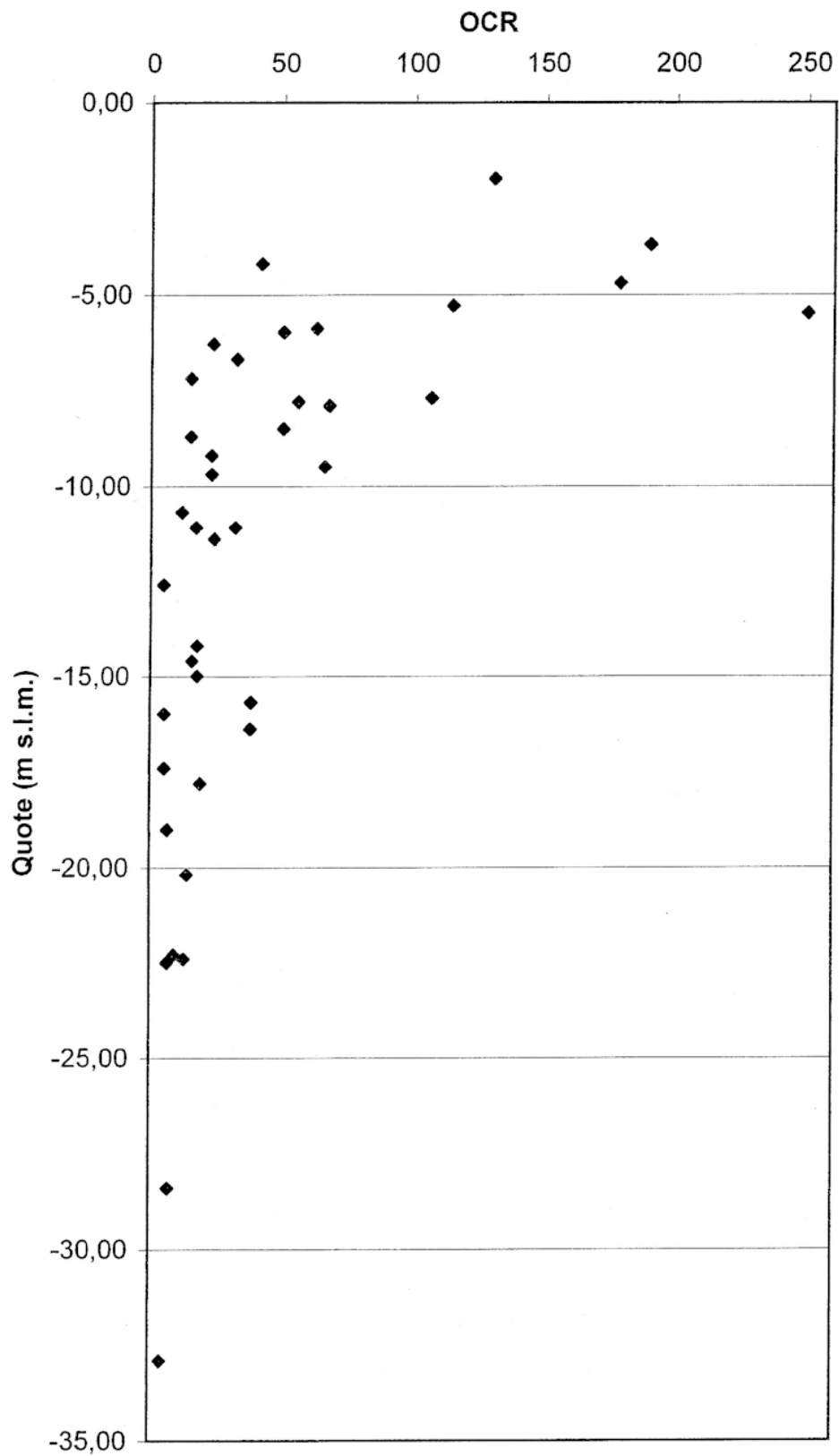


Fig. 3: Variazione del rapporto di sovraconsolidazione OCR con la profondità nelle argille azzurre dei fondali del porto. Sondaggi a mare S1÷S14 (da Cotecchia, 2005).

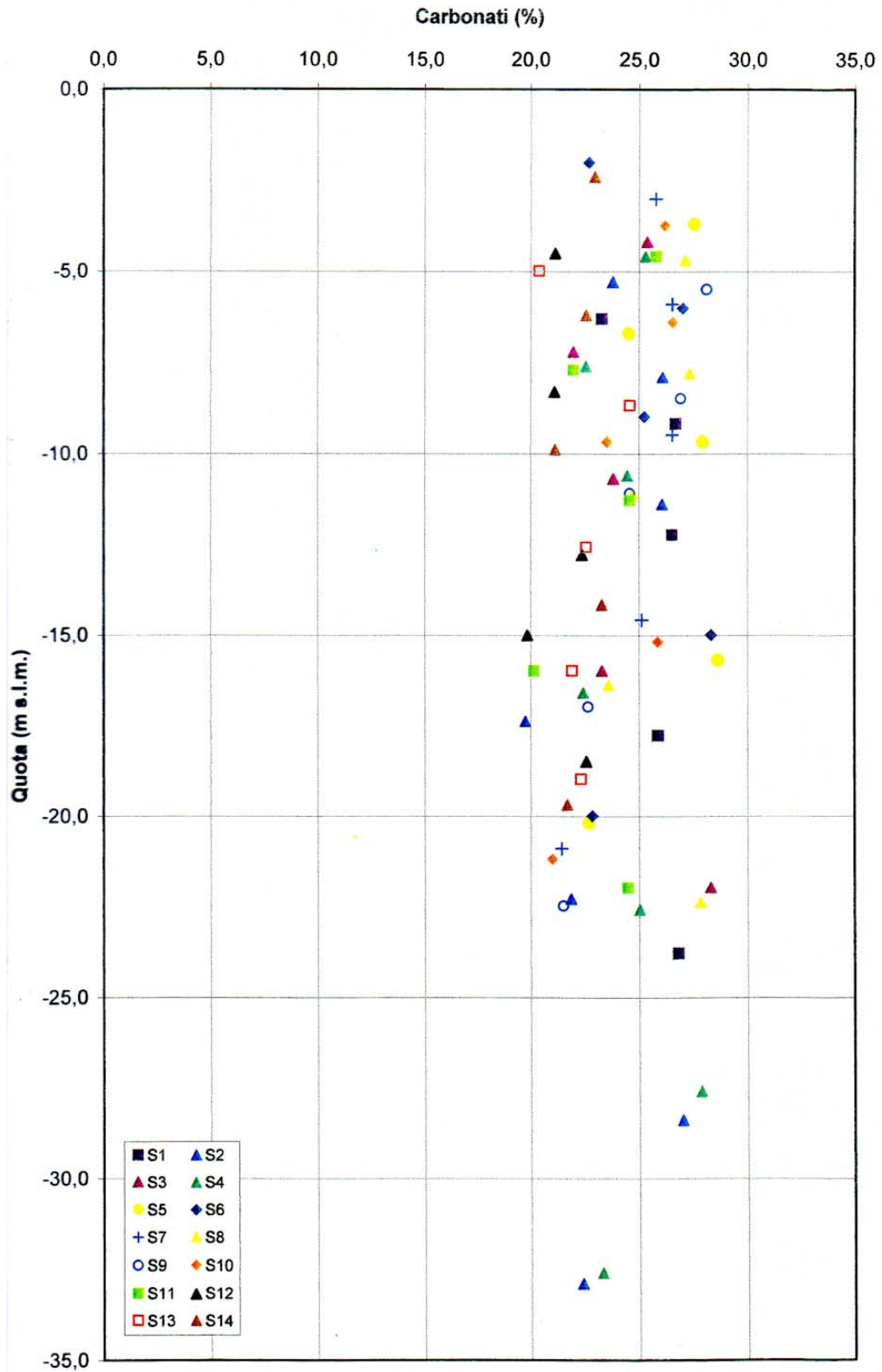


Fig. 4: Variazione del contenuto in carbonati con la profondità nelle argille azzurre dei fondali del porto. Sondaggi a mare S1÷S14 (da Cotecchia, 2005).

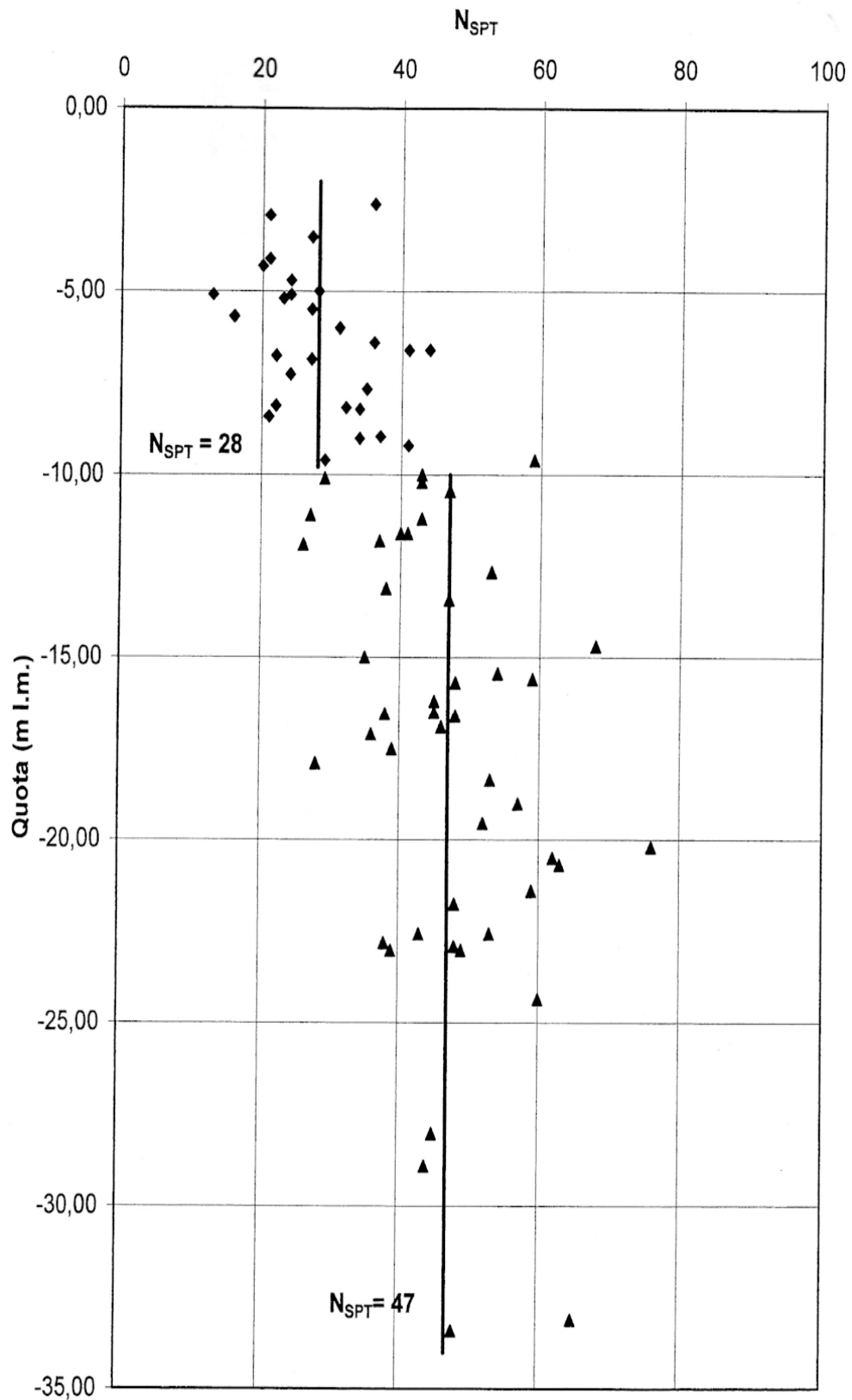


Fig. 5: Risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT nelle argille azzurre dei fondali del porto. Sondaggi a mare S1÷S14 (da Cotecchia, 2005).

4. Possibile uso in colmata delle argille di dragaggio.

Tra i possibili usi del materiale argilloso dragato dai fondali del Porto di Taranto si ritiene, come già anticipato, che, in considerazione del metodo di dragaggio e dei fattori composizionali e di stato fisico del materiale dragato, il più adatto – in linea di principio e pur con molte riserve – possa essere quello per la formazione di nuovi terrapieni in ambito portuale. Come risulta dal rapporto del Prof. Tomasicchio (2009), l'approfondimento dei fondali verrà realizzato, per motivi di convenienza economica, con una draga di tipo idraulico utilizzando pompe centrifughe per il processo di prelievo del sedimento. Che, sgretolato da potenti getti d'acqua, viene aspirato ed immesso in condotte che lo convoglierebbero come fango liquido (*slurry*) alle casse di colmata.

Lo “slurry” è costituito per l'80% da acqua e per il 20% da argilla (Tomasicchio, *ibidem*), in guisa che, essendo $\gamma_w = 10.08 \text{ kN/m}^3$ e $G_s = 2.67$, il suo contenuto (ponderale) in acqua w è pari a 154%².

In particolare, come si dirà più oltre, i limite liquido w_L e plastico w_P dell'argilla dragata hanno valori medi rispettivamente pari a 55% e 26%, onde,

$$IC = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = -3,41$$

essendo IC l'indice di consistenza.

Pertanto, essendo $IC < 1$, il materiale che idraulicamente viene messo a dimora (*hydraulic filling*), ha consistenza fluida (Lancellotta, 2004) ed è oramai del tutto privo dei caratteri diagenetici e strutturali del materiale intatto (Argilla compatta, sovraconsolidata).

Esula da questo rapporto la predizione accurata dell'entità e della velocità di consolidazione per peso proprio dei sedimenti fini depositati idraulicamente. Ad ogni modo, il cedimento di lungo termine della superficie della colmata e la resistenza al taglio dei sedimenti messi a dimora dipendono dalla consolidazione dei sedimenti medesimi. Che, per essere di utilità pratica in termini di tempo di suo compimento e di resistenza e deformabilità

² Invero, la ripartizione volumetrica 80% acqua e 20% argilla non può che fare riferimento ad un'argilla sgretolata dall'azione meccanica dei getti d'acqua e delle pompe centrifughe e non al volume della sua fase solida. Onde, se si considera che l'argilla indisturbata in sede ha di per sé un contenuto in acqua di 20 ÷ 25% (*vide* APPENDICE A), il contenuto reale in acqua dello “slurry” è funzione inversa del livello di disgregazione e, comunque, supera 200%. E', comunque, possibile che la tenacità dell'argilla marnosa si traduca, almeno nei suoi livelli più sovraconsolidati ed escludendo lo spessore corticale del fondo marino, in contenuti di acqua dello *slurry* maggiori anche di un ordine di grandezza dei valori menzionati.

dell'interramento realizzato, non potrà svolgersi per peso proprio o, più correttamente, solo per peso proprio.

In via schematica, lo sviluppo di un deposito di terreno da una sospensione o da un fango liquido consiste di tre fasi, come mostra qualitativamente la Fig. 6.

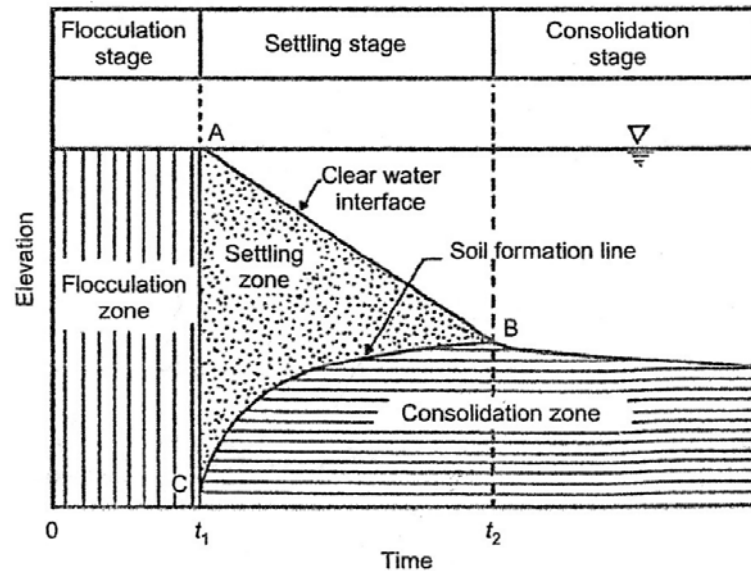


Fig. 6: Schema generale di sedimentazione e consolidazione per peso proprio (da Imai, 1981).

Nella fase di flocculazione, non si verifica sedimentazione. Successivamente ha luogo graduale sedimentazione di flocculi a formare uno strato di sedimento che sarà soggetto a consolidazione in condizioni k_0 e riduzione dell'indice dei vuoti col tempo.

Lo spessore della “zona” di sedimentazione diminuisce col tempo sino ad annullarsi, lasciando il sedimento così formatosi a consolidare per peso proprio nella fase di consolidazione, il cui inizio s’innesca solo allorché una struttura continua di terreno ha preso forma all’interno del sedimento. Sills (1995) ha denotato come “densità strutturale” la densità alla quale il terreno diviene strutturalmente continuo.

Se la densità di un fango liquido è più grande della sua densità strutturale, la consolidazione per peso proprio si instaura sin dalla messa a dimora del sedimento nella cassa di colmata (Hawlder *et al.*, 2008).

La predizione dei fenomeni associati alla consolidazione per peso proprio, in specie durante le sue fasi d’inizio, è un problema estremamente complesso “*which encompasses new developments in mathematical modelling, laboratory testing, associated interpretations,*

identification of material parameters and even new perspectives in engineering judgment” (Hawladar *et al.*, ibidem). Vari modelli matematici - tra cui: Gibson, 1974; Gibson *et al.*, 1981; Stark *et al.*, 2005a e 2005b; Been and Sills, 1981; Krizek and Somogyi, 1984 - sono stati sviluppati negli anni per descrivere la sedimentazione in una sospensione e la consolidazione per peso proprio del deposito che ne risulta.

Nel caso specifico, in cui lo spessore iniziale del sedimento in vasca di colmata è 7÷13 m, il processo di consolidazione naturale del sedimento per peso proprio richiederebbe verosimilmente tempi dell'ordine di molti decenni essendo i medesimi tempi proporzionali al quadrato dello spessore del sedimento. Che è pari al percorso di drenaggio, dato che, il fondo della vasca costituendo il tetto dell'argilla in posto, il drenaggio può esplicarsi solo verso la superficie. Nella lunga fase transitoria verso la normalconsolidazione, il materiale argilloso sedimentato è sottoconsolidato, escludendo – se le condizioni di drenaggio superficiale ne hanno consentito la formazione - la sottile crosta superficiale di essiccazione.

Peraltro, anche a fine consolidazione, lo stato di consistenza del materiale di colmata normalconsolidato non offrirebbe di per sé utilizzabili valori di portanza, in dipendenza dall'esile entità del carico di consolidazione costituito dal peso proprio.

Si pone, pertanto, la necessità del miglioramento delle caratteristiche fisico – meccaniche del terreno messo a dimora in vasca di colmata in vista dell'utilizzo operativo della medesima.

Tra le varie tecnologie di miglioramento si è considerata, nella fattispecie, la mescolatura del terreno con calce e/o cemento – di cui di seguito si dà breve descrizione - accoppiata oppure no a dreni prefabbricati e precarico.

Una breve rassegna di alcune tecnologie di mescolatura del terreno con additivi è riportata in APPENDICE B.

5. Trattamento del terreno con calce e cemento.

Come è noto, i terreni possono essere migliorati o stabilizzati attraverso mescolamento con cemento o calce. In entrambi i casi, il meccanismo precipuo di miglioramento è la formazione di legami chimici tra le particelle del terreno.

I principali benefici che ne conseguono sono rappresentati da un aumento della rigidità e da una migliore stabilità di volume (ovvero da una minore suscettibilità a rigonfiamento e ritiro). Anche la resistenza al taglio non drenata manifesta un incremento in conseguenza dell'instaurarsi di legami chimici e di cementazione tra le particelle, sebbene il materiale migliorato possa acquisire comportamento fragile perché, dopo la rottura dei legami, la loro resistenza è del tutto perduta (Powrie, 2004).

I meccanismi di stabilizzazione della calce e del cemento (Portland) sono in qualche modo simili (Mitchell, 1981). I prodotti finali sono rappresentati da una serie di silicati di calcio idrati, con la particolarità che, mentre la calce acquisisce silice dall'argilla o da altri materiali pozzolanici presenti nel terreno, il cemento, invece, contiene di per sé silice.

Più in dettaglio, la stabilizzazione con cemento³ dei terreni si verifica poiché cemento ed acqua reagiscono formando silicati di calcio idrati ed alluminati idrati che legano le particelle tra loro. Inoltre, la reazione di idratazione dà luogo a rilascio di idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, calce idrata o spenta) che, a sua volta, può reagire con alcuni componenti del terreno (segnatamente: i minerali argillosi).

L'idratazione del cemento avviene immediatamente dopo il contatto con l'acqua, ma le reazioni secondarie sono più lente e possono continuare per molti mesi.

La stabilizzazione del terreno con cemento è di applicabilità generale, poiché la reazione primaria, l'idratazione, è indipendente dal tipo di terreno. Di norma, si incontrano difficoltà solo con ghiaie grossolane o con terreni ad alto contenuto organico.

La stabilizzazione con calce⁴, invece, si basa interamente sulla reazione tra la calce medesima ed il terreno e “funziona” solo nei terreni con una sostanziale (>35%) frazione di particelle fini (<60 μm). La calce può essere aggiunta come calce viva (CaO) o calce idrata($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

³ Da lungo tempo usata nelle strutture di pavimentazione, negli anni '60 del secolo passato la mescolatura terreno – cemento è diventata di largo uso nelle strutture idrauliche, in particolar modo per la protezione del paramento a monte delle dighe in terra. Nei decenni successivi, l'uso di cemento (e calce) ha avuto forti incrementi, in specie per gli interrimenti strutturali, con l'affermarsi e l'evolvere dei metodi di mescolamento in profondità (Mitchell, 1981).

⁴ Dal punto di vista storico, la tecnica di stabilizzazione con calce è stata introdotta dai Romani nella costruzione delle strade del loro impero: tratti della via Appia sono tuttora operativi su terreni stabilizzati con calce 2000 anni fa (Wheeler, 2004). Mescolando calce viva con un terreno argilloso e aggiungendo dell'acqua, i Romani scoprirono che il terreno poteva essere rinforzato e costituire una buona fondazione per la pavimentazione stradale (Smith, 2005). La tecnica è stata reintrodotta dagli Americani durante la II Guerra Mondiale per la costruzione di aeroporti.

La calce viva reagisce con l'acqua dando luogo a calce idrata ed a sviluppo di una considerevole quantità di calore (65,3 kJ/mole).

L'incremento nel breve termine di resistenza e rigidità associato al mescolamento con calce viva (CaO) dipende principalmente dalla riduzione del contenuto d'acqua durante lo "slaking", dall'aumento del limite plastico e dalla riduzione dell'indice di plasticità conseguente allo scambio cationico. L'incremento nel lungo termine è governato principalmente dalle reazioni pozzolaniche della calce con la frazione argillosa del terreno (Broms, 2004) (Fig. 7).

Infatti, quando, la calce viva viene mescolata col terreno, essa reagisce immediatamente con l'acqua dei pori, con l'effetto di una "essiccazione" del terreno, che di norma è assai benefica. Ciò significa che terreni argillosi troppo molli per sopportare attività costruttive o il traffico a queste associato, possono rapidamente essere trasformati in piattaforme resistenti, asciutte e pronte ad ospitare strade, linee ferroviarie, parcheggi o carichi di fondazione.

Mescolando calce con argilla, i cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle argillose (per esempio sodio) vengono scambiati col calcio. Ciò riduce l'indice di plasticità dell'argilla, migliorandone la lavorabilità, la resistenza e la rigidità. Per le argille caolinitiche, aumentano sia il limite plastico che il limite liquido, mentre per le argille montmorillonitiche ed illitiche aumenta il limite plastico e diminuisce il limite liquido. Comunque, in entrambi i casi, vi è riduzione dell'indice di plasticità (Van Impe, 1989).

Il principale contributo al miglioramento delle proprietà meccaniche di un terreno stabilizzato con calce attiene al lungo termine e dipende sostanzialmente dalle reazioni pozzolaniche ovvero dalla cementazione. Infatti, questa seconda fase della reazione argilla/calce rimuove silice dal reticolo del minerale argilloso per formare prodotti simili a quelli che derivano dalla idratazione del cemento (Fig. 7).

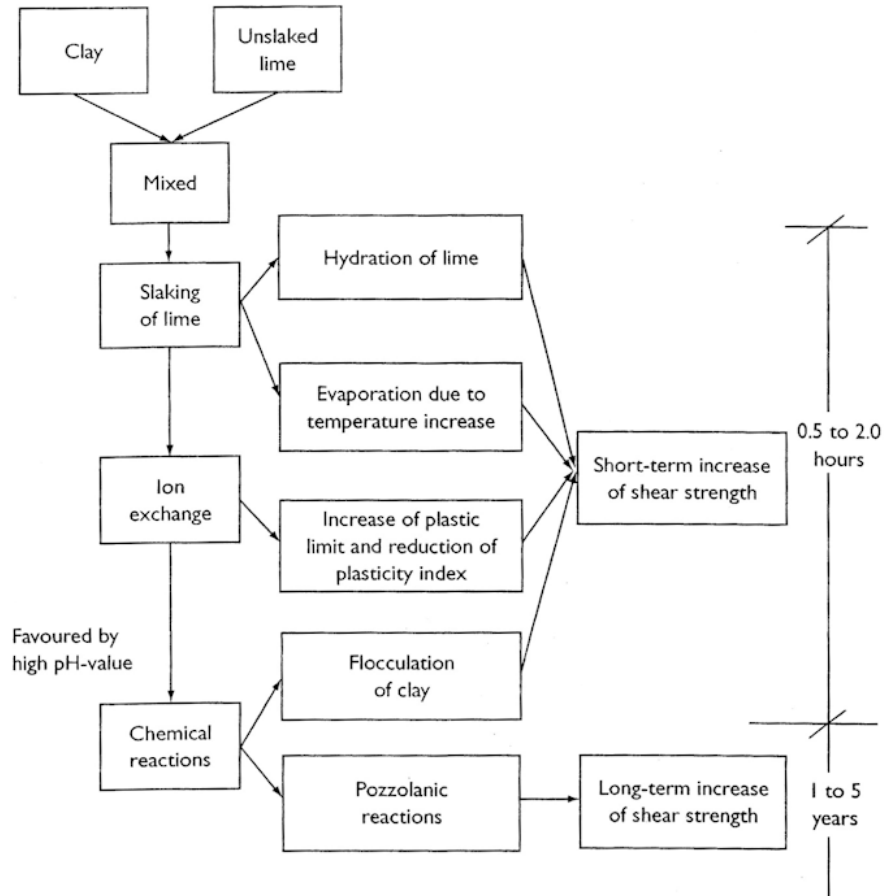


Fig. 7: Stabilizzazione dei terreni con calce viva (da Broms, 2004).

L'efficacia del processo di cementazione aumenta con l'area superficiale specifica delle particelle del terreno: la stabilizzazione con calce non ha effetti pratici in sabbie e ghiaie senza fini. Il grado di cementazione trova un limite nella silice disponibile, per cui non vi è beneficio nell'aggiungere più calce di quella necessaria ad impegnare il contenuto di silice del terreno.

Inoltre, a differenza della stabilizzazione usando cemento, laddove l'incremento di resistenza dipende dalla quantità di cemento aggiunto, l'aggiunta di troppa calce può essere controproducente.

Tipicamente i rapporti di cemento/terreno secco o calce/terreno secco usati in pratica variano nell'intervallo 2-10%.

La mescolatura del terreno con cemento e/o calce conferisce al terreno medesimo miglioramento notevole delle sue proprietà meccaniche.

Allo stesso modo, notevoli sono i vantaggi che offre questa metodologia nel trattamento di terreni contaminati. A tal riguardo, le tecniche di stabilizzazione del terreno con i summenzionati leganti sono oggetto di crescente considerazione nella riqualificazione e

recupero allo sviluppo di siti contaminati, con un metodo noto come stabilizzazione/solidificazione (S/S).

In questo caso l'azione dei leganti cementizi è usata per migliorare le proprietà tecniche del terreno e, nel contempo, immobilizzare i contaminanti, creando un solido praticamente non lisciviabile.

La stabilizzazione/solidificazione è divenuta particolarmente popolare negli anni '80 negli Stati Uniti, in Europa ed in Giappone. Negli Stati Uniti, dove la tecnica S/S è approvata come la migliore pratica disponibile in particolare per la contaminazione da metalli, un quarto di tutti gli interventi di risanamento (*remediation*) del terreno svolti nell'ambito del programma Superfund ha fatto uso della tecnica S/S (Smith, 2005).

In Europa, negli anni passati il metodo preferito per i siti contaminati consisteva nello scavo e rimozione del terreno e sua messa a dimora in discarica. Questa prassi va ora scomparendo a motivo dell'incremento dei costi di discarica provocato dalle maggiori restrizioni sui siti per discarica imposte dalle leggi comunitarie e nazionali.

E' perciò crescente la consapevolezza che il trattamento in situ di un terreno contaminato è un'opzione più sostenibile rispetto allo spostamento del terreno medesimo in un altro luogo dove può ancora richiedere trattamento nel futuro.

Per concludere, cemento e calce, in specie il cemento, trovano efficace applicazione in un vasto ambito di tipi di terreno. Tuttavia, alcuni composti organici possono ritardare o inibire le reazioni. Inoltre, la presenza di solfati liberi nei terreni argillosi può essere di danno.

In ogni caso, il fattore più importante relativamente alla qualità dei risultati è la realizzazione di un mescolamento il più possibile uniforme del terreno con la calce e/o il cemento.

6. Trattamento con calce e/o cemento delle argille dragate nel Porto di Taranto.

6.1 Materiali e metodi.

La sperimentazione di laboratorio utile alla valutazione degli effetti dell'aggiunta di calce (calce viva, CaO), cemento Portland e calce + cemento sulle proprietà del materiale argilloso idraulicamente dragato dai fondali del porto e posto a dimora in cassa di colmata è stata condotta su argilla proveniente da due sondaggi geognostici a mare (G02 e G03), terebrati in prossimità del lungomare della parte vecchia della città, di fronte, grossomodo, alla sede della Capitaneria di Porto (Fig. 2).

Per la descrizione litostratigrafica dei terreni attraversati da questi sondaggi e delle loro caratteristiche fisico-meccaniche si rimanda a SGS-SELIC (2009) ed alla APPENDICE A.

L'argilla per la sperimentazione è stata resa disponibile dall'Autorità Portuale di Taranto in forma di "carote" (prelevate alle profondità di m 0÷5 e di m 5÷10 dal fondo mare rispettivamente nel sondaggio G02 e nel sondaggio G03) selezionate in modo tale che le relative proprietà indice avessero valenza di valore medio anche dei sedimenti appartenenti agli orizzonti da dragare. Peraltro, il confronto di tali proprietà indice con le analoghe dei livelli pelitici più superficiali terebrati (sondaggi S1÷S14, APPENDICE A) in differente ambito portuale non ha palesato variazioni spaziali di un qualche significativo rilievo, in guisa che il materiale argilloso della sperimentazione – che verrà denotato come "argilla di base" - può ritenersi sostanzialmente rappresentativo anche di quello dello spessore sommitale di argille fondali del quale è previsto il dragaggio.

Le carote d'argilla sono state sminuzzate ed i frammenti complessivamente risultanti sono stati mescolati assieme – sì da dar luogo ad un unico materiale (argilla di base), assunto essere rappresentativo dello *slurry* che andrà in cassa di colmata - e lasciati essiccare all'aria per alcuni giorni.

La Tab. 1 e la Fig. 8 mostrano la caratterizzazione in termini di peso specifico della fase solida, di plasticità del materiale e granulometrici dell'argilla di base. Che, secondo la carta di plasticità di Casagrande, si classifica come argilla inorganica di alta plasticità (CH).

G_s	Frazione argillosa (%)	Frazione limosa (%)	Frazione sabbiosa (%)	w_L (%)	w_P (%)	PI (%)
2.67	33	52	15	55	26	29

Tab. 1: Caratteristiche identificative dell'argilla di base.

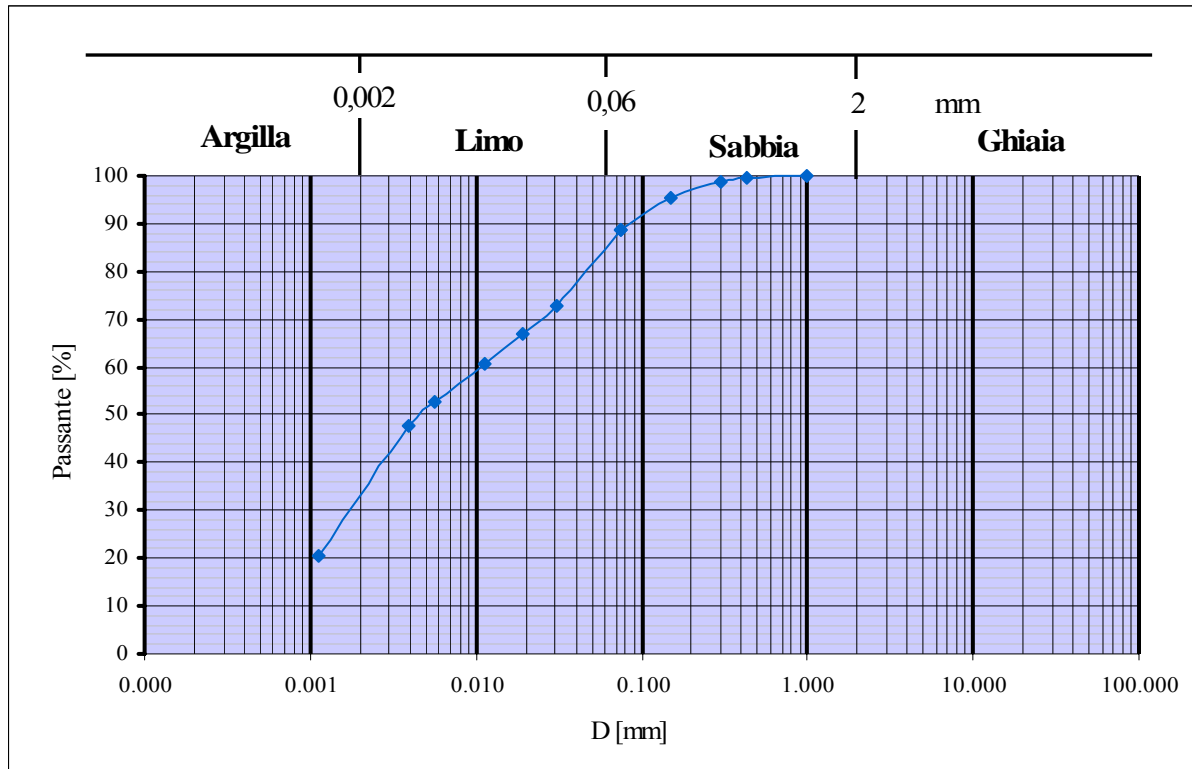


Fig. 8: Curva granulometrica dell'argilla di base.

Dal punto di vista granulometrico si tratta di un limo-argilloso con sabbia .

La massa di argilla secca è stata suddivisa in 12 porzioni, ognuna di peso P pari a circa 5 kg (=49 N). Su ciascuna di esse è stata versata dell'acqua marina ($\gamma_w = 10.08 \text{ kN/m}^3$) in quantità sufficiente a ottenerne una pasta umida⁵, poi ulteriormente omogeneizzata dall'azione meccanica dell'impastatrice

Il peso secco P_s di ogni porzione di terreno è stato determinato in funzione del suo contenuto in acqua w_i , ovvero:

⁵ Sono da segnalare gli effetti visivi del fenomeno di "slaking" che in pochi minuti ha portato a minuta disgregazione i frammenti d'argilla secchi.

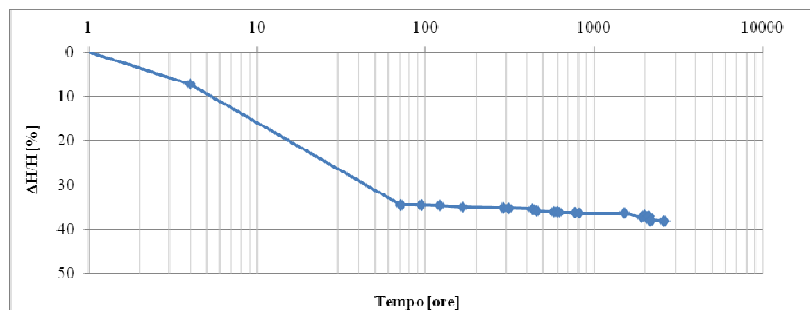
$$P_s = \frac{P}{(1+w_i)}$$

Come già detto, esula da questo rapporto lo studio della sedimentazione e dell'entità e velocità di consolidazione per peso proprio dell'argilla di base depositata in forma di *slurry* nelle vasche di colmata, dove vi perviene con un contenuto d'acqua $w = 154\%$ (Tomasicchio, 2009) e consistenza fluida ($w = 2.8w_L$, $IC = -3.41$). Non si hanno, peraltro, alcuni elementi di conoscenza (tra cui, segnatamente: “granulometria” dello *slurry*) per una predizione di una qualche affidabilità dello stato di consistenza dello *slurry* in colmata al completamento della colmata medesima⁶.

Ciò premesso, sulla scorta di dati qualitativi di sedimentazione in becker di sospensioni di argilla di base a varia concentrazione (Fig. 9), si è ritenuto di assumere in prima approssimazione – in questo rapporto a carattere preliminare e metodologico – che, all'esaurirsi del processo di sedimentazione dopo il colmamento delle vasche, la consistenza dello *slurry*, meno “fluida”, corrisponda ad un contenuto in acqua dell'ordine di $1,5w_L$.



(a)



(b)

Fig. 9: a) Sedimentazione di sospensioni dell'argilla di base in varie concentrazioni; b) curva di sedimentazione relativa a $w=3,5w_L$.

In coerenza con questa assunzione, si è incrementato il contenuto in acqua dei singoli volumi di argilla di base, portandolo da w_i a $w_0 = 1.5w_L \cong 83\%$.

Essendo:

⁶ Questo aspetto di addensamento dello *slurry* nella vasca di colmata per effetto di sedimentazione e consolidazione per peso proprio necessita di approfondimento teorico. E, specialmente, di verifica sperimentale in situ. Ovvero di verifica della reale qualità complessiva di materiale dragato, della reale distribuzione granulometrica ed associati effetti di classazione, dell' effettivo stato di consistenza, etc., e delle loro variazioni spaziali e temporali. Il che rende ineludibile la disponibilità – come si dirà più oltre - di due ben strumentati campi-prova nella cassa di colmata di maggiori dimensioni.

$$\Delta w = 1,5w_L - w_i$$

il peso di acqua marina aggiunto ad ognuno di tali volumi è stato:

$$P_w = \Delta w \cdot P_s$$

L'operazione finale è consistita nell'aggiunta ad ognuno dei materiali di un legante (calce, cemento, calce + cemento)⁷ in una delle seguenti proporzioni: 2%, 4%, 8% e 10% (rispetto al peso secco P_s).

Il legante calce + cemento consta per il 25% di calce e per il 75% di cemento [calce/cemento (25/75)].

Dopo omogeneizzazione in impastatrice, per ognuno dei materiali ottenuti sono stati confezionati degli insiemi di provini su cui valutare gli incrementi di resistenza al taglio e di rigidezza e le variazioni di plasticità dopo maturazione in acqua di mare (Fig. 10) per periodi di durata: 2, 7, 28 e 60 giorni.



Fig.10: Maturazione dei provini in acqua di mare.

⁷ La calce ed il cemento, di cui le APPENDICI C e D riportano le caratteristiche, sono state gentilmente messe a disposizione rispettivamente da UNICALCE e da CEMENTIR.

6.2 Risultati sperimentali.

La sperimentazione di laboratorio ha avuto per fine la valutazione delle modifiche delle proprietà del materiale argilloso di dragaggio indotte dall'aggiunta di leganti (calce, cemento, calce + cemento) in vari rapporti percentuali.

Come già detto, al materiale argilloso di dragaggio, previamente essiccato ed omogeneizzato, è stata aggiunta dell'acqua marina in quantità tale da ottenere $w=w_0=1,5w_L$. Il fango argilloso risultante è stato addizionato ed accuratamente mescolato con varie percentuali di legante. Subito dopo si è proceduto a confezionare delle serie di provini. Che sono stati fatti maturare in acqua marina. La Tab. 2 riporta in forma assemblata i risultati delle prove di laboratorio, di seguito specificamente illustrate, mentre in APPENDICE E sono mostrati i valori ottenuti relativamente al peso specifico della fase solida delle miscele argilla – legante.

LEGANTE AGGIUNTO [%]	LIMITE LIQUIDO		LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICO	CONTENUTO IN ACQUA	PESO DELL'UNITA' DI VOLUME	PESO SPECIFICO DELLA FASE SOLIDA	INDICE DEI VUOTI	RESISTENZA A TAGLIO NON DRENATA	RESISTENZA A COMPRESSIONE (ELL.)	COESIONE (PROVA T.D.)	ANGOLO D'ATTRITO (PROVA T.D.)	INDICE DI COMPRESSIONE	INDICE DI RIGONFIAMENTO	TENSIONE DI SNERVAMENTO
	WL [%]	WP [%]	PI [%]	W [%]	γ [kN/m ³]	G _s	e	C _u [kPa]	q _u [kPa]	c' [kPa]	ϕ' [°]	C _c	C _s	σ'_p [kPa]	
CALCE (CaO)	0	55	26	29	83	15,32	2,67	2,22	0,2				0,66	0,072	
	dopo 2d	65	34	31					3,8						
	dopo 7d	66	34	32					7						
	dopo 28d	73	33	40	80	15,35	2,68	2,120	33,6				0,99	0,027	25
	dopo 2d	67	40	27					5,9						
	dopo 7d	70	39	31					12,3						
	dopo 28d	83	38	45	77	15,60	2,70	2,095	67,4	18	21	0,45	0,011	0,011	80
	dopo 2d	50	36	13					6,7						
	dopo 7d	55	39	16					19,6						
	dopo 28d	76	51	25	69	15,99	2,65	1,828	111,9	54	22	0,64	0,01	0,01	165
dopo 60d															
dopo 28d							1,818 (38d)	136					0,36	0,01	180
dopo 60d															
CEMENTO	dopo 2d	71	35	36					1,1						
	dopo 7d	69	33	36					3,1						
	dopo 28d	59	28	31	85	15,50	2,70	2,269	4,4				0,81	0,053	
	dopo 2d	78	43	35					6,2						
	dopo 7d	73	40	33					27,3						
	dopo 28d	52	30	22	81	15,40	2,73	2,21	52,2	13	34,4	0,79	0,02	0,02	90
	dopo 60d														
	dopo 2d	70	43	27					31,7						
	dopo 7d	69	44	25					25,5						
	dopo 28d	66	45	21	70	15,60	2,75	1,953	125	211 (*)	40	0,35	0,02	0,02	170
dopo 60d								284							
dopo 28d					15,74		1,932	371 (*)				0,02	0,02	>400	
dopo 60d								458							
CALCE/CEMENTO (25/75)	dopo 2d	73	36	37					6,7						
	dopo 7d	73	37	36					11,1						
	dopo 28d	74	42	32	82	15,60	2,64	2,161	14,9				0,81	0,048	
	dopo 2d	62	31	31					21,1						
	dopo 7d	65	33	32					42,9						
	dopo 2d	75	43	32	75	15,70	2,65	2,014	86,9	19,00	21	0,77	0,025	0,025	85
	dopo 7d	69	49	20					32						
	dopo 28d	84	56	28	73	15,80	2,67	1,917	122,7	43	52	0,31	0,022	0,022	170

(*) valore medio

Tab. 2: Sintesi dei risultati delle prove di laboratorio sulle miscele argilla-legante.

6.2.1 Caratteri di plasticità.

Nelle tabelle 3a, 3b e 3c ed in APPENDICE E sono riportati i valori numerici dei limiti di consistenza dopo 2, 7 e 28 giorni di maturazione sui provini trattati con calce, cemento e calce/cemento (25/75), unitamente, per un confronto, con gli analoghi dell'argilla di base.

MATURAZIONE: 2d		
<i>LIMITE LIQUIDO</i>	<i>LIMITE PLASTICO</i>	<i>INDICE PLASTICO</i>
WL [%]	WP [%]	PI [%]

Argilla di base		55	26	29
Argilla di base mescolata con calce [%]	2	65	34	31
	4	67	40	27
	8	50	36	14
Argilla di base mescolata con cemento [%]	2	71	35	36
	4	78	43	35
	8	70	43	27
Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75) [%]	2	73	36	37
	4	62	31	31
	8	69	49	20

a)

MATURAZIONE: 7d		
<i>LIMITE LIQUIDO</i>	<i>LIMITE PLASTICO</i>	<i>INDICE PLASTICO</i>
WL [%]	WP [%]	PI [%]

Argilla di base		55	26	29
Argilla di base mescolata con calce [%]	2	66	34	32
	4	70	39	31
	8	55	39	16
Argilla di base mescolata con cemento [%]	2	69	33	36
	4	73	40	33
	8	69	44	25
Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75) [%]	2	73	37	36
	4	65	33	32
	8	72	51	21

b)

MATURAZIONE: 28d		
LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICO
w_L [%]	w_P [%]	PI [%]

Argilla di base		55	26	29
Argilla di base mescolata con calce [%]	2	73	33	40
	4	83	38	45
	8	76	51	25
Argilla di base mescolata con cemento [%]	2	59	28	31
	4	52	30	22
	8	66	45	21
Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75) [%]	2	74	42	32
	4	75	43	32
	8	84	56	28

c)

Tab. 3a), b) e c): Limiti di consistenza dell'argilla di base trattata con legante in funzione dei giorni di maturazione.

Come mostrano le tabelle, fortemente marcata e, talora, significativamente varia è l'influenza sulla plasticità del tipo (e quantità) di legante addizionato e del tempo di maturazione.

Ciò è ancor più evidente se si riportano i dati sulla carta di plasticità (Fig. 11), laddove la posizione dei “punti – plasticità” dell'argilla di base e delle mescolature argilla – legante delineano con immediatezza i relativi “percorsi di plasticità”: ben netti e specifici per tipo di legante, sua quantità e tempo di maturazione.

E' da notare, anzitutto, che in tutti i casi in cui la percentuale di legante è $\geq 4\%$, i “punti – plasticità” della miscela si situano al di sotto della retta “A”, ovvero nella regione dei limi inorganici di elevata plasticità (MH), l'argilla di base, invece, ricadendo nella regione delle argille inorganiche di elevata plasticità (CH). L' “attraversamento” della retta “A” può verosimilmente attribuirsi agli effetti di maggiore cementazione ed agglomerazione interparticellare. Spicca, in tutti i casi, l'aumento del valore del limite plastico (w_P) ed, in quasi tutti i casi, anche del limite liquido (w_L). L'aumento del limite plastico nel breve termine, in uno con la riduzione dell'indice di plasticità (PI), è da attribuire allo scambio cationico (Broms, 2004). Dai dati in esame, invece, risultano riduzioni, anche significative, dell'indice di plasticità solo in alcuni casi: più spesso, esso aumenta rispetto al valore dell'argilla di base e, generalmente, aumenta anche col tempo di maturazione. Da evidenziare,

inoltre, che per le miscele argilla – calce ed argilla – (calce/cemento), w_L e PI aumentano, generalmente, col tempo di maturazione, mentre nelle miscele argilla – cemento w_L e PI decrescono al crescere del tempo di maturazione.

I valori massimi di plasticità ($w_L=83\%$, $w_P=38\%$, $PI=45\%$) conseguenti all'aggiunta di legante denotano un incremento di circa il 50% rispetto all'argilla di base e sono relativi alla miscela 96% argilla – 4% calce a 28 giorni.

Analogamente, nella miscela 92% argilla – 8% (calce/cemento) si può osservare il raddoppio del valore del limite plastico ($w_P=56\%$), il valore massimo in assoluto del limite liquido ($w_L=84\%$) e praticamente nessuna variazione dell'indice di plasticità ($PI=28\%$).

Al momento non si dispone dei risultati relativi a tempi di maturazione superiori a 28 giorni. Sarà senza dubbio interessante, in prosieguo di tempo, confrontare i valori di plasticità di lungo termine, ovvero al compimento delle reazioni pozzolaniche, con i valori qui presentati.

Per meglio comprendere la singolarità dei forti aumenti di plasticità, si ritiene utile ribadire che l'argilla di base è stata fatta seccare all'aria e successivamente inumidita con acqua di mare sino a farle acquisire un contenuto in acqua pari a $w_0=1,5w_L$.

Inoltre, l'argilla addizionata con i leganti è stata fatta maturare in acqua di mare.

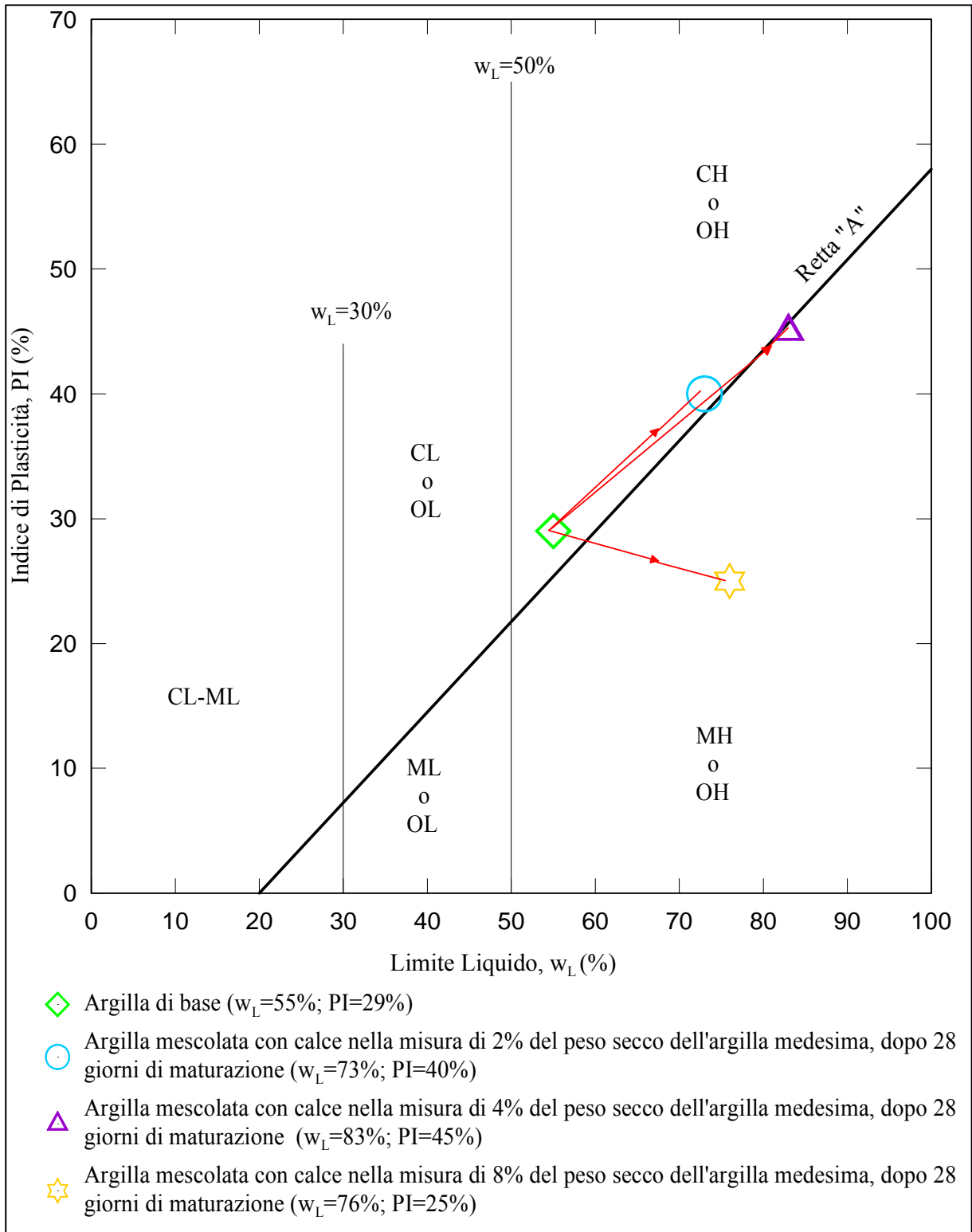


Fig. 11(a): Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – calce.

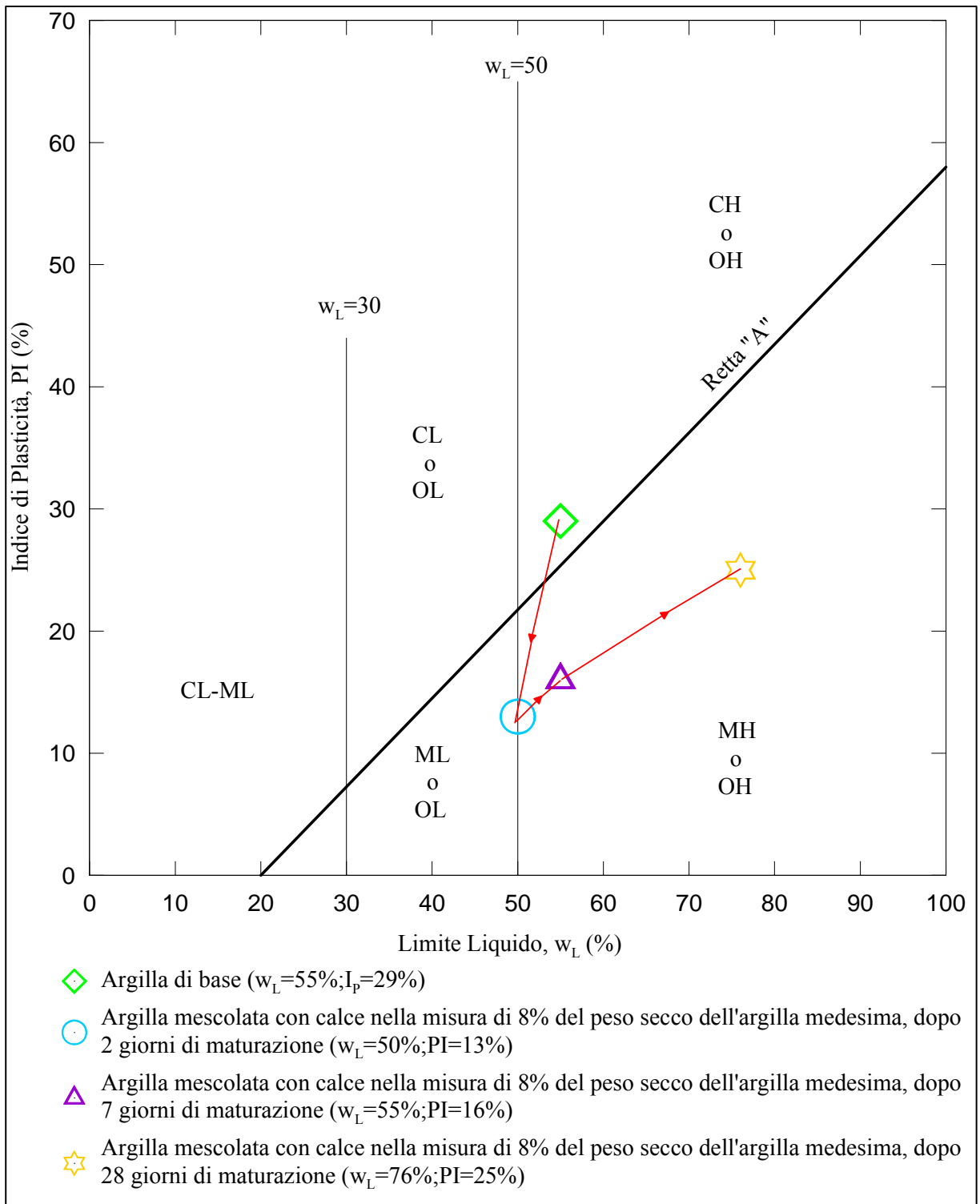


Fig. 11(b): Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – calce.

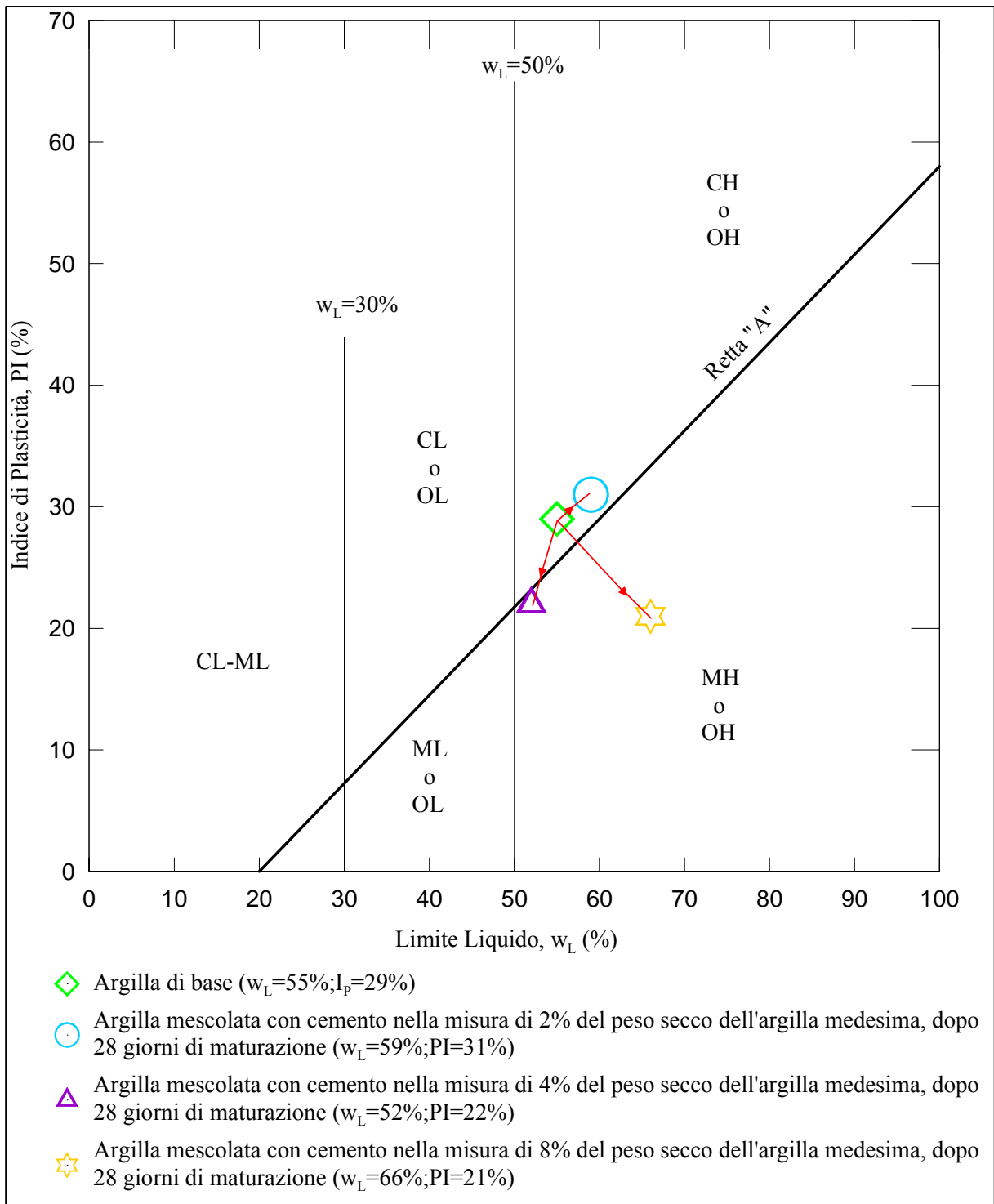


Fig. 11(c): Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – cemento.

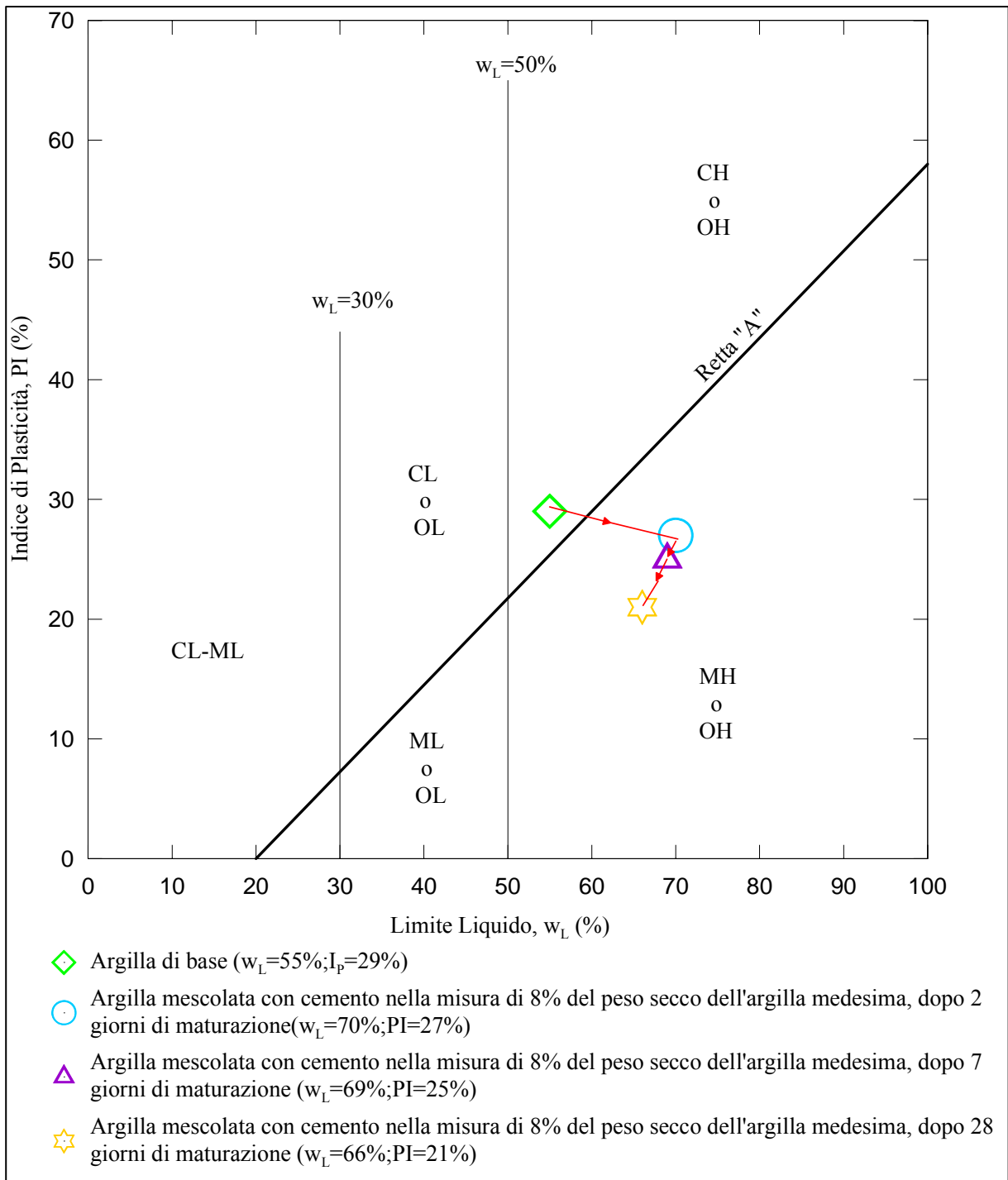


Fig. 11(d): Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – cemento.

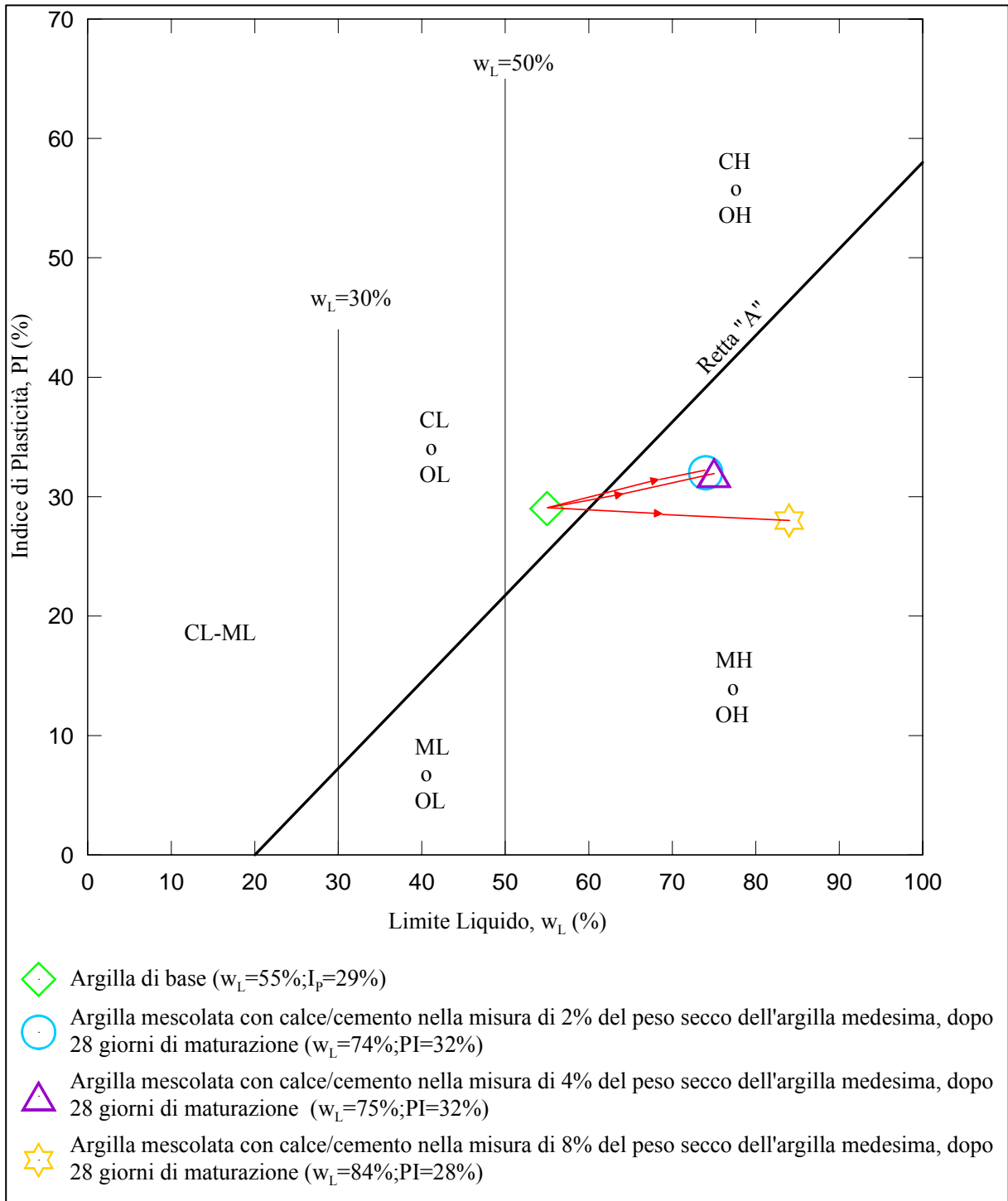


Fig. 11(e): Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla – calce/cemento (25/75).

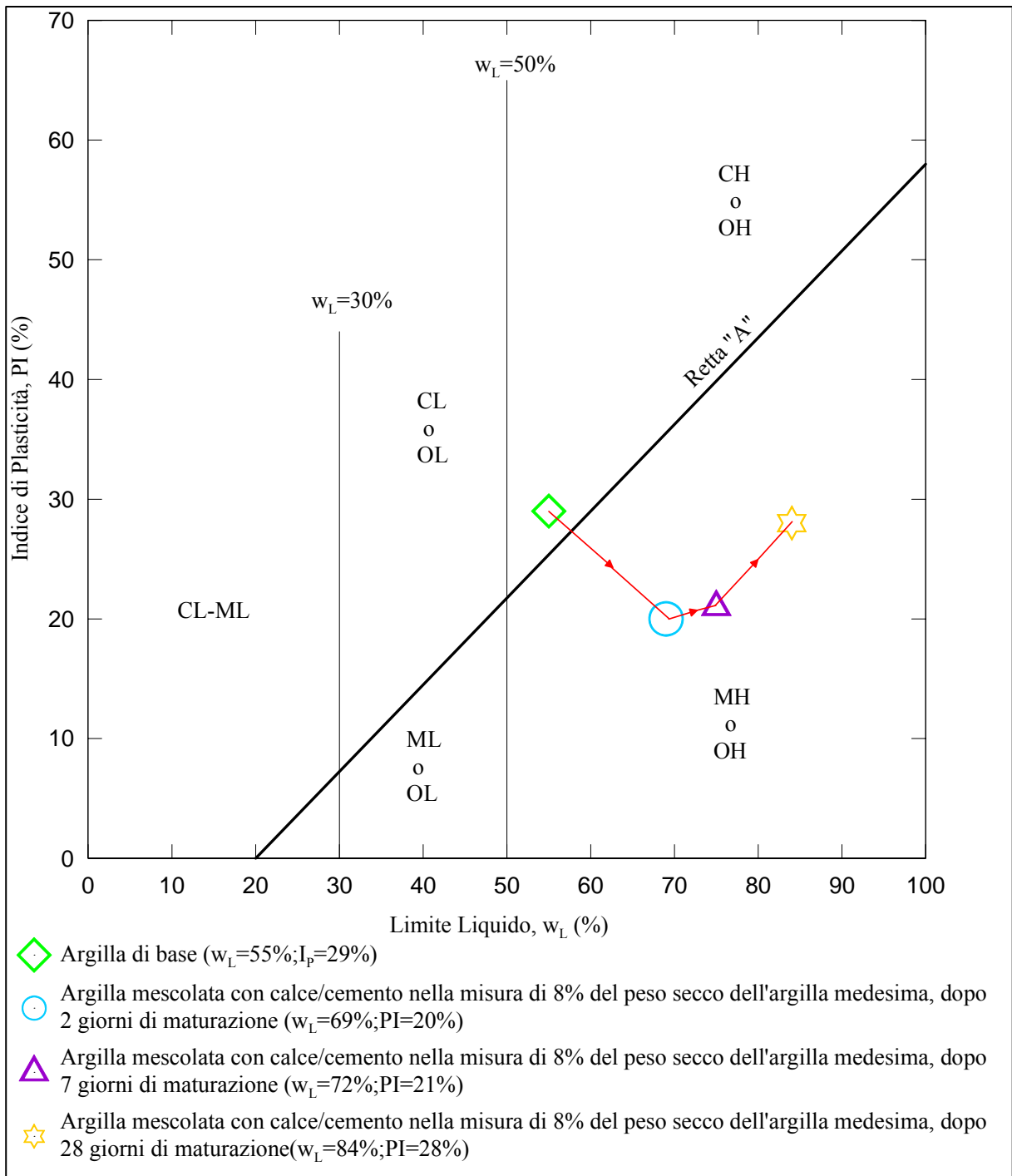


Fig. 11 (f): Carta di plasticità di Casagrande relativa alla miscela argilla–calce/cemento (25/75).

Infine, si ritiene di segnalare che, a parere dello scrivente, il chimismo dell'acqua interstiziale nelle argille da dragare non è quello dell'acqua marina, ma quello di un'acqua molto più simile all'acqua della falda profonda contenuta nei sottostanti calcari del mesozoico e che, in loco, è in condizioni artesiane. In guisa tale da porre in atto un lentissimo flusso verticale ascendente nella coltre argillosa dei fondali del porto. Ciò sarebbe da verificare sperimentalmente, oltre che con piezometria in perforazioni di sondaggio, con analisi chimica di estratti interstiziali, unitamente alla determinazione della capacità di scambio cationico e della presenza quantitativa dei singoli cationi nel complesso di adsorbimento. Se tale ipotesi fosse sperimentalmente confermata, il catione prevalente nell'argilla da dragare non sarebbe il sodio, ma, più probabilmente, il calcio (o il magnesio). Il che renderebbe meglio conto di alcune delle singolarità riscontrate nei valori di plasticità.

6.2.2 Incrementi di resistenza e rigidezza del sedimento dragato conseguenti al suo mescolamento con leganti.

Come già detto, l'argilla rimaneggiata è stata portata ad un contenuto in acqua prossimo ad $1,5w_L$. I leganti (calce, cemento, calce/cemento) sono stati aggiunti in percentuali 2, 4,8 e 10% riferite al peso secco dell'argilla.

Dai materiali risultanti, omogeneizzati nell'impastatrice meccanica, sono state ricavate delle serie di provini cilindrici riempiendo sino all'orlo vasetti di plastica trasparenti di diametro ed altezza interni pari, rispettivamente, a 5,8 cm e 7,8 cm. I vasetti, privi di coperchio, sono stati poi immersi in acqua di mare a maturare per periodi di tempo compresi tra 2 e 60 giorni.

Dopo la maturazione, si è dato luogo alle prove meccaniche.

La resistenza al taglio non drenata c_u è stata determinata usando lo scissometro da laboratorio ed il penetrometro a cono (*Fall cone apparatus* Geonor) (Fig. 12) e, per i campioni di maggiore consistenza, con prove di compressione ad espansione laterale libera. Per le quali, infatti, la condizione di saturazione del campione consente di assumere $c_u = \frac{1}{2}q_u$, q_u essendo la resistenza a compressione.



Fig. 12: Scissometro da laboratorio e penetrometro a cono GEONOR.

Preliminarmente, si è misurata la resistenza non drenata dell'argilla di base ($w_0=1.5w_L$) non trattata. Che è risultata essere prossima a zero: più precisamente, $c_u \cong 0.2$ kPa.

L'aggiunta di leganti ha generato significativi incrementi di resistenza. In particolare, l'aggiunta di calce al fango argilloso ($w_0=1.5w_L$) si è tradotta in quasi immediato significativo aumento di consistenza del fango medesimo, rilevabile sia visivamente che al tatto.

E' da segnalare che i provini trattati con i succitati leganti hanno mostrato, dopo la maturazione di 28 giorni, la parte superficiale – rimasta a contatto con l'acqua marina - assai molle o, comunque, molto più molle della parte sottostante, per uno spessore di 3÷5 mm. Prima delle prove, questa parte è stata rimossa.

La Tab. 4 riporta i risultati ottenuti con lo scissometro sull'argilla trattata con calce.

Gli stessi risultati sono riportati in forma grafica nelle Figg. 13 e 14.

E' evidente l'incremento di resistenza al taglio non drenata in funzione sia della quantità di calce che del tempo di maturazione.

L'aumento di resistenza al taglio nel breve termine dipende principalmente dalla riduzione del contenuto in acqua durante lo "slaking" dell'ossido di calcio, dall'aumento del limite plastico e dalla riduzione dell'indice plastico in virtù dello scambio cationico.

Nel medio-lungo termine (in questa fase limitato a 28/60 giorni), per gli elevati valori di pH dovuti alla presenza della calce, una parte dei minerali argillosi si solubilizza e si combina con il calcio dando origine a silicoalluminati idrati di calce dotati di forte potere legante.

Questo complesso di trasformazioni chimiche è noto come "reazioni pozzolaniche".

Da notare (Fig. 13) il fortissimo incremento di resistenza che scaturisce dall'aggiunta di 8% di calce e (Fig. 14) la scarsa differenziazione, in termini di resistenza, tra le varie miscele sino a 7 giorni di stagionatura.

Risultati qualitativamente simili, ma, in generale, caratterizzati da valori numerici più bassi, sono derivati dalle prove col penetrometro a cono.

Le poche prove di compressione ad espansione laterale libera hanno sostanzialmente confermato i risultati dello scissometro (APPENDICE G); le relative deformazioni a rottura sono comprese tra 1,25 e 2%.

Risultati non dissimili mostra l'argilla trattata con cemento (Tab. 5 e Figg. 15 e 16) e con calce/cemento (25/75) (Tab. 6 e Figg. 17 e 18).

E' da notare lo scarsissimo effetto sulla resistenza dell'aggiunta del 2% di cemento (Fig. 16), verosimilmente in conseguenza del fatto che l'incremento di resistenza al taglio è anche controllato dal tipo di terreno, dal contenuto iniziale di acqua e dal rapporto acqua/cemento (Babasaki *et al.*, 1996).

Da notare, pure, il poco significativo effetto dell'8% di cemento dopo 7 giorni di stagionatura. Per un più immediato confronto degli effetti dei leganti utilizzati, i risultati di cui sopra sono riportati in forma assemblata nella Fig. 19, che, in particolare, mostra come a 28 giorni di

maturazione – ovvero allorché le reazioni pozzolaniche si sono in gran parte già svolte – gli andamenti di incremento della resistenza siano sostanzialmente simili, se si esclude il caso del cemento al 2%.

Come già detto, si è dato luogo anche a prove di penetrometria, utilizzando il penetrometro a cono da laboratorio.

I relativi risultati indicano, quasi sempre, valori di resistenza più bassi, talora significativamente più bassi, degli analoghi ottenuti per via scissometrica e ripresentati, per confronto, nella Fig. 20.

Calce (% del peso secco dell'argilla)	Resistenza al taglio non drenata c_u [kPa]		
	<i>dopo maturazione in acqua marina per</i>		
	2d	7d	28d
0	0,2	0,2	0,2
2	3,8	7	33,6
4	5,9	12,3	67,4
8	7	19,6	111,9

Tab. 4: Risultati delle prove scisso metriche sull'argilla mescolata con calce.

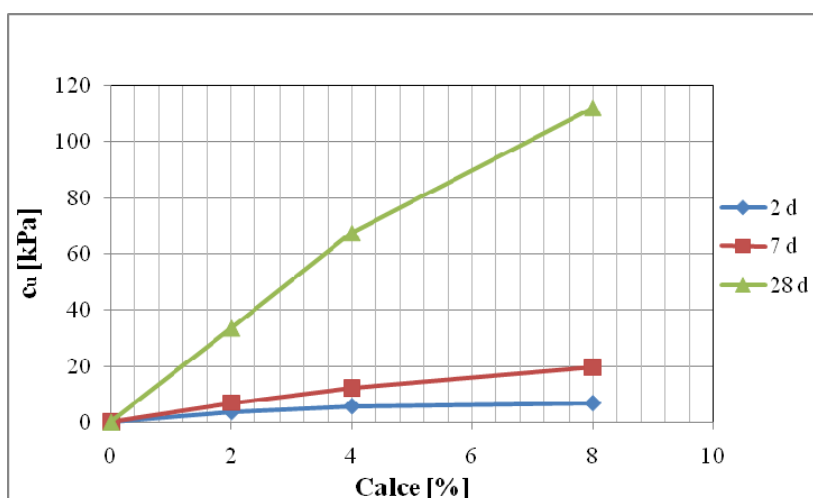


Fig. 13: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con calce in funzione dei giorni di maturazione.

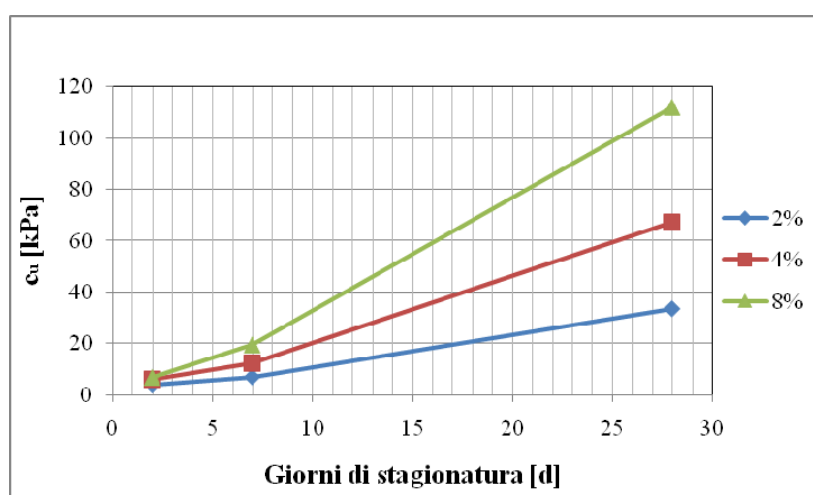


Fig. 14: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con calce in funzione della quantità di calce.

Cemento (% del peso secco dell'argilla)	Resistenza al taglio non drenata c_u [kPa]		
	<i>dopo maturazione in acqua marina per</i>		
	<i>2d</i>	<i>7d</i>	<i>28d</i>
0	0,2	0,2	0,2
2	1,1	3,1	4,4
4	6,2	27,3	52,2
8	25,5	29,3	125

Tab. 5: Risultati delle prove scisso metriche sull'argilla mescolata con cemento.

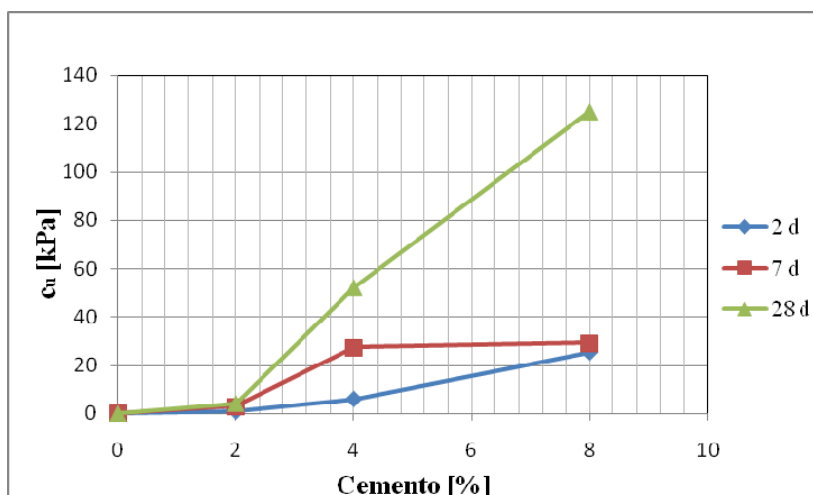


Fig. 15: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con cemento in funzione dei giorni di maturazione.

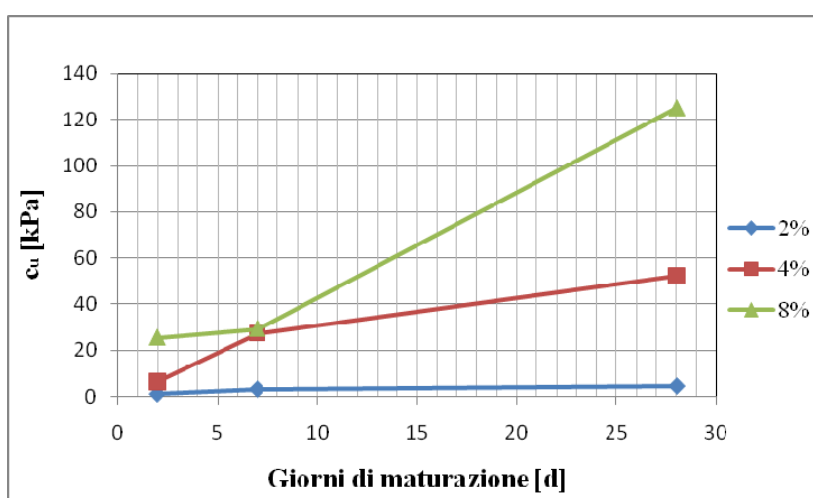


Fig. 16: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con cemento in funzione della quantità di cemento.

Calce/Cemento (25/75) (% del peso secco dell'argilla)	Resistenza al taglio non drenata c_u [kPa]		
	dopo maturazione in acqua marina per		
	2d	7d	28d
0	0,2	0,2	0,2
2	6,7	11,1	14,9
4	21,1	42,9	86,9
8	32	51,2	122,7

Tab. 6: Risultati delle prove scisso metriche sull'argilla mescolata con calce/cemento (25/75).

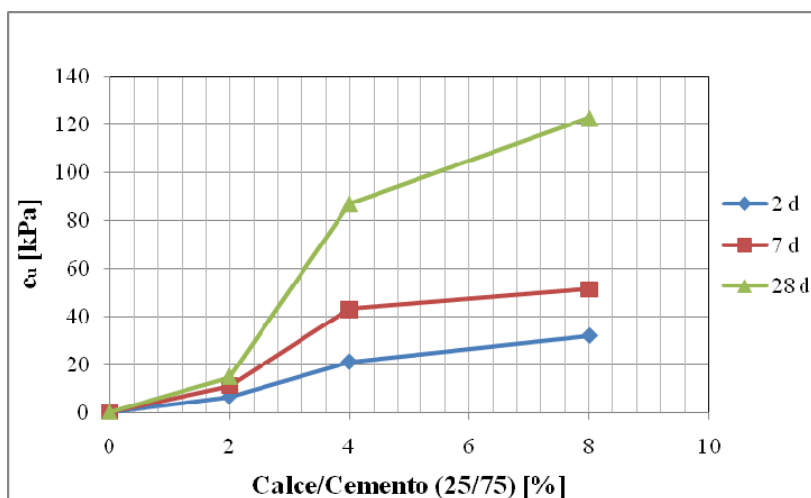


Fig. 17: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con calce/cemento (25/75) in funzione dei giorni di maturazione.

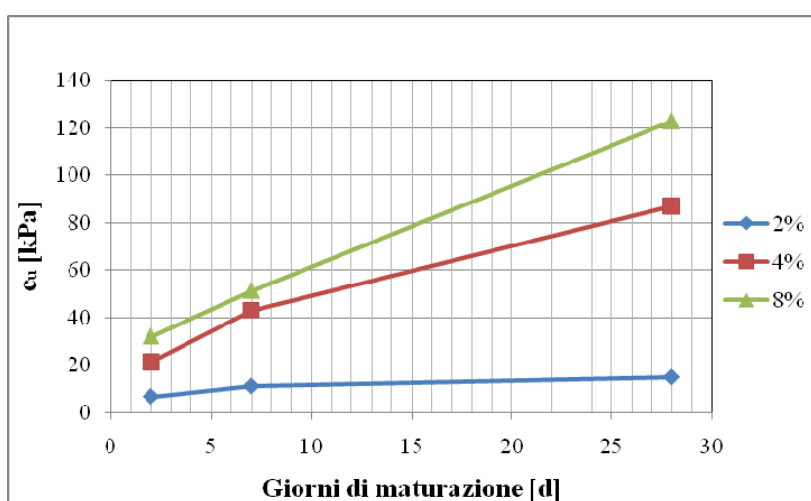


Fig. 18: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con cemento in funzione della quantità di calce/cemento (25/75).

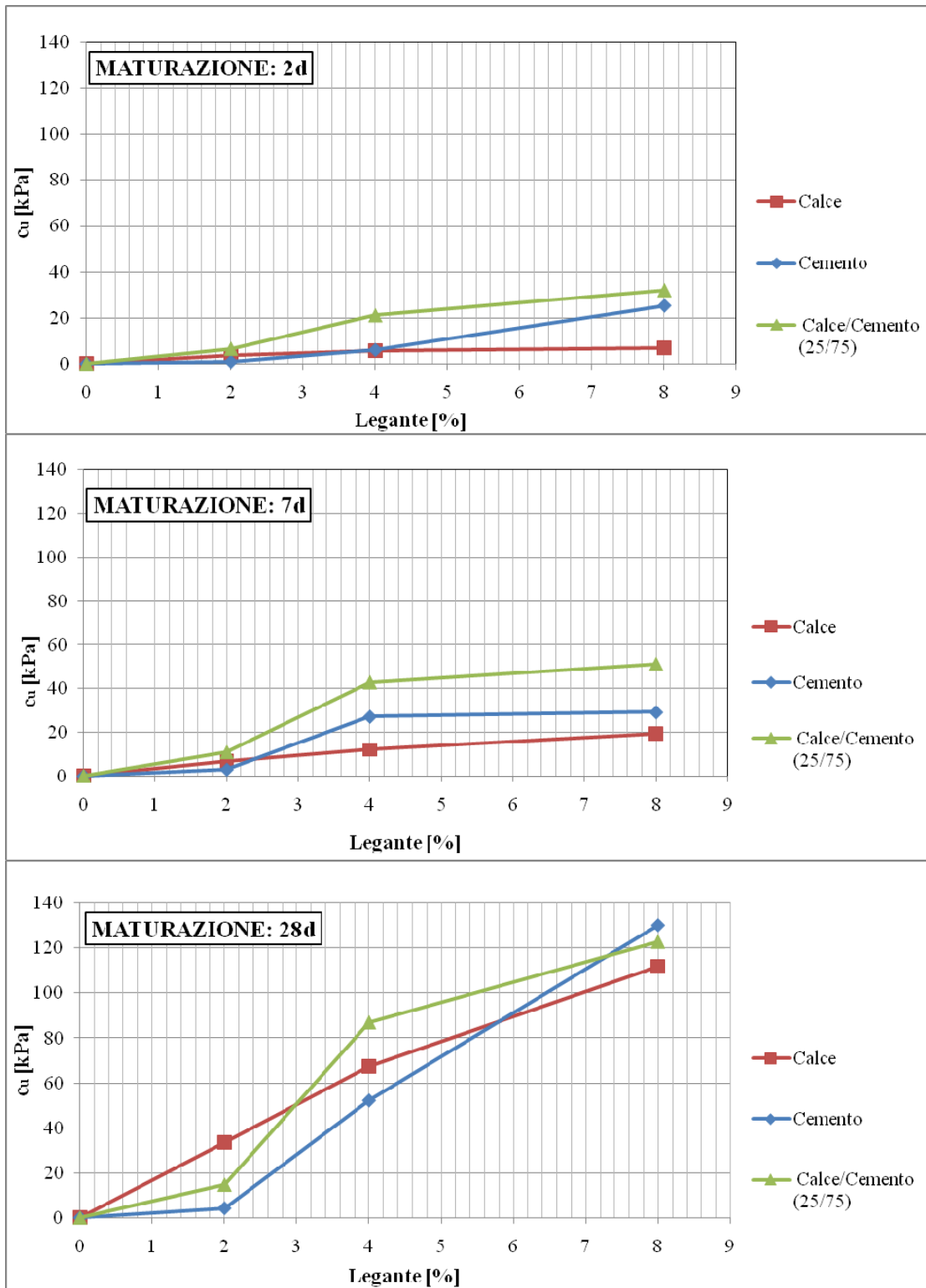


Fig. 19: Resistenza al taglio non drenata dell'argilla mescolata con legante in funzione della quantità del legante medesimo dopo vari periodi di maturazione.

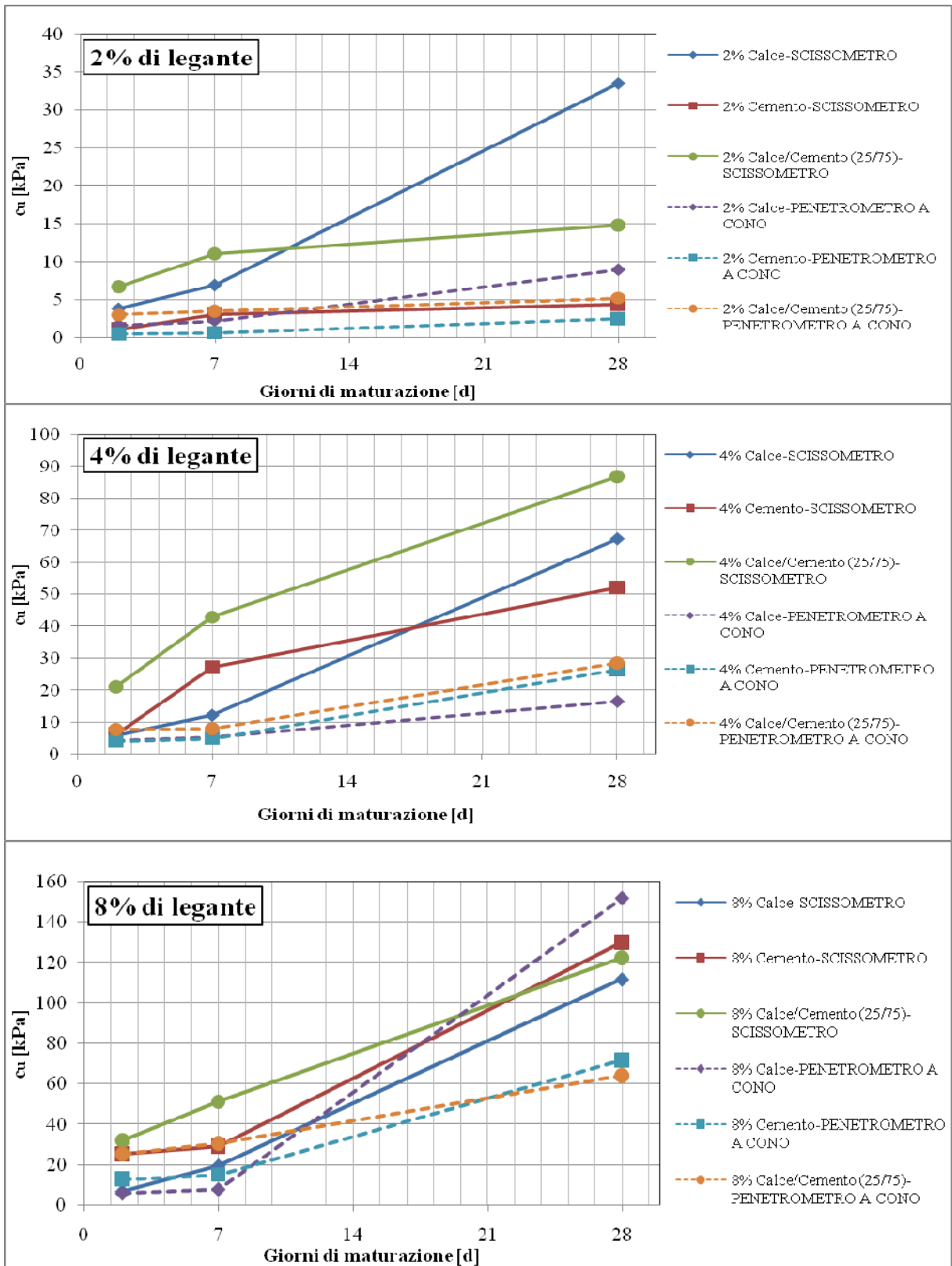


Fig. 20a: Confronto tra i valori di resistenza al taglio non drenata dell'argilla ottenuta con la prova scissometrica e col penetrometro a cono in funzione della quantità di legante aggiunto.

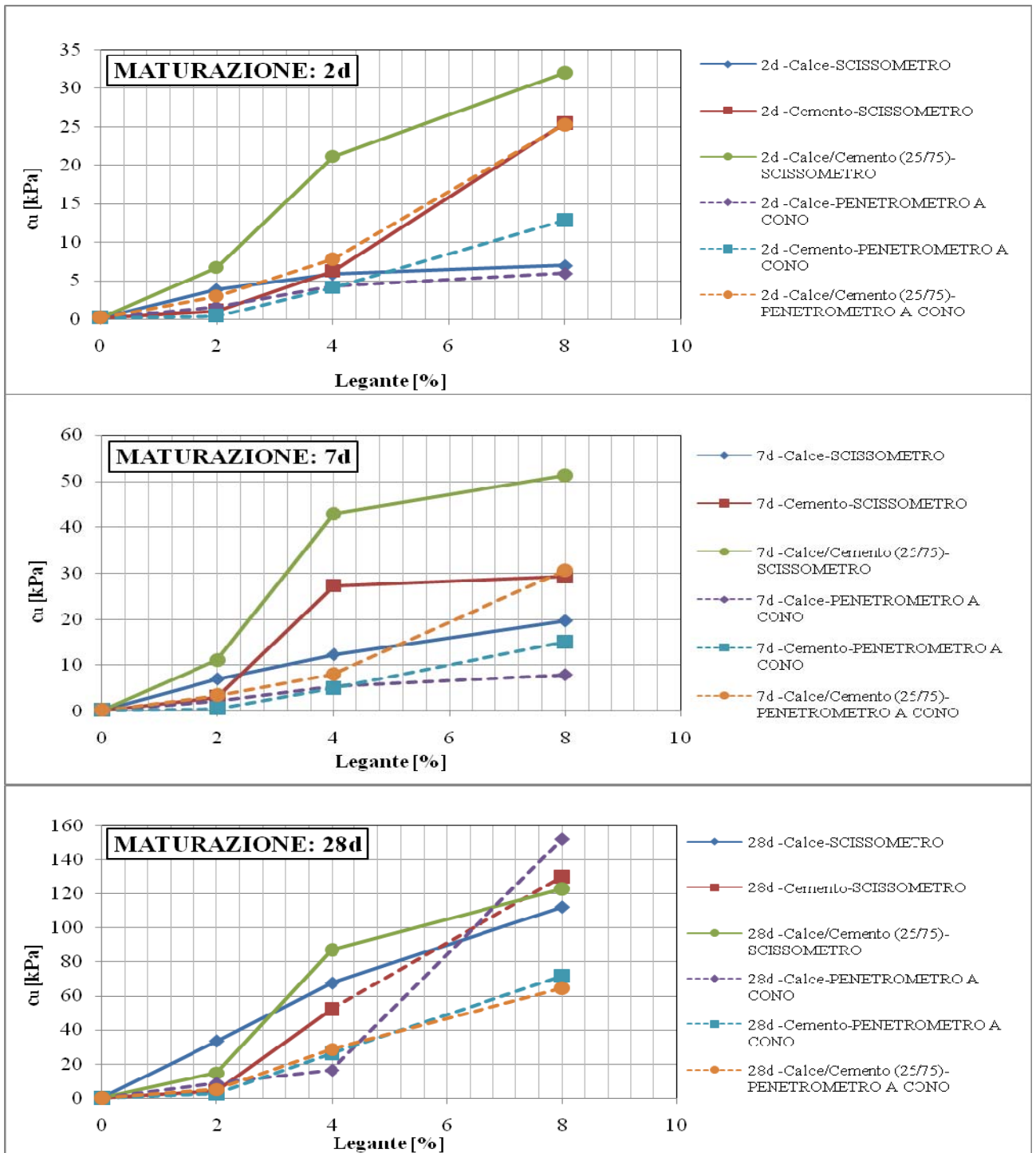


Fig. 20b: Confronto tra i valori di resistenza al taglio non drenata dell'argilla ottenuta col lo scissometro e col penetrometro a cono GEONOR in funzione del tempo di maturazione.

6.2.2.1 Incrementi di resistenza al taglio col tempo.

La resistenza al taglio – ed anche la portanza ed il modulo elastico – del terreno trattato con calce, cemento e calce/cemento aumenta col tempo (Fig. 21).

Mixing process	Soil type	Binder	UCS and standard deviation, s_d ,		UCS ratio
			short-term	long-term	
Dry deep mixing	Reclaimed clay, 60% clay, 39% silt, 1% sand	Quick lime, 12.5% dry weight	64 days: 1.02 MPa mean, $s_d = 0.2$ MPa	11 years: 3.5 MPa mean, $s_d = 0.78$ MPa	3.4
Dry deep mixing	Upper volcanic ash, underlined by peat, clay, silty fine sand and silt	Blast furnace slag cement type B, 290 kg/m ³ upper 3 m, 130 kg/m ³ lower 5 m	28 days: 0.2–0.5 MPa at 0–1 m depth, 0.2–0.5 MPa at 4–6 m depth	17 years: 1.5 MPa mean, $s_d = 0.98$ MPa 0.53 MPa mean, $s_d = 0.35$ MPa	>3 1.5
Dry deep mixing	4.5 m peat layer $w = 300$ – 500% , 5.5 m organic clay $w = 150$ – 200%	Cement-type agent, 265 kg/m ³	28 days: 0.58 MPa mean	14 years: 3.5 MPa mean	6.0
Wet shallow mixing	Reclaimed clay, 30% clay, 70% silt	Cement-type agent W/C = 1.5, 5% wet weight	21 days: 74 kPa mean	15 years: 220 kPa mean, $s_d = 139$ kPa	3.0
Wet deep mixing	Deep marine clay (offshore)	Cement	93 days: 6.1 MPa mean, $s_d = 2.0$ MPa	20 years: 13.2 MPa mean, $s_d = 5.19$ MPa	2.2

Note
 1 Data compiled from Terashi (2002b), based on the investigations of Terashi and Kitazume (1992), Yoshida et al. (1992), Hayashi et al. (2003), Inagaki et al. (2002), Ikegami et al. (2002).

Fig. 21: Guadagno di resistenza nel lungo termine sulla base di dati giapponesi da rilievi in situ (da Topolnicki, 2004).

I dati della figura rivelano che i terreni stabilizzati presentano significativi incrementi di resistenza nel lungo termine, anche se con forti differenze da caso a caso. In prima approssimazione, si può fare affidamento su di una resistenza 2-3 volte più grande 10-20 anni dopo il trattamento.

Incrementi più pronunciati si osservano per le mescolature a secco. Alti rapporti acqua/cemento possono, invece, impedire o fortemente ridurre il guadagno di resistenza nel lungo termine.

L'aumento di resistenza è inizialmente maggiore col cemento che con la calce. Ad ogni modo, in specie per la calce, la crescita di resistenza continua per alcuni anni. Ciò ha sostanziali risvolti pratici e concettuali. Ad esempio, il progetto di colonne di calce, cemento e calce/cemento è, di solito, basato sulla resistenza al taglio non drenata determinata 28 giorni dopo la realizzazione delle colonne medesime. Questa resistenza è piuttosto bassa per le colonne di calce, giacché gran parte dell'incremento di lungo termine si verifica oltre 28 giorni dopo la mescolatura. E' stato, perciò, proposto (Broms, 2004) che la resistenza di progetto delle colonne di calce debba basarsi sulla resistenza al taglio non drenata misurata o stimata dopo 90 giorni.

Per le argille inorganiche trattate con calce, può farsi affidamento, solitamente, su di una resistenza al taglio da 10 a 20 volte maggiore. Generalmente, il 50% della resistenza al taglio finale si raggiunge dopo 1 mese, il 75% dopo 3 mesi ed il 90 % dopo 1 anno (Broms, 2004).

L'incremento di resistenza a taglio nel lungo termine dipende in parte dal tipo di minerale argilloso prevalente; esso è talora di piccola utilità con la calce se la frazione argillosa è modesta ed il terreno consiste principalmente di limo.

Le reazioni pozzolaniche che, come già menzionato, sono simili a quelle causate dall'idratazione del cemento, sono lente, in specie quando è alto il contenuto in acqua.

Se invece si usa cemento o calce/cemento, l'incremento di resistenza è assai rapido nel primo mese e, di solito, diviene assai basso dopo 2-3 mesi (Broms, 2004).

E' possibile stimare la resistenza $S_{P_1,d}$, sviluppata dopo un periodo di maturazione di D giorni da un'argilla mescolata con una quantità P_1 (%) di cemento utilizzando l'equazione (Nagaraj and Miura, 2001):

$$\frac{S_{P_1,d}}{S_{P,14}} = \frac{P_1}{P} (0.189 + 0.298 \ln D)$$

in cui $S_{P,14}$ è la resistenza dell'argilla medesima mescolata con la quantità P (%) di cemento dopo 14 giorni di maturazione.

6.2.3 Risultati delle prove edometriche.

Le prove edometriche sono state effettuate su miscele argilla-legante messe a maturare per 28 giorni, non ritenendo concettualmente giustificate prove su campioni dopo 2 o 7 giorni di maturazione, ovvero dopo tempi di maturazione minori della durata delle prove medesime.

Come mostra la Tab. 7 e la Fig. 22, l'indice dei vuoti e_0 dopo la maturazione (28 giorni) diminuisce al crescere della quantità di legante. Questo risultato è coerente con quanto rilevato da Bergado *et al.* (2006) su argilla soffice di Bangkok trattata con cemento ed è da attribuire alla crescente quantità di prodotti cementizi di neoformazione e, di conseguenza, all'aumento del volume della fase solida per unità di volume della miscela argilla-legante.

Le figure mostrano che le curve di consolidazione dell'argilla trattata con legante si situano caratteristicamente a destra di quella dell'argilla non trattata rimaneggiata⁸. In altre parole: l'indice dei vuoti dell'argilla di base trattata è più alto di quello della stessa argilla non trattata per un dato livello di pressione. Inoltre, pur non avendo subito i campioni né compattazione né precarico, ben definite tensioni di snervamento o di preconsolidazione (σ'_p) (Tab. 7) possono essere individuate nelle curve di compressione. L'individuazione delle tensioni di snervamento è ancora più evidente – almeno in alcuni casi - se i dati delle prove di consolidazione vengono riportati nel piano $\log \sigma'_v - \ln(1+e)$ secondo la procedura proposta da Butterfield (1979), nella quale le tensioni di snervamento sono determinate dall'intersezione dei due tratti retti della curva (Fig. 23).

E' chiara l'indicazione di aumento della tensione di snervamento con l'aumento della percentuale di legante.

Gli alti valori osservati di tensione di snervamento delle miscele argilla-legante sono evidenze di legami, l'intensità dei quali è controllata, oltre che dalla quantità di legante, anche dalla quantità di frazione argillosa, dai tipi e quantità di minerali argillosi presenti, dal contenuto iniziale di acqua e dal tempo di maturazione (Chiu *et al.*, 2008).

I valori dei gradienti $-de/d\log \sigma'_v$ di rigonfiamento (C_s) ovvero anche di ricompressione pre-snervamento (C_r) e di compressione dopo snervamento (C_c) sono riportati in Tab. 7 e mostrano che per alti valori ($\geq 4\%$) di legante, la rigidità delle miscele argilla-legante prima dello snervamento (C_r) è influenzata solo leggermente dal contenuto di legante.

⁸ Da notare che il contenuto iniziale di acqua del campione di argilla non trattata rimaneggiata è $w_0=1.5w_L$. Pertanto, in coerenza con i suggerimenti di Burland (1990), i) il campione in parola può considerarsi ricostituito e ii) la sua curva di compressione edometrica rappresenta la curva di compressione intrinseca dell'argilla di base.

			Indice dei Vuoti iniziale e_0	Tensione di Snervamento σ'_p (kPa)	Indice di Compressione C_c	Indice di Rigonfiamento C_s
Argilla di base			2.22	0	0.66	0.072
miscela Argilla-Calce	% Calce	2	2.120	25	0.99	0.027
		4	2.095	80	0.45	0.011
		8	1.828	165	0.64	0.01
		10	1.818	180	0.36	0.01
miscela Argilla-Cemento	% Cemento	2	2.269	-	0.81	0.053
		4	2.210	90	0.79	0.02
		8	1.953	170	0.35	0.02
		10	1.932	> 400	-	0.02
miscela Argilla- Calce/Cemento	% Calce/Cemento (25/75)	2	2.161	-	0.81	0.048
		4	2.014	85	0.77	0.025
		8	1.917	170	0.31	0.022
		10	-	180	-	-
Argilla indisturbata (sondaggio S13, profondità di prelievo: 12,6÷13,1 m) (<i>vide</i> Appendice A)			-	250	0.256	0.056

Tab. 7: Risultati delle prove edometriche sulle miscele argilla – legante dopo 28 giorni di maturazione in acqua di mare.

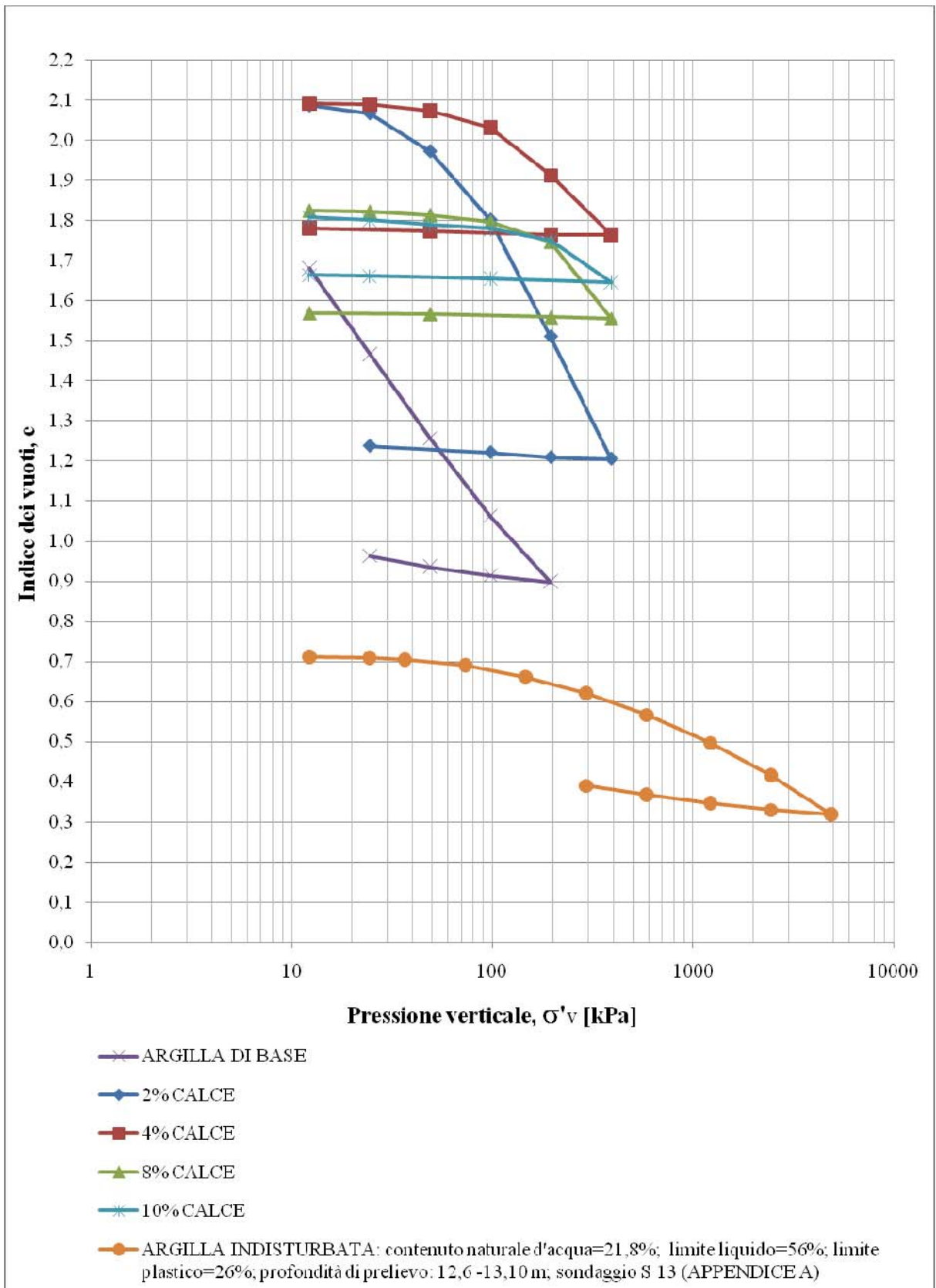


Fig. 22a: Risultati delle prove edometriche sulle miscele argilla – legante.

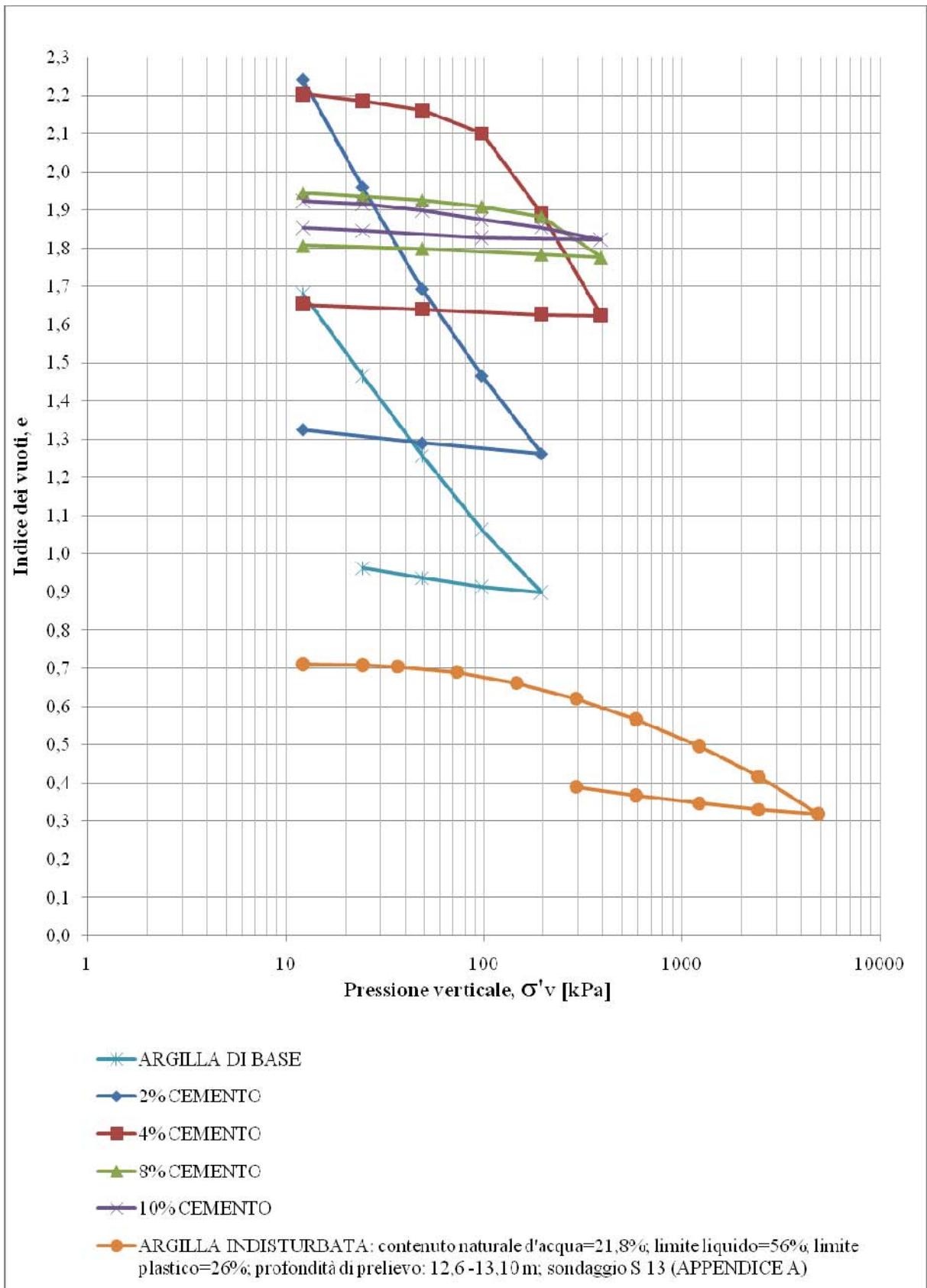


Fig. 22b: Risultati delle prove edometriche sulle miscele argilla – legante.

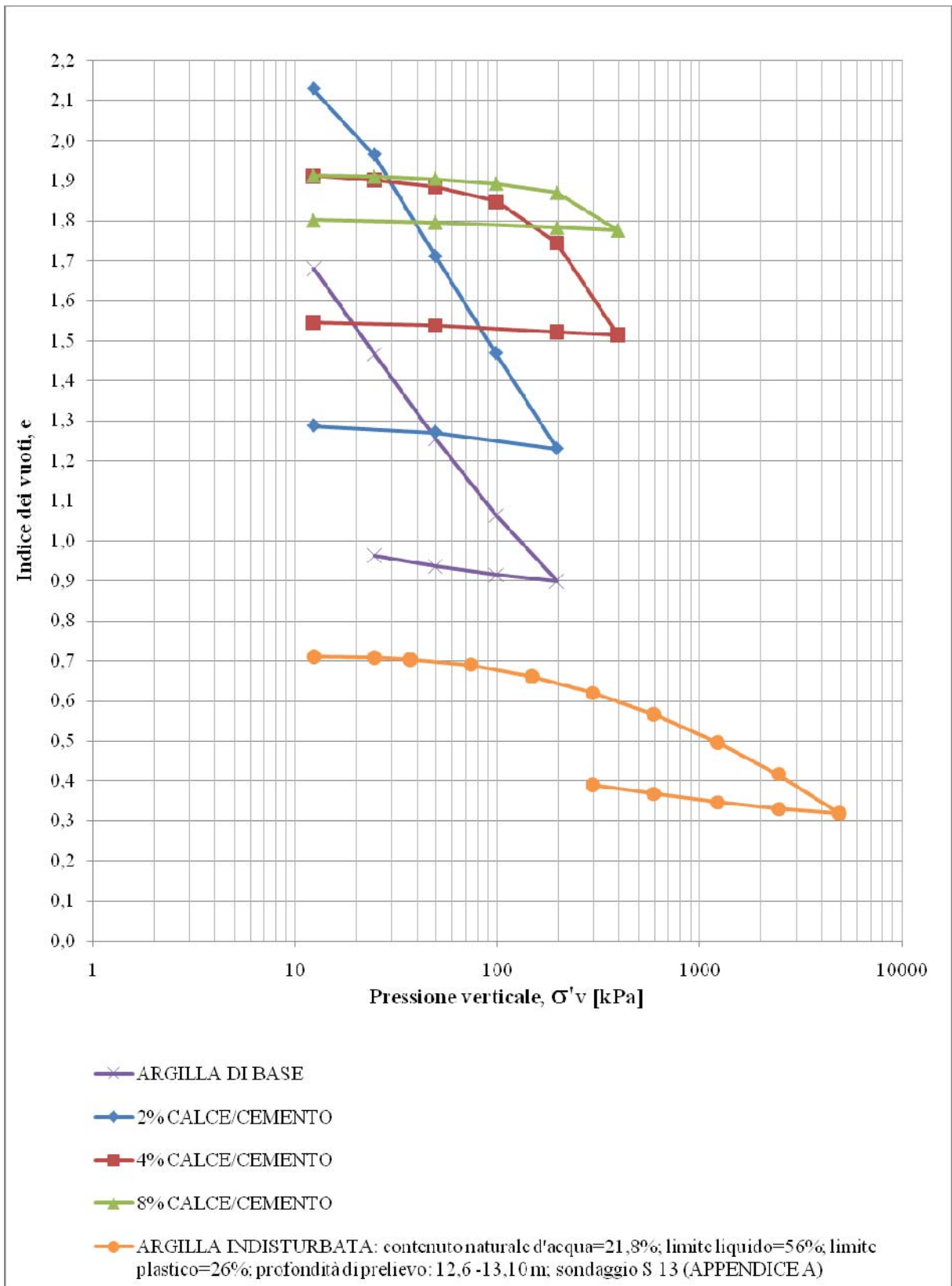


Fig. 22c: Risultati delle prove edometriche sulle miscele argilla – legante.

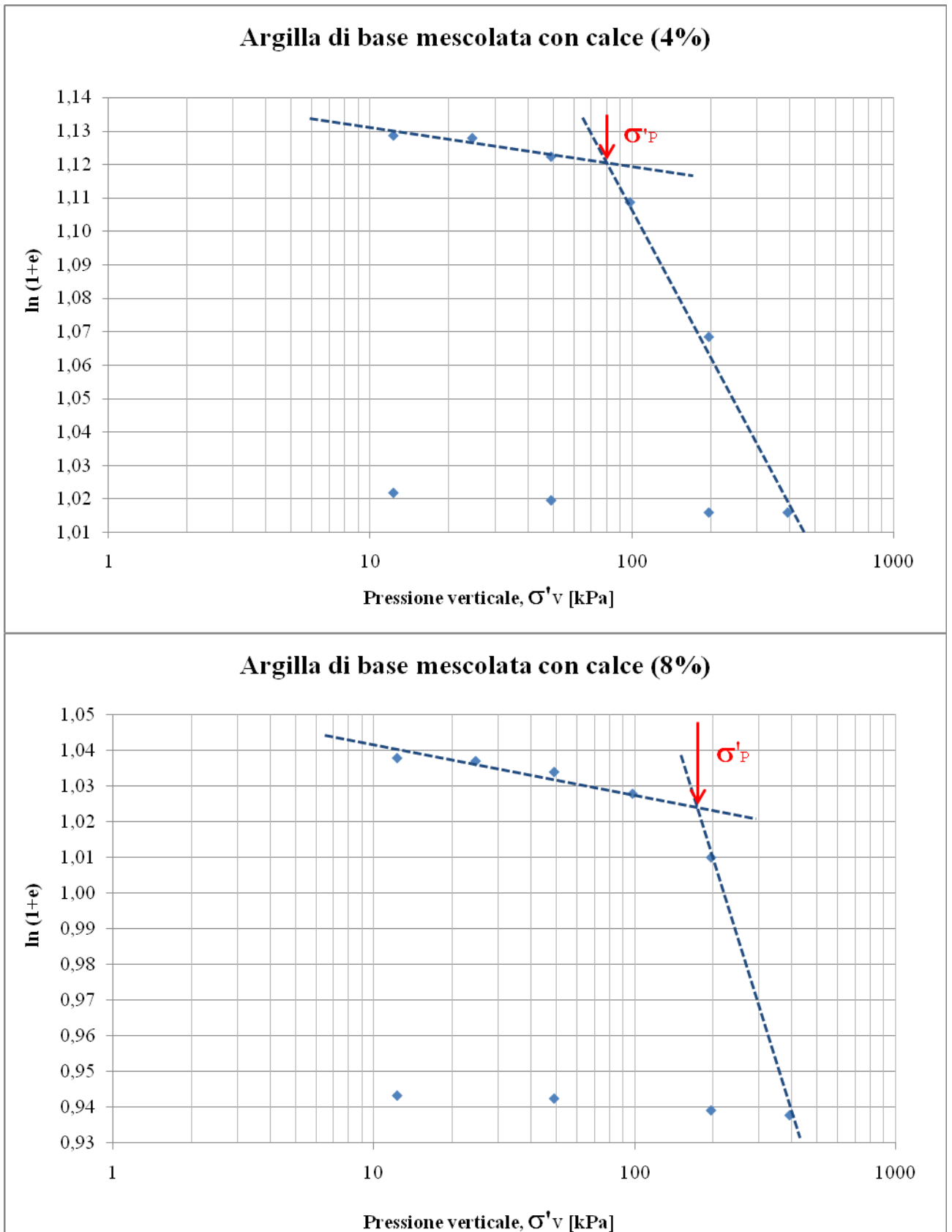


Fig. 23: Risultati delle prove edometriche nel piano $\log \sigma'_v - \ln(1+e)$.

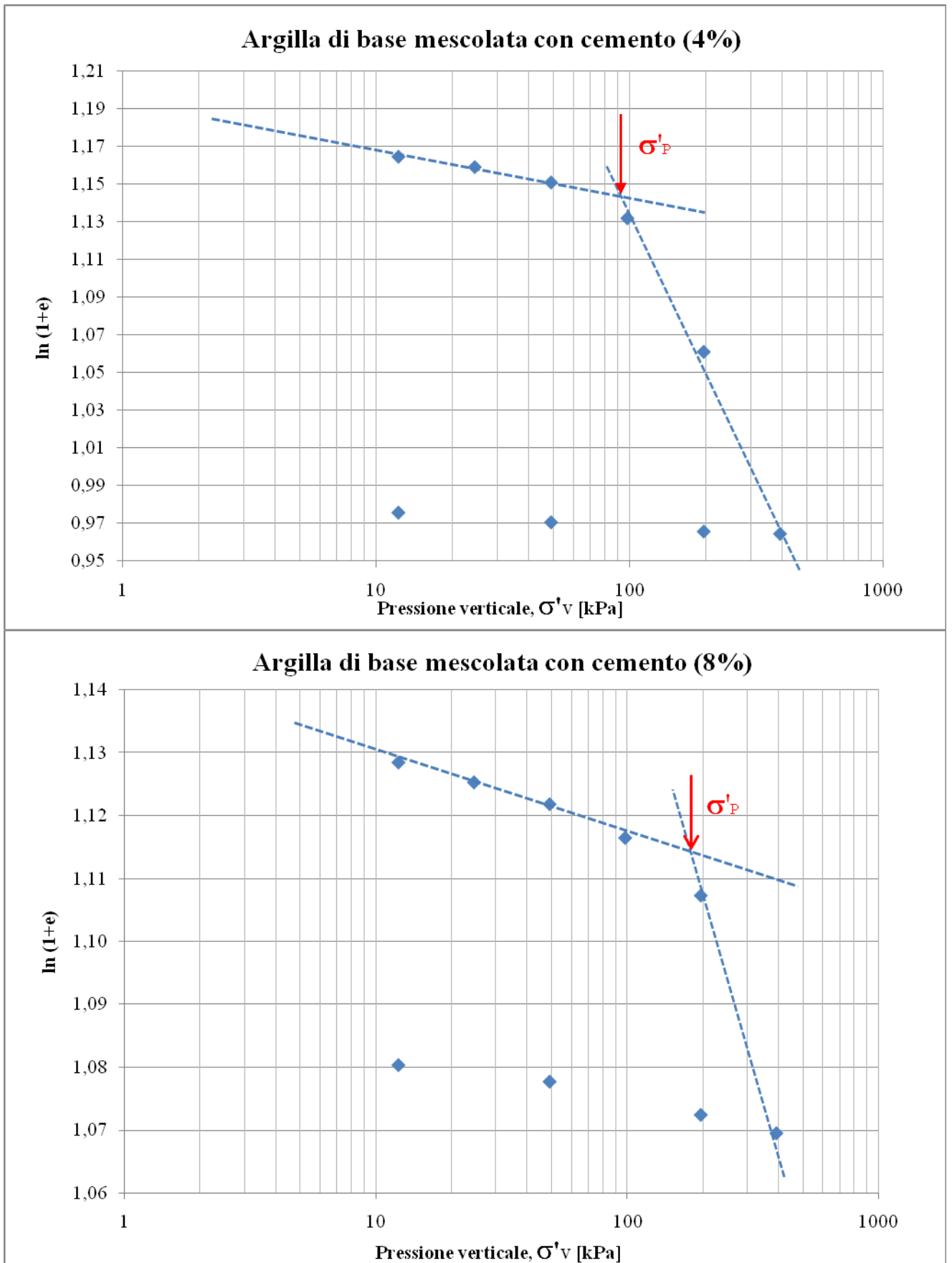


Fig. 23: Risultati delle prove edometriche nel piano $\log \sigma'_v - \ln(1+e)$.

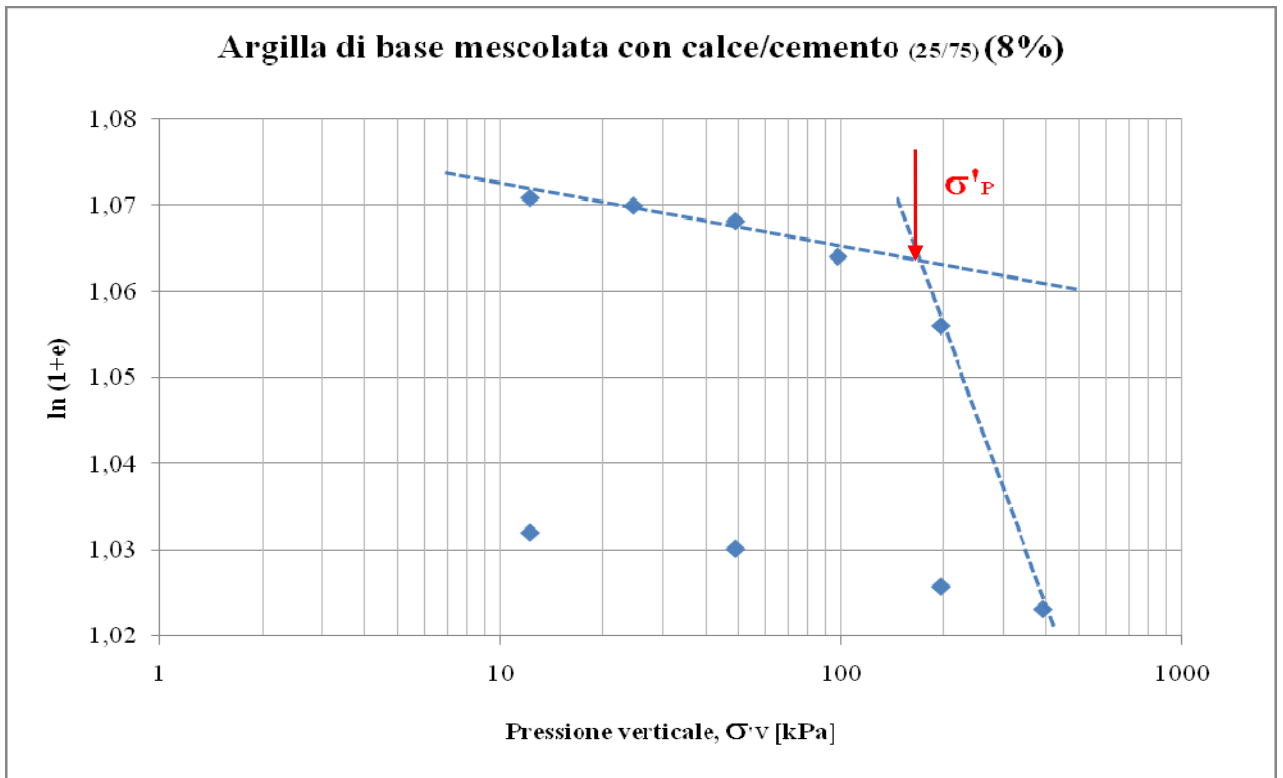


Fig. 23: Risultati delle prove edometriche nel piano $\log \sigma'_v - \ln(1+e)$.

Più marcata è, invece, l'influenza del contenuto di legante sulla rigidità post-snervamento (C_c)⁹ (Fig. 22).

Alcune osservazioni sono da fare sulle tensioni di snervamento delle miscele argilla – legante. Anzitutto, esse sono indotte solo dalla cementazione.

In secondo luogo, spicca il valore assai elevato dell'indice dei vuoti in corrispondenza delle medesime. Da queste osservazioni consegue che la condizione di sovraconsolidazione ovvero di irrigidimento della struttura è dovuta solo a saldature tra particelle e gruppi di particelle, per cui l'indice dei vuoti della pasta di argilla di base è diminuito in maniera non significativa. Nella medesima Fig. 22 è riportata, per confronto, la curva di compressione edometrica di un campione indisturbato di argilla fondale¹⁰, quasi identico, in termini di limiti liquido e plastico, all'argilla di base. Le miscele col 10% di legante hanno valori di tensione di snervamento di poco minori e, comunque comparabili, con quello del campione indisturbato,

⁹ In relazione all'indice di compressione C_c della miscela argilla-cemento (10%), i dati utili alla sua determinazione sono limitati (Fig. 22b), non essendo ben sviluppata la linea di compressione post – snervamento nel campo delle tensioni applicate.

¹⁰ Il campione appartiene al sondaggio 13 ed è caratterizzato da: $w_n=21.8\%$, $w_L=56\%$, $w_P=26\%$ e profondità di prelievo = 12.6÷13.1 m (vide APPENDICE A).

preconsolidato prevalentemente per effetto di storia tensionale. Risalta il fatto che i rispettivi indici dei vuoti in corrispondenza delle pressioni di snervamento siano, grossomodo, nel rapporto 3/1. Da cui la rigidità post – snervamento assai più grande dell'argilla indisturbata (Tab. 7).

6.2.4 Risultati delle prove TD.

I parametri di resistenza al taglio in termini efficaci delle varie miscele argilla di base-legante sono stati determinati con prove di taglio diretto drenate. Le prove sono state limitate alle miscele col 4 e con l'8% di legante, dopo maturazione in acqua marina per 28 giorni.

Le Figg. 24 mostrano le curve sforzo-deformazione delle prove di taglio diretto. La maggior parte delle prove sono state condotte a basso valore di tensione normale. Il comportamento al taglio delle miscele con l'8% di legante è quello di un'argilla sovraconsolidata, con resistenza di picco raggiunta ad una deformazione di 2-3 mm.

Il comportamento delle miscele al 4% è in parte duttile e la resistenza di picco viene raggiunta dopo 3-5 mm di deformazione.

I valori dei parametri di resistenza al taglio sono in Tab. 8.

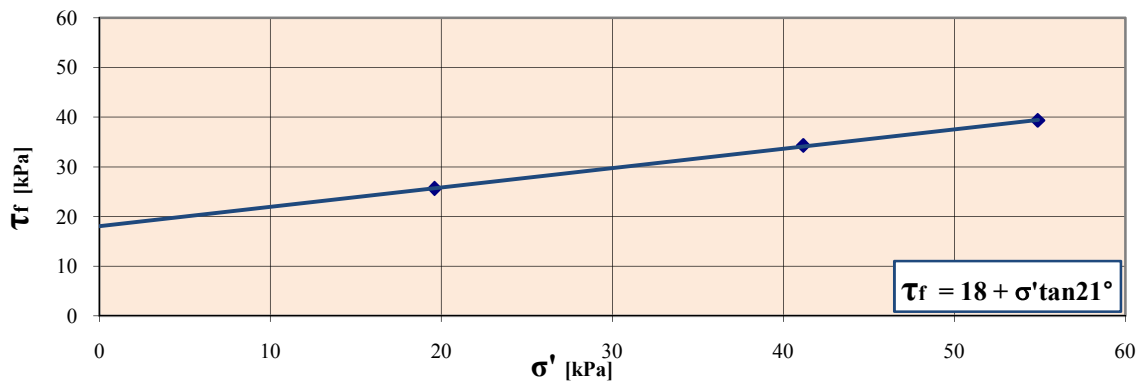
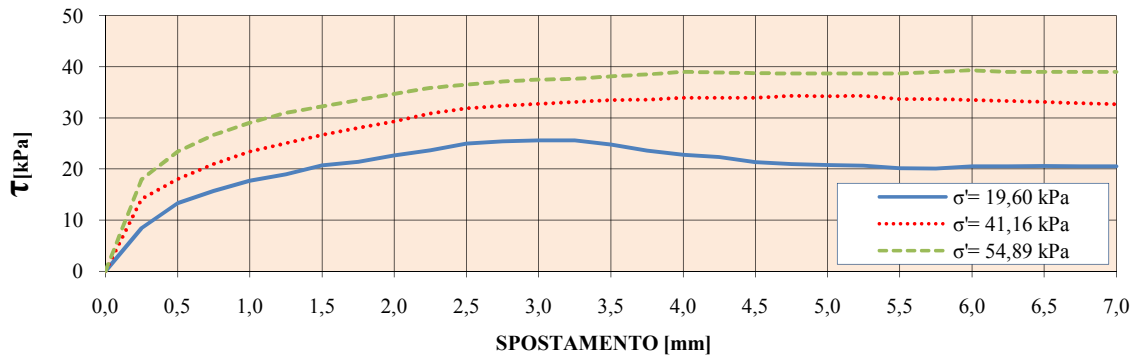
L'angolo d'attrito varia tra 20° e 52°, in dipendenza dalla quantità di legante.

Ancora più significativo è l'effetto della quantità di legante sulla coesione intercetta c' . In proposito, Chiu *et al.* (2008) riportano che c' cresce non linearmente al crescere del contenuto di cemento per un dato terreno.

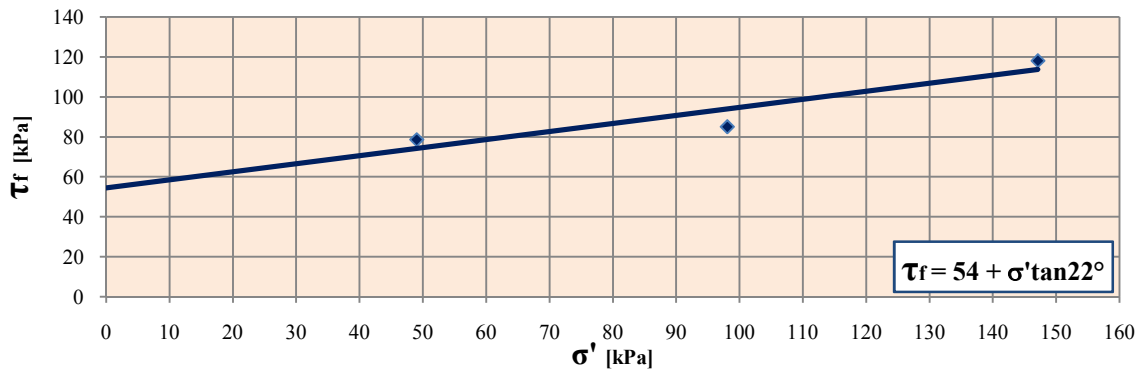
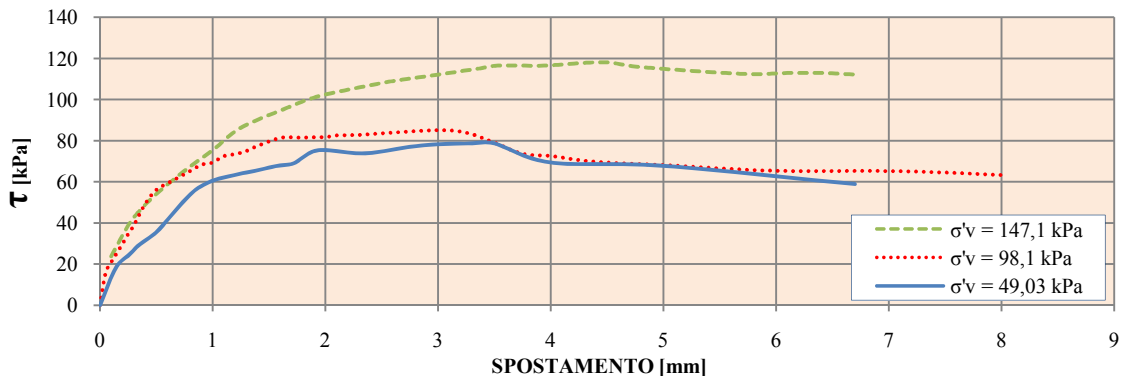
I “percorsi” degli incrementi di resistenza in conseguenza dell'aumento di percentuale (da 4 a 8) di legante sono delineati in Fig. 25.

PROVA DI TAGLIO DIRETTO

**Argilla di base mescolata con calce (4%)
MATURAZIONE: 28d**

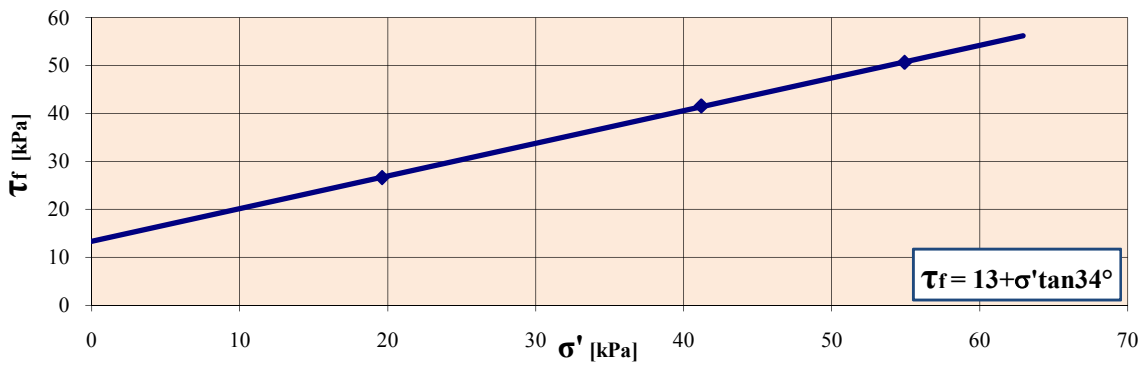
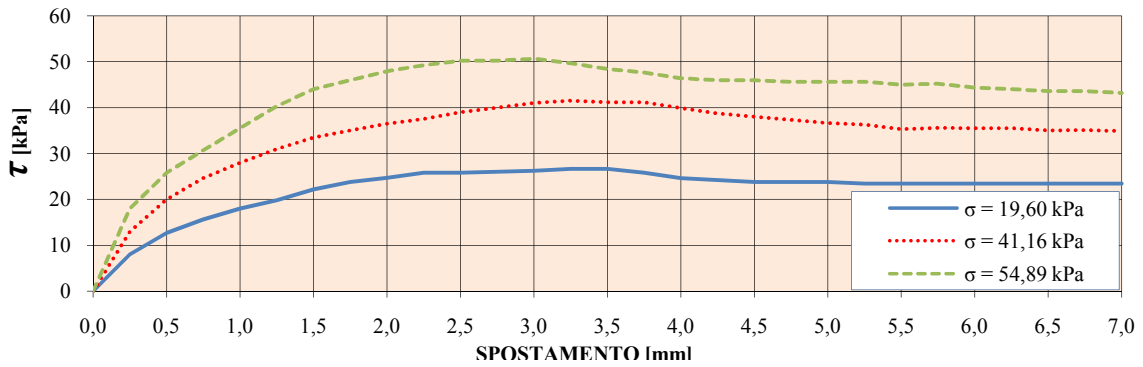


**Argilla di base mescolata con calce (8%)
MATURAZIONE: 28d**

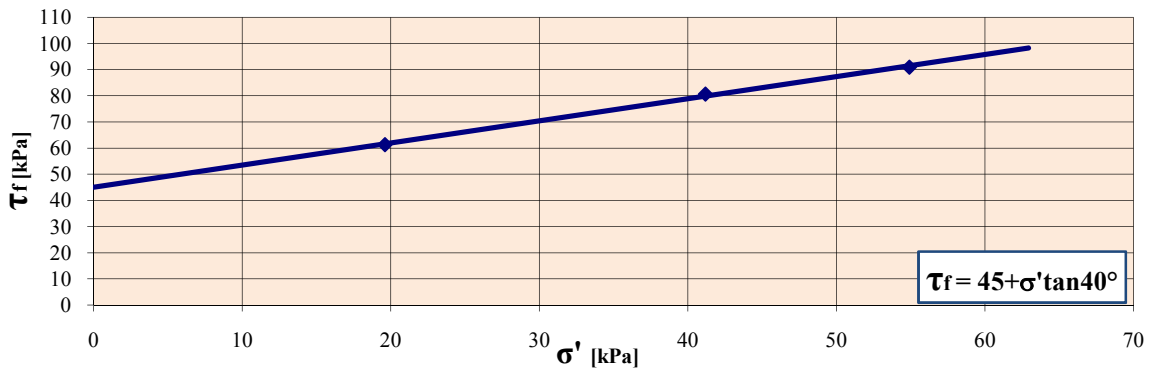
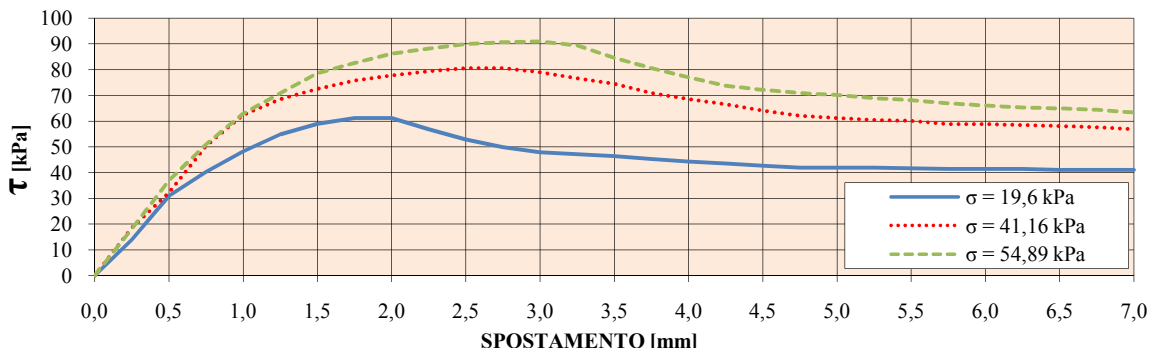


PROVA DI TAGLIO DIRETTO

**Argilla di base mescolata con cemento (4%)
MATURAZIONE: 28d**

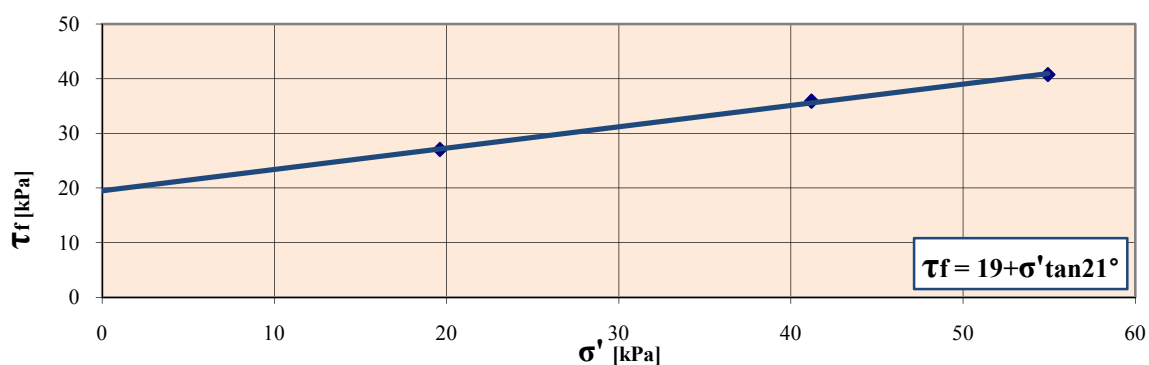
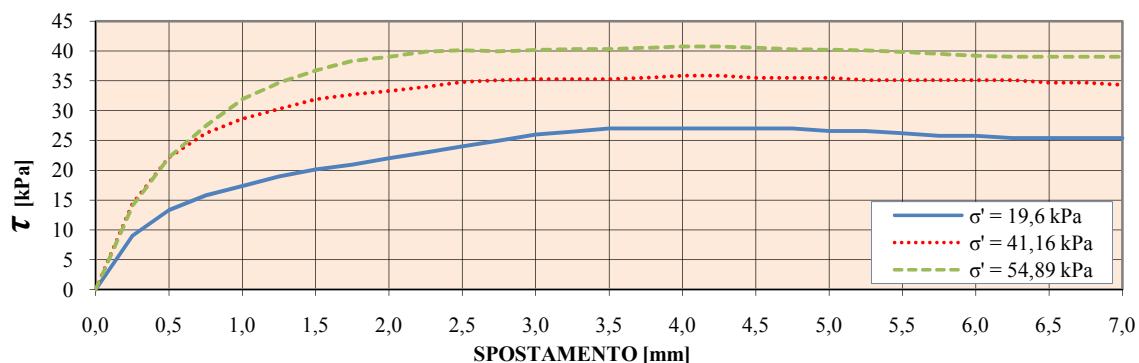


**Argilla di base mescolata con cemento (8%)
MATURAZIONE: 28d**

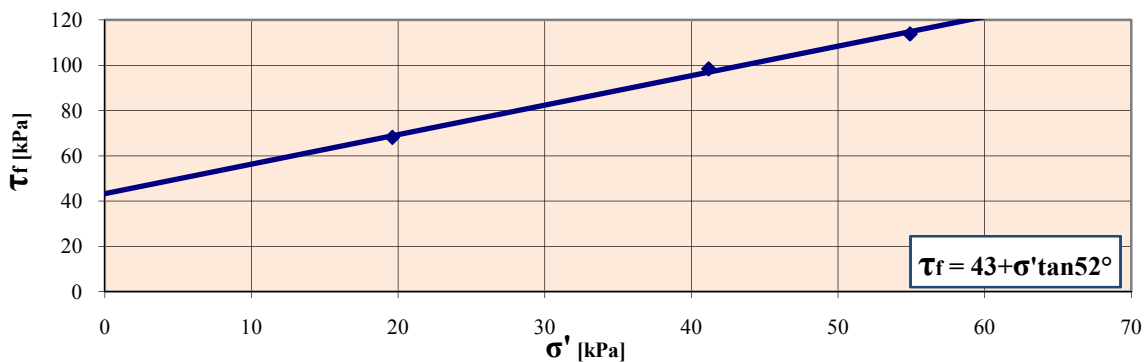
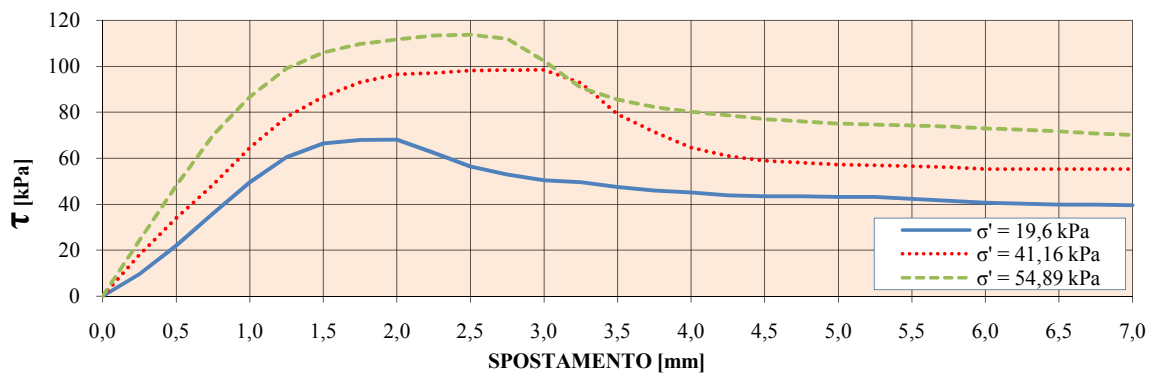


PROVA DI TAGLIO DIRETTO

**Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75) (4%)
MATURAZIONE: 28d**



**Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75) (8%)
MATURAZIONE: 28d**



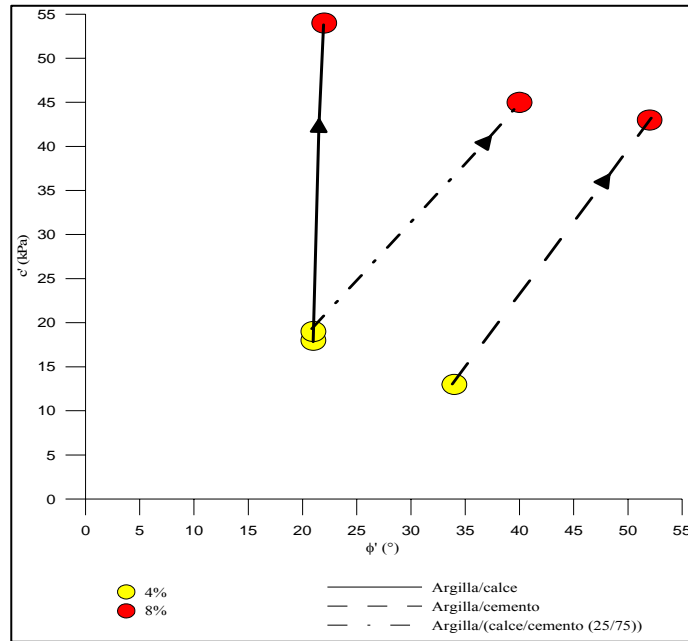


Fig. 25: Incrementi dei valori dei parametri di resistenza a taglio in termini efficaci ($c' - \phi'$) conseguenti all'aumento della quantità di legante da 4 ad 8%.

			Coazione intercetta c' (kPa)	Angolo d'attrito ϕ' (°)
miscela Argilla-Calce	% Calce	4	18	21
		8	54	22
miscela Argilla-Cemento	% Cemento	4	13	34
		8	45	40
miscela Argilla-Calce/Cemento (25/75)	% Calce/Cemento	4	19	21
		8	43	52

Tab. 8: Parametri di resistenza al taglio in tensioni efficaci della miscela argilla – legante (Prove TD drenate su campioni lasciati maturare per 28 giorni).

7. Consolidazione dello *slurry* nella cassa di colmata.

7.1 Consolidazione dello *slurry* per peso proprio.

Nella situazione di cui ci si occupa, il materiale argilloso dei fondali del porto verrà idraulicamente dragato ed idraulicamente convogliato e deposto come *slurry* in cassa di colmata, con un contenuto d'acqua $w=154\%$ (Tomasicchio, 2009) o, probabilmente, ancora più elevato.

Nel deposito così realizzato le particelle di argilla non sono inizialmente in contatto e sedimentano secondo la legge di Stokes sin quando non cominciano a venire mutuamente in contatto (Fig. 6). Pertanto, essendo nulla la tensione efficace, inizialmente il peso totale dello *slurry* deve essere sopportato dalla pressione interstiziale, il cui valore, di conseguenza, viene a superare quello idrostatico. Alla fine della fase di sedimentazione, allorché le particelle sono sufficientemente vicine da consentire lo sviluppo di uno scheletro strutturale, mantenuto dall'azione di forze elettrochimiche ai contatti interparticellari, le pressioni interstiziali in eccesso si dissipano man mano che la consolidazione in atto della struttura del terreno consente a quest'ultimo di sopportare una parte crescente del suo stesso peso. Nel tempo, quindi, lo *slurry* pompato nella cassa di colmata consolida per peso proprio e gli eccessi di pressione interstiziale mutano in tensioni efficaci. In relazione alla stima della lunghezza temporale del processo di consolidazione (primaria), è da osservare che la base delle casse di colmata del porto tarantino è costituita da argilla azzurra in posto, talché il drenaggio può svolgersi solo attraverso la superficie superiore della massa di fango liquido messavi a dimora.

Come già detto, sin quando le particelle di terreno non sono in contatto, la tensione verticale efficace (σ'_{v1}) è pari a zero. Perciò, in base al principio degli sforzi efficaci, all'inizio del processo di consolidazione la pressione interstiziale (u_1) è eguale, ad ogni profondità, alla tensione totale verticale (σ_v):

$$u_1 = \sigma_v = \gamma z$$

e

$$\sigma'_{v1} = 0 \quad , \quad u_{e1} = (\gamma - \gamma_w) z$$

u_{e_i} , γ e γ_w essendo, rispettivamente, l'eccesso iniziale di pressione interstiziale, il peso dell'unità di volume dello *slurry* ed il peso dell'unità di volume dell'acqua di mare.

Alla fine del processo di consolidazione, essendo divenuti nulli gli eccessi di pressione interstiziale, le pressioni interstiziali u_f tornano ad essere idrostatiche in tutti i punti al di sotto della superficie dell'argilla consolidata, se tutta l'acqua espulsa è stata drenata,

$$u_f = \gamma_w Z$$

In quel che segue si fa riferimento alla parte più esterna della cassa di colmata di maggiori dimensioni (Fig. 1), laddove la profondità del mare è pari, mediamente, a m 10. Tenendo conto che il livello del piano delle banchine del porto è a +3 m sul l. m .m., si assuma che la cassa venga omogeneamente impegnata dallo *slurry* per tutta la sua profondità (ovvero: $d = 10 + 3 = 13\text{m}$), senza, pertanto, considerazione alcuna degli effetti di classazione e della gradualità di riempimento.

In conseguenza della sedimentazione associata alla deposizione dello *slurry* in colmata, viene a formarsi un'interfaccia acqua pulita – *slurry* che s'abbassa nel tempo, con aumento di densità e diminuzione del contenuto d'acqua dello *slurry* e sviluppo di eccessi di pressione interstiziale all'interno del medesimo, sino a stabilizzarsi ad una certa altezza.

Drenando via via lo spessore sommitale di acqua pulita e immettendo altro *slurry* nella vasca si può assumere di poter impegnare l'altezza totale della cassa di colmata, sino al livello della banchina, con *slurry* “addensato” e sottoconsolidato, ovvero sede di eccessi di pressione interstiziale non ancora dissipati ($OCR < 1$).

Evidenze qualitative di laboratorio (Fig. 9b) indicano per questa condizione post – sedimentazione e di incipiente consolidazione un contenuto di acqua dell'ordine di $1.5w_L = 83\%$ ed un corrispondente indice dei vuoti $e = 1.5e_L = 1.5 \times 1.47 = 2.2$.

Questa indicazione di laboratorio trova un qualche conforto in Tsuchida and Gomyo (1995), secondo i quali “...the void ratios of marine clay when the consolidation starts seem to be 1.5 – 2.0 times that at the liquid limit”. Ad ogni modo, questo cruciale aspetto, unitamente alla quantificazione dei tempi ad esso associati, necessita di specifico approfondimento teorico e sperimentale in situ.

La Fig. 26 riporta i risultati della prova edometrica sull'argilla di base portata ad un contenuto d'acqua $w_0 = 1.5w_L = 83\%$.

Un'idea del tempo necessario per l'esplicarsi della consolidazione per peso proprio può ottenersi considerando le quantità adimensionali (Powrie, 2004):

ARGILLA DI BASE, $w_0=1,5w_L=83\%$

Tempo h	σ'_v kPa	Cedimento mm	ϵ_v	e
------------	--------------------	-----------------	--------------	---

72	12,251	3,35	0,168	1,68
24	24,503	4,679	0,234	1,47
24	49,005	5,99	0,300	1,26
24	98,010	7,19	0,360	1,06
24	196,020	8,211	0,411	0,90
24	98,010	8,115	0,406	0,91
24	49,005	7,978	0,399	0,94
24	24,503	7,81	0,391	0,96

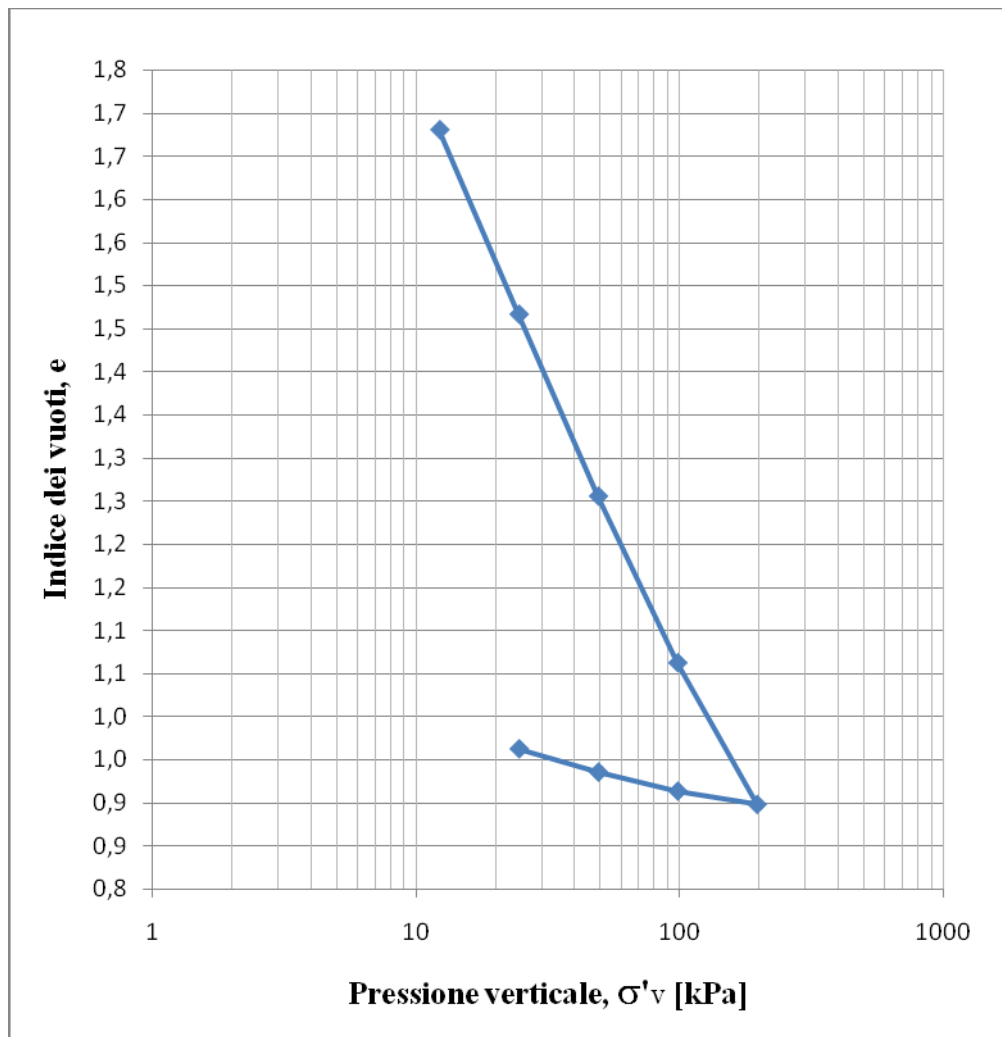
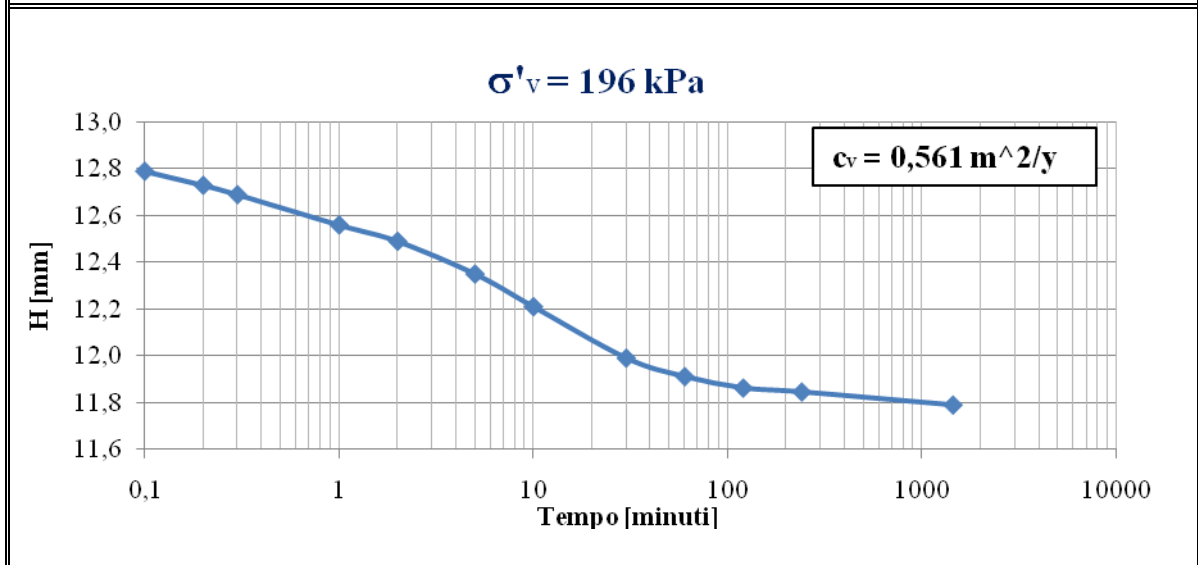
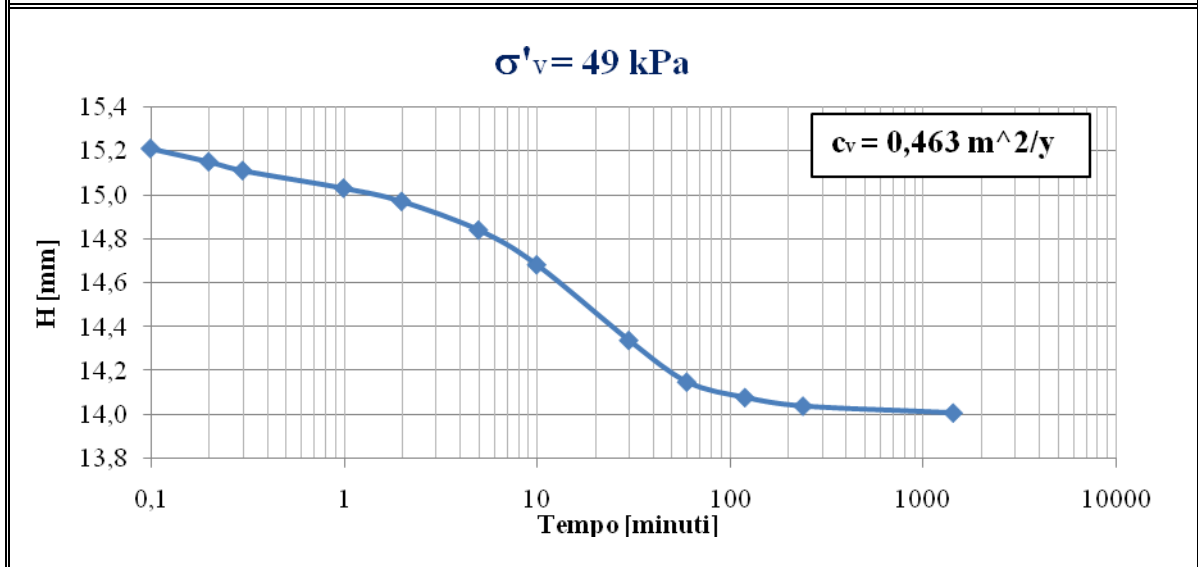
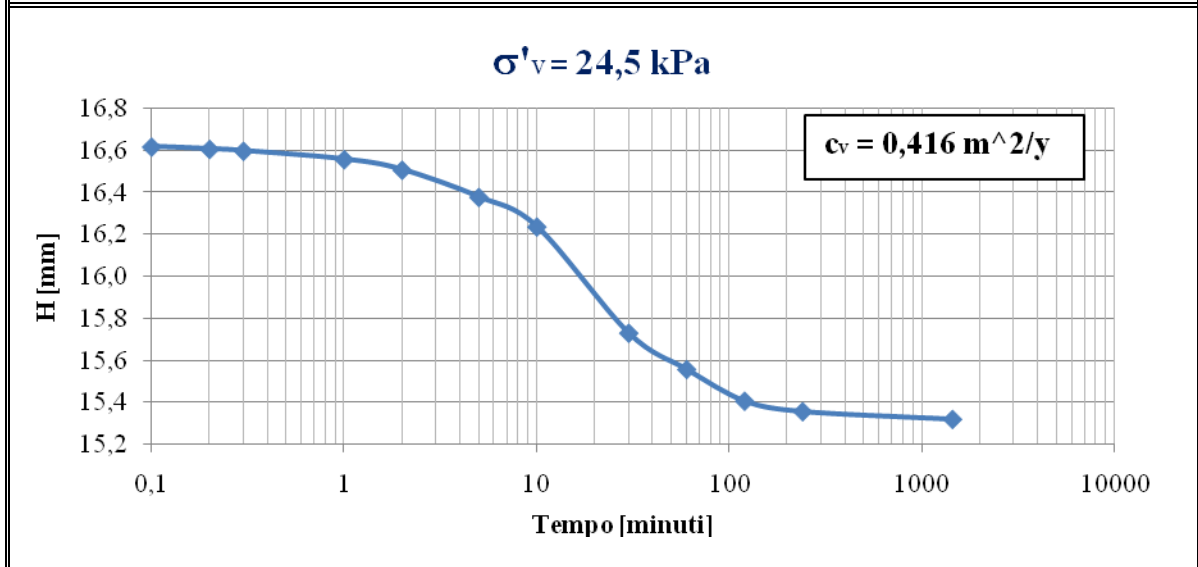


Fig. 26a: Prova edometrica sull'argilla di base a $w_0 = 1.5w_L$: curva $e - \log \sigma'_v$.

CURVE CEDIMENTO - TEMPO
Argilla di base ($w = 1,5w_L = 83\%$)



$$U = \frac{\rho}{\rho_{ult}} = 1 - \frac{2}{3} e^{\left(\frac{1}{2} - 3T_v\right)} = \text{grado di consolidazione}$$

$$T_v = \frac{c_v t}{d^2} = \text{fattore di tempo}$$

in cui d (= 13 m) rappresenta il percorso di drenaggio, mentre c_v è il coefficiente di consolidazione. Assumendo (Fig. 26):

$$C_v = 0.463 \text{ m}^2/\text{y},$$

il realizzarsi di un grado di consolidazione del 90%, ovvero $R = 0.9$, richiederebbe, essendo $T = 0.799$, un lasso di tempo pari a:

$$t = \frac{d^2}{c_v} T_v \cong 254 \text{ ann}$$

7.2 Consolidazione dello *slurry* con precarico.

Le esigenze operative del porto impongono che il terreno dei piazzali ottenuti con le colmate abbia sufficiente rigidità – almeno in relazione ai carichi dovuti ai container (6 t/m^2) e, nello stesso tempo, che tale terreno venga approntato in tempi relativamente brevi, ovvero con tempi di consolidazione primaria drasticamente ridotti.

Si potrebbe indicativamente suggerire, all'uopo, di stabilizzare con calce/cemento (25/75) la sommità dell'interramento per uno spessore di m 3 in guisa da costituire una piattaforma asciutta su cui operare per l'installazione di dreni verticali e su cui, immediatamente di seguito, realizzare un rilevato di precarico di loppa granulare deferrizzata ($\gamma = 2.8 \text{ t/m}^3 = 27.5 \text{ kN/m}^3$) alto m 5, qualitativamente secondo lo schema¹¹ adottato nel porto di Valencia (Burgos

¹¹Una variante di questo schema, assai migliore dal punto di vista concettuale ed energetico, può essere, in linea di principio, quella in cui si usi un precarico di minore entità, ma si realizzi preliminarmente un letto drenante alla base della cassa di colmata, ovvero sul fondo marino. Il consolidamento dell'argilla dragata trarrebbe grandissimo vantaggio dalle forze di filtrazione – che sono forze efficaci – dirette verso il basso, create dal pompaggio di acqua dal dreno di base. Che verrebbe mantenuto non saturo per tutta la durata del processo di consolidazione. Allo svantaggio poi della minore volumetria disponibile per lo *slurry* e dei costi quasi certamente maggiori, farebbe riscontro un ulteriore formidabile vantaggio rappresentato dal fatto che l'argilla dello *slurry* in tal modo consolidata passerebbe ad uno stato di sovraconsolidazione dopo la cessazione del pompaggio, cioè al ritorno della sua superficie piezometrica al livello del mare. Con la conseguenza pratica di cedimenti residui di entità molto ridotta.

et al., 2007). Nell'analisi che segue, questo carico verrà considerato istantaneo. La Fig. 27 schematizza il problema, nel quale è da tenere presente lo stato di sottoconsolidazione della massa di *slurry* addensato, spessa m 10 e la cui superficie superiore è al livello del mare. Prima del precarico, questa massa era nella fase iniziale di consolidazione, per peso proprio, con un eccesso di pressione neutra alla sua base ottenibile ponendo $t = 0$ nell'equazione (Powrie, 2004):

$$u_{ed} = \left[d^2 (\gamma - \gamma_w) / 2 \right] e^{\left[\frac{1}{2} - 3c_v \frac{t}{d^2} \right]}$$

Con i dati della figura¹²,

$$u_{ed} = \left[13(15.32 - 10.08) / 2 \right] e^{\frac{1}{2}} = 56 \text{ kPa}$$

Assumendo una variazione lineare di u_{ed} con la profondità, in corrispondenza del centro dello strato di fango argilloso si ha:

$$u_{ed} = 34.5 \text{ kPa}$$

$$u_0 = (5 + 3) \times 10.08 = 80.6 \text{ kPa}$$

$$u = u_0 + u_{ed} = 80.6 + 34.5 = 115.1 \text{ kPa}$$

$$\sigma_v = 5 \times 15.3 + 3 \times 15.8 = 124 \text{ kPa}$$

Tensioni efficaci al centro dello strato di fango argilloso ovvero d'argilla non stabilizzata prima dell'applicazione del precarico:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_0 = 43.4 \text{ kPa} = \text{tensione verticale efficace}$$

¹² In relazione al parametro γ , il suo valore è stato ottenuto in funzione del contenuto in acqua w , del peso dell'unità di volume dell'acqua – in questo caso, marina - γ_w e del peso specifico della fase solida G_s dell'argilla di base satura:

$$\gamma = G_s \gamma_w \frac{1 + w}{1 + w G_s}$$

Con i valori $G_s = 2.67$, $w = 83\%$ e $\gamma_w = 10.08 \text{ kN/m}^3$, risulta essere: $\gamma = 15.3 \text{ kN/m}^3$.

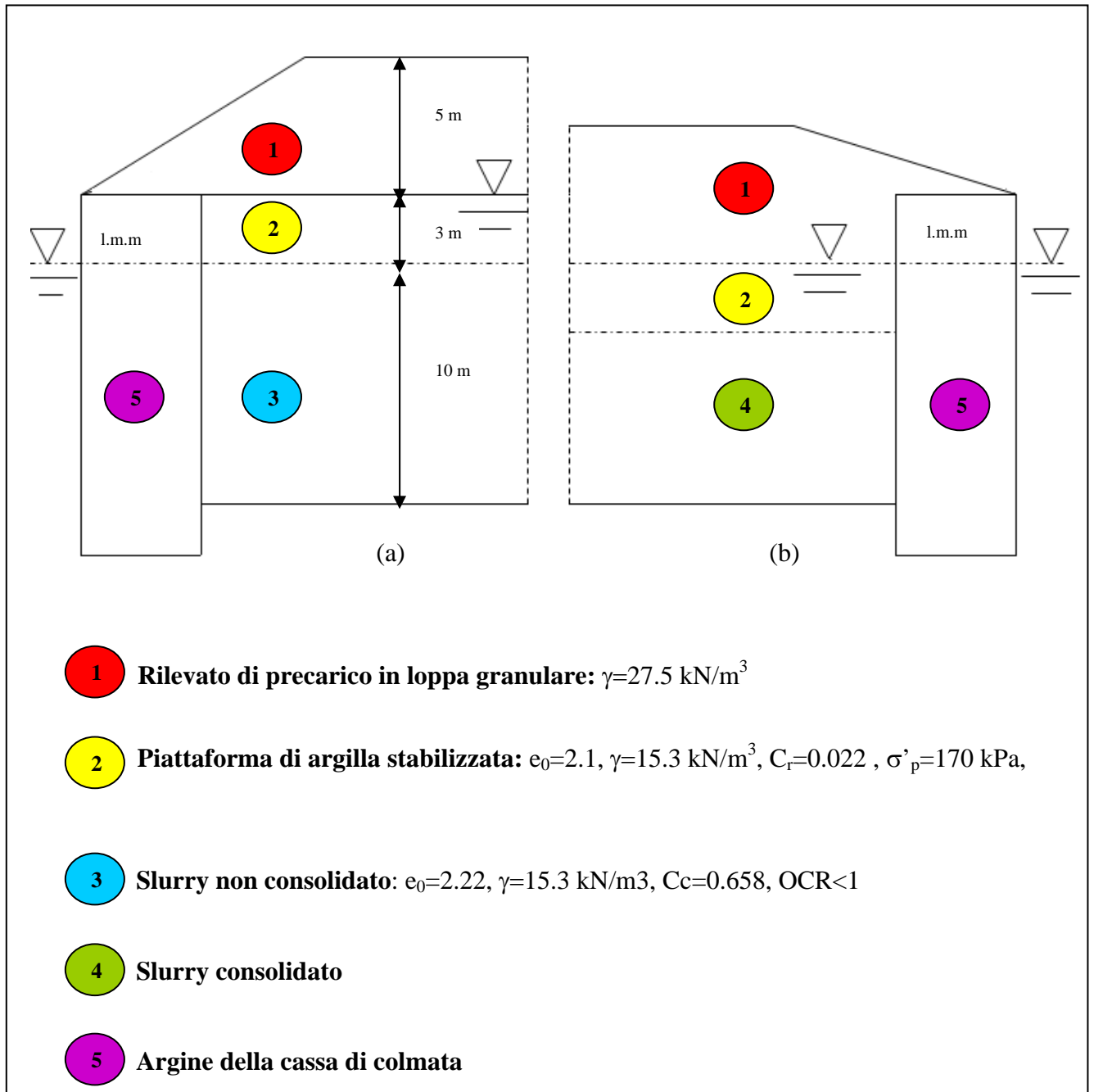


Fig. 27: Schema del sistema cassa di colmata completamente impegnata dallo *slurry* + piattaforma di argilla stabilizzata + rilevato di precarico.

$$\sigma'_1 = \sigma_v - u_0 - u_{ed} = 8.9 \text{ kPa} = \text{valore iniziale della tensione verticale efficace}$$

:Tensione verticale efficace iniziale al centro dello strato d'argilla stabilizzata prima dell'applicazione del precarico:

$$\sigma' = 1.5(15.8 - 10.08) = 8.58 \text{ kPa}$$

Incremento di tensione dovuto al rilevato di precarico:

$$\Delta\sigma = 5 \times 27.5 = 137.5 \text{ kPa}$$

Il valore della tensione di snervamento σ'_p dell'argilla stabilizzata con calce/cemento (Tab. 6) è pari, dopo 28 giorni di maturazione, a 170 kPa. Assumendo conservativamente tale valore anche nel lungo termine, si ha

$$\Delta\sigma = 137.5 < \sigma'_p$$

Il caricamento dell'argilla stabilizzata è, perciò, una ricompressione.

Dalla Tab. 6, $C_s = C_r = 0.022$, mentre per lo strato sottostante di argilla non stabilizzata, $C_c = 0.658$.

Il cedimento di consolidazione che ne deriva è:

$$\begin{aligned} S &= \frac{C_r}{1+e_{0_1}} 3 \log \frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'} + \frac{C_c}{1+e_{0_2}} 10 \log \frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'}{\sigma'_i} = \\ &= \frac{0.022}{1+2.22} 3 \log \frac{8.58+137.5}{8.58} + \frac{0.658}{1+2.1} \cdot 10 \log \frac{43.4+137.5}{8.9} = 0.025 + 2.78 = 2.8 \text{ m} \end{aligned}$$

In relazione ai tempi di consolidazione, si è considerato che la permeabilità dell'argilla di base non è significativamente influenzata dal trattamento di stabilizzazione con legante. Inoltre, considerando il cedimento di 2.8 m, si può assumere un valore medio del percorso di drenaggio pari a $d = 13 - \frac{2.8}{2} = 11.6$ m. Dalla Fig. 26,

$$C_v = 0.561 \text{ m}^2/\text{y}$$

$$\text{Per } U = 90\%, T_v = 1.781 - 0.933 \log(100\% - U) = 0.848$$

$$T_v = c_v \frac{t}{d^2} \quad \Rightarrow \quad t = 203 \text{ anni.}$$

7.2.1 Accelerazione del cedimento di consolidazione con l'uso di dreni prefabbricati.

Le esigenze di operatività portuale non sono, ovviamente, compatibili con un tempo di consolidazione più che secolare. Da cui la necessità di accelerare l'evoluzione del processo di consolidazione. Ciò può ottenersi installando un sistema di dreni verticali, che rende più breve il percorso di drenaggio.

Infatti, opportuni sistemi di drenaggio in tutto lo spessore dello stato compressibile, in uno con una qualche forma di precarico, conducono a fortemente abbreviare il tempo di consolidazione primaria. Con simultaneo aumento delle tensioni efficaci e miglioramento del terreno. Il metodo più popolare di migliorare il drenaggio attraverso l'intero spessore dello strato compressibile è di installarvi colonne drenanti verticali con un determinato interasse.

Negli anni '20 del secolo passato iniziò l'uso di colonne verticali di drenaggio costituite da sabbia molto permeabile.

Moram (1925, apud Bo and Choa, 2004) utilizzò dreni verticali di sabbia per stabilizzare il terreno melmoso di fondazione della rampa d'accesso orientale al ponte San Francisco – Baia di Oakland. Con riferimento a tempi più vicini, ovvero ai primissimi anni del 2000, si segnala l'uso di 1.200.000 dreni di sabbia verticali ($\Phi = 0.4$ m ed interasse < 2 m) nell'ampliamento del Kansai Airport nella baia di Osaka (Giappone), al fine di far avvenire in pochissimi anni il cedimento di m 18 previsto per le argille soffici in posto (*diluvial clays*).

Vantaggi in termini di costo, facilità di installazione e flessibilità fanno sì che, da qualche decennio, la maggior parte dei dreni verticali sia costituita da dreni in plastica prefabbricati, disponibili nel mercato, oggi, in circa 100 tipi.

Ciò premesso, installando tali dreni prefabbricati con uno schema, ad esempio, a maglie triangolari di lato s , il percorso equivalente di drenaggio, ovvero il diametro della zona di influenza del dreno, è dato da:

$$d_e = 1.05s$$

Da un punto di vista pratico e concettuale, l'installazione di dreni verticali rende meno importante la permeabilità nella direzione verticale. Inoltre, trattandosi nel caso in esame di argilla, la forma lamellare delle sue particelle dà luogo, nel processo di consolidazione, ad anisotropia tessiturale. Che si traduce in permeabilità ben maggiore in direzione orizzontale che in verticale. Il processo di drenaggio con un sistema di dreni verticali avviene per flusso orizzontale, onde è pertinente la considerazione del coefficiente di consolidazione orizzontale

c_h , il quale, essendo correlato alla permeabilità, supera in valore il suo omologo in direzione verticale c_v , rendendo lecito assumere, in prima approssimazione:

$$c_h = 2c_v = 2 \times 0.561 = 1.12$$

Adottando dreni verticali di tessuto non tessuto con interasse $s = 1.5$ m e di lunghezza a e spessore b pari, rispettivamente, a 94 mm ed a 2.6 mm, disposti in maglie triangolari, si ha:

$$d_e = 1.05s = 1.575 \text{ m}$$

$$d_w = \text{diametro equivalente del dreno} = \frac{[2(a+b)]}{\pi} = 62 \text{ mm}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} = 25.4$$

Il grado di consolidazione dovuto a flusso orizzontale è dato da:

$$U_h = 1 - e^{\left[\frac{-8T_h}{F(n)} \right]}$$

$$\text{in cui } F(n) \cong \ln(n) - 0.75 = 2.48$$

Il fattore di tempo di drenaggio orizzontale è:

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2} = \frac{1.12 \cdot t}{2.48} = 0.45t$$

da cui:

$$U_h = 1 - e^{\left[\frac{-8 \times 0.45t}{2.48} \right]} = 1 - e^{(-1.46t)}$$

Perché sia raggiunto un grado di consolidazione del 90%:

$$U_h = 0.9 \Rightarrow t = 1.57 \text{ anni}$$

Pur nella limitata validità di queste computazioni, prevalentemente basate su grande mole di assunzioni, vanno, tuttavia, evidenziati alcuni aspetti:

- Nel calcolo dei cedimenti, per semplicità non si è considerato il fenomeno della consolidazione secondaria. Che, in realtà, va invece tenuto in debito conto, in specie nelle situazioni di accelerazione del decorso dei cedimenti di consolidazione primaria con dreni verticali. Né si è considerato il modesto cedimento che subirà il piano di fondazione delle colmate.
- Una volta rimosso, a fine consolidazione, il precarico residuo ($\approx m^2$ di loppa granulare, corrispondente ad uno scarico tensionale di $2 \times 27.5 = 55 \text{ kPa}$) il cedimento dovuto all'azione dei contenitori (60 kPa) è, sostanzialmente, un processo di ricarica ed è, perciò, ridotto ad un livello accettabile.
- Essendo la loppa granulare altamente permeabile, a fine consolidazione il livello piezometrico dell'argilla stabilizzata coinciderà, grosso modo, col livello mare.

8. Alcune considerazioni conclusive.

- a) Quanto esposto nelle pagine precedenti in relazione a cedimenti e tempi di consolidazione, ha carattere unicamente metodologico, indicativo e di ordine di grandezza. Pertanto, se l'Autorità Portuale decidesse di utilizzare lo *slurry* in colmata, sarebbe perentoria la predisposizione di n. 2 aree – prova ottimamente strumentate e monitorate. Inoltre, sarebbe altamente consigliabile l'uso del metodo osservazionale nei calcoli di predizione e nella progettazione degli interventi.
- b) Non disponendo di dati di sorta, non si è fornita una qualche quantificazione della lunghezza temporale dei tempi di “fine – sedimentazione”. Né si è data considerazione ad un fenomeno di importanza fondamentale negli interramenti idraulici: quando l'argilla viene idraulicamente dragata e pompata in cassa di colmata, si verifica selezione granulometrica (classazione) prima della sedimentazione. La distribuzione granulometrica varia dallo sbocco del tubo allo sfioratore: le “particelle” di diametro maggiore sedimentano in prossimità dello sbocco del tubo, mentre le particelle colloidali viaggiano verso lo sfioratore, col risultato di rendere disomogeneo lo strato di rinterro. Pertanto, la classazione si traduce in disomogeneità spaziale dell'interramento e, se prevista e ben indagata, può essere di proficua utilizzazione.
- c) Se se ne esclude lo spessore superficiale rammollito, l'argilla da dragare è fortemente sovraconsolidata. La preconsolidazione è da attribuire sia ai fenomeni di essiccazione e capillarità posti in essere durante le quattro glaciazioni che si sono succedute nel Quaternario che alla percolazione, nel tempo geologico, di acque contenenti carbonato di calcio. Con riferimento, ad esempio, alla glaciazione temporalmente più vicina – la würmiana – si richiama all'attenzione che il livello mare di 15000 – 20000 anni orsono era di oltre m 100 inferiore all'attuale. Per quanto invece attiene alla percolazione di acque carbonatiche, è da ricordare che la sottostante piattaforma di calcari del Mesozoico è sede della falda profonda pugliese. Che, *in loco*, è artesiane, con evidenze rappresentate dai “citri”, dei quali quello di San Cataldo è (era) il più famoso. E che determina, secondo lo scrivente, una lentissima filtrazione verticale ascendente attraverso le argille di copertura. L'effetto nel tempo geologico della filtrazione di acque carbonatiche ha prodotto l'instaurarsi di legami interparticellari di cementazione carbonatica che rendono viepiù conto della rigidità e della resistenza di questa argilla il cui contenuto in carbonati è sempre $\geq 20\%$, onde l'aggettivo “marnose” che, di solito, le qualifica. Il tipo di dragaggio previsto è di tipo idraulico e

si avvale di getti d'acqua ad altissima pressione per disgregare l'argilla. Che viene successivamente aspirata ed accumulata per essere smaltita in acque profonde oppure immessa in condotta e convogliata in cassa di colmata. L'azione dei getti d'acqua disgrega l'argilla, distruggendone quasi del tutto la struttura e trasformandola in *slurry*. Per inciso, il termine struttura indica la combinazione di arrangiamento mutuo spaziale di particelle e gruppi di particelle (tessitura) e legami interparticellari (Mitchell, 1976). Questo processo di destrutturazione dei legami di cementazione è un fenomeno irreversibile. La successiva deposizione e sedimentazione in cassa di colmata dello *slurry* pone problemi di gestione di questo materiale che per peso proprio non può riacquisire che assai scarsa consistenza ed in tempi assai lunghi. Effetti migliori si hanno – come si mostra in questo rapporto – trattando con leganti e/o con sistemi di precarico e drenaggio lo *slurry*. Tali effetti non sono comparabili, però, con la condizione originaria di argilla dura, sviluppatasi in alcune centinaia di migliaia di anni. Sarebbe molto utile poter sostanzialmente evitare il processo di destrutturazione dell'argilla, esplorando la possibilità – tecnicamente possibile e del tutto innovativa – di considerare il fondale da dragare come una cava sottomarina da cui estrarre ciclopici blocchi rigidi da mettere a dimora nelle aree di colmata. Quando vengono estratti essi blocchi sono in suzione e mantengono una tensione efficace residua dell'ordine della tensione efficace orizzontale agente in situ. All'allungamento dei tempi di dragaggio e al relativo aumento dei costi, corrisponderebbe, d'altro canto, un utilizzo pressoché immediato degli interramenti realizzati.

d) Infine, qualche breve considerazione sui sedimenti contaminati.

Il contratto di ricerca, il cui esito è rappresentato da questo rapporto, aveva per oggetto “lo studio degli aspetti geotecnici del riutilizzo dei materiali argillosi, incontaminati, dragati nel porto di Taranto per la formazione di terrapieni e rilevati utili all'operatività portuale”. Orbene, in colmata possono trovare ottima dimora anche materiali argillosi contaminati, a meno di particolarissime limitate situazioni di estrema contaminazione. Per le quali, peraltro, si suggerisce l'uso della citata tecnica S/S, che consiste nello stabilizzare/solidificare con leganti cementizi la massa di fango argilloso contaminato, immobilizzando l'inquinante in esso contenuto e creando un materiale non lisciviabile. Ciò perché non è possibile alcuna significativa migrazione di inquinanti nell'ambito della massa di *slurry* riversato in colmata e consolidato in virtù dei fenomeni di superficie dei minerali argillosi, dei valori estremamente bassi ($\approx 10^{-8}$ cm/s) di permeabilità della massa argillosa e, infine, dell'assenza totale di gradienti idraulici di sorta. Ad esempio, considerando, comunque, un improbabile

gradiente idraulico $i = 1$ (che è un valore assai elevato), ed un campo di moto di filtrazione posto in essere da tale ipotetico gradiente, una particella d'acqua (e di contaminante) percorrerebbe in un anno una distanza di 0.31 cm. Per questi motivi, si fanno proprie le considerazioni del Prof. Cotecchia (2005) sulla completa inutilità di una impermeabilizzazione (con teli HDPE del fondo) della vasca di contenimento dei fanghi di dragaggio con particolari concentrazioni di inquinanti, al fine di impedire la migrazione lungo la verticale degli inquinanti medesimi. Per gli stessi motivi, si ritiene altresì del tutto inutile anche il manto impermeabile laterale posto a protezione dell'argine della suddetta vasca.

Da ultimo, in relazione all'opzione di sversamento dello *slurry* in mare, laddove esso è profondo oltre m 800 come nello specchio acqueo all'uopo individuato da ISPRA, tale opzione può essere adottata anche per *slurry* contaminati, gli effetti di diluizione essendo tali da rendere praticamente prive di nocimento anche assai significative concentrazioni iniziali di inquinanti. Ciò in ossequio al principio di Paracelso: "E' la dose che fa il veleno".

Bibliografia

- Autorità Portuale di Taranto** (2004): Prove di laboratorio ai fini della caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni pertinenti alla vasca di contenimento e alle opere previste.
- Babasaki R., Terashi M., Suzuki T., Maekawa A., Kawamura M. and Fukazawa E.** (1996): Factors influencing the strength of improved soil. Proc. Int. Conf. on Soil Improvement Geosystems, IS – Tokyo '96, Tokyo, vol. 2, pp. 913-918.
- Been K. and Sills G. C.** (1981): Self-weight consolidation of soft soils. Géotechnique, vol. 31, n. 4, pp. 519-535.
- Bergado D. T., Taechakumthorn C., Lorenzo G. A. and Abul-Naga H. M.** (2006): Stress-deformation behaviour under anisotropic drained triaxial consolidation of cement-treated Bangkok clay. Soils and Foundations, vol. 46, n. 5, pp. 629-637.
- Bo M. W. and Choa V.** (2004): Reclamation and ground improvement. Thomson Learning, Singapore.
- Bowen D. Q. C.** (1978): Quaternary Geology: A framework for multidisciplinary work. Pergamon Press, Oxford.
- Broms B. B.** (2004): Lime and lime-cement columns. In: Ground Improvement (Moseley M. P. and Kirsch K. eds.), Taylor & Francis, London, pp. 253-330.
- Burgos M., Samper F. and Alonso J. J.** (2007): Improvements carried out in very soft dredged mud soil in the port of Valencia (Spain). Proc. 14th European Conf. SMGE, Madrid, vol. 4, pp. 2091-2103.
- Butterfield R.** (1979): A natural compression law for soils. Géotechnique, vol. 40, n. 3, pp. 469-480.
- Chiu C. F., Zhu W. And Zhang C. L.** (2008): Yelding and shear behaviour of cement-treated dredged materials. Engineering Geology, vol. 103, pp. 1-12.
- Cotecchia V.** (2005): Realizzazione di una vasca di contenimento per fondali di dragaggio in una zona compresa tra il molo Ovest e Punta Rondinella nel Porto di Taranto – Relazione geologica e geotecnica. Autorità Portuale di Taranto.
- Gibson R. E.** (1974): The analytical method in soil mechanics. Géotechnique, vol. 24, n. 2, pp. 115-139.
- Gibson R. E., Schiffman R. L. and Cargill K. W.** (1981): the theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II: Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers. Can. Geotech. J., vol. 18, n.2, pp. 280-293.

- Hawlder B. C., Muhunthan B. and Imai G.** (2008): State-dependent constitutive model and numerical solution of self-weight consolidation. Géotechnique, vol. 58, n. 2, pp.133-141.
- Holtz R. D., Jamiolkowski M., Lancellotta R. and Pedroni S.** (1991): Prefabricated vertical drains. Design and performance. CIRIA, Butterworth – Heinemann, London.
- Holtz R. D., Shang J. Q. and Bergado D. T.** (2000): Soil improvement. In: Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook (Rowe R. K. ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 429-462.
- Kiyama M., Oshima A., Kusakabe F. and Harada K.** (2000): The “New Accelerated Method” combining the dewatering and plastic-board-drain by floating system (PDF) method. Geotechnical Special Publication n. 112, ASCE, pp. 246-258.
- Kramer S. and Holtz R. D.** (1991): Soil improvement and foundation remediation with emphasis in seismic hazards. Report, University of Washington, Seattle, 106 p.
- Krizek R. J., Somogyi F.** (1984): Perspectives on modelling consolidation of dredged materials. Proc. Symp. on Sedimentation Consolidation Models, ASCE, San Francisco, pp. 296-332.
- Imai G.** (1981): Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials. Soils and Foundations, vol. 21, n. 1, pp. 7-20.
- Lancellotta R.** (2004): Geotecnica. Zanichelli, Bologna.
- Lee S. L., Karunarotne G. P., Yong K. Y., Tan S. A., Tan S. T. and Vijiaratnam A.** (1990): Development in land reclamation. Proc. of the 1990 Convention of the Institution of Engineers, Singapore, pp. 13-20.
- Mastronuzzi G., Palmentola G. e Sansò P.** (1999): La storia geologica. In: Le isole Cheradi (a cura di Mastronuzzi G. e Marzo P.), Fondazione Ammiraglio Michelagnoli – Taranto, pp. 31-41.
- Mitchell J. K.** (1976): Fundamentals of soil behaviour. John Wiley & Sons, New York.
- Mitchell J. K.** (1981): Soil improvement – State of the art report. Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, vol. 4, pp. 509-565.
- Nagaraj T. S. and Miura N.** (2001): Soft clay behaviour. Balkema, Rotterdam.
- Powrie W.** (2004): Soil mechanics. Spon Press, London.
- SGS – SELC** (2009): Caratterizzazione geotecnica dei sedimenti della darsena Capitaneria di Porto a Taranto. Rapporto G148/RT3/Finale.
- Sills G. C.** (1995): Time dependent processes in soil consolidation. Proc. Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima '95, pp. 875-890.

- Smith J.** (2005): Soil stabilization. History lesson. Ground Engineering – Ground Improvement Supplement, January, pp. IX-XI.
- Stark T. D., Choi H. and Schroeder P. R.** (2005a): Settlement of dredged and contaminated material placement areas. I: Theory and use of primary consolidation, secondary compression and desiccation of dredged fill. J. Water. Port Coastal Ocean Engrg, vol.131, n. 2, pp. 43-51.
- Stark T. D., Choi H. and Schroeder P. R.** (2005b): Settlement of dredged and contaminated material placement areas. II: Primary consolidation, secondary compression and desiccation of dredged fill input parameters. J. Water. Port Coastal Ocean Engrg, vol. 131, n. 2, pp. 52-61.
- Taylor D. W.** (1948): Fundamentals of soil mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- Tomasicchio G. R.** (2009): Rapporto di ricerca sugli aspetti marittimi delle attività di dragaggio nel Porto di Taranto. Autorità Portuale di Taranto.
- Topolnicki M.** (2004) : In situ soil mixing. In : Ground Improvement (Moseley M. P. and Kirsch K. eds), Taylor & Francis, London, pp. 331-428.
- Tsuchida T. and Gongo M.** (1995): Unified model of $e - \log p$ relationship with consideration of the effect of initial void ratio. Proc. Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, Hiroshima, vol. 1, pp. 379 – 384.
- Van Impe W. F.** (1989): Soil improvement techniques and their evolution. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Wheeler P.** (2004): Into the limelight. Ground Engineering, May, pp. 18-20.
- Woo S. M. and Moh Z. C.** (1972): Lime stabilization of selected lateritic soils. Proc. 3rd Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, pp. 369-375.

APPENDICE A

**Risultati delle prove di laboratorio sulle argille dei fondali del Porto
(da Autorità Portuale di Taranto (2004); SGS – SELC, 2009)**

Sondaggio	Quota bocca - foro sul l.m.	Profondità di prelievo a partire dal bocca - foro	Contenuto d'acqua	Peso dell'unità di volume γ [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume del terreno secco γ_d [g/cm ³]	Peso Specifico della fase solida G_s	Indice dei Vuoti e	Porosità n [%]	S [%]	Frazione Sabbiosa	Frazione Limosa	Frazione Argillosa	Limite Liquido w_L [%]	Limite Plastico w_P [%]	Indice Plastico PI [%]	Limite di Ritiro w_s [%]	IC	Attività A	Angolo d'attrito ϕ [°]	c' [kPa]	Carbonati	Sostanze Organiche
N°	[m]	[m]	w [%]	γ [g/cm ³]	γ_d [g/cm ³]	G_s	e	n [%]	S [%]	[%]	[%]	[%]	w_L [%]	w_P [%]	PI [%]	w_s [%]	IC	A	ϕ [°]	c' [kPa]	[%]	[%]

S1	-4,80	1,50 ÷ 1,95	30,55	1,95	1,49	2,74	0,839	45,61	99,96	23,01	39,11	37,89	57	38	19	19	1,398	0,497	no	no	23,28	0,99
S1	-4,80	4,40 ÷ 4,80	23,44	2,03	1,64	2,67	0,626	38,51	99,96	41,04	31,75	27,21	39	22	17	15	0,929	0,629	32,00	23,52	26,67	0,94
S1	-4,80	7,45 ÷ 7,85	25,68	1,99	1,58	2,67	0,685	40,65	99,92	21,99	37,02	40,99	53	25	28	16	0,965	0,685	30,00	19,60	26,51	0,66
S1	-4,80	13,00 ÷ 13,55	25,06	1,99	1,59	2,64	0,664	39,89	99,8	20,81	37,30	41,88	55	26	29	14	1,015	0,696	28,00	19,60	25,85	0,86
S1	-4,80	19,00 ÷ 19,55	22,10	2,06	1,69	2,70	0,601	37,52	99,31	31,63	33,23	35,14	46	22	24	15	0,980	0,686	23,00	8,82	26,79	1,09
S2	-3,90	1,40 ÷ 1,80	24,50	1,99	1,60	2,68	0,673	40,22	97,43	22,28	42,05	35,67	49	23	26	15	0,930	0,724	no	no	23,77	1,15
S2	-3,90	4,00 ÷ 4,50	24,99	2,00	1,60	2,69	0,679	40,43	98,99	29,04	36,82	34,14	46	22	24	18	0,885	0,686	30,00	28,42	26,06	1,00
S2	-3,90	7,50 ÷ 8,00	22,93	2,03	1,65	2,68	0,620	38,25	99,03	41,51	31,24	27,25	43	20	23	16	0,888	0,837	28,00	26,46	26,04	1,93
S2	-3,90	13,50 ÷ 14,00	24,45	2,00	1,61	2,68	0,664	39,89	98,62	35,81	32,75	31,44	46	21	25	15	0,851	0,787	24,00	3,92	19,72	0,88
S2	-3,90	18,40 ÷ 18,90	23,90	2,00	1,62	2,68	0,659	39,72	97,27	27,60	36,20	36,20	44	21	23	15	0,864	0,654	24,00	9,80	21,86	1,40
S2	-3,90	24,50 ÷ 25,00	23,99	2,00	1,62	2,68	0,656	39,63	97,89	28,44	37,08	34,48	46	21	25	16	0,897	0,719	19,00	0,00	26,99	1,42
S2	-3,90	29,00 ÷ 29,50	25,14	2,00	1,60	2,68	0,674	40,27	99,78	36,70	30,30	33,00	51	22	29	17	0,902	0,858	27,00	0,00	22,39	1,09
S3	-3,00	1,20 ÷ 1,70	26,03	1,98	1,58	2,67	0,696	41,04	99,89	22,46	31,02	46,53	69	26	43	17	1,011	0,905	no	no	25,35	1,32
S3	-3,00	4,20 ÷ 4,65	23,55	2,02	1,63	2,67	0,636	38,89	98,99	30,37	38,68	30,95	45	20	25	16	0,866	0,794	27,00	14,70	21,97	2,11
S3	-3,00	7,70 ÷ 8,20	26,43	1,99	1,57	2,70	0,714	41,67	99,84	27,60	39,19	33,21	47	22	25	17	0,817	0,758	30,00	15,68	23,80	1,81
S3	-3,00	13,00 ÷ 13,60	26,42	2,00	1,58	2,73	0,723	41,96	99,69	20,12	38,04	41,84	55	26	29	20	0,978	0,694	24,00	4,90	23,28	1,46
S3	-3,00	19,00 ÷ 19,55	26,17	2,00	1,58	2,71	0,712	41,57	99,61	21,80	34,51	43,69	54	26	28	23	1,011	0,628	22,00	0,00	28,27	1,54
S4	-3,60	1,00 ÷ 1,50	26,49	1,99	1,58	2,70	0,717	41,77	99,90	28,34	31,10	40,56	60	23	27	19	0,917	0,898	no	no	25,27	1,80
S4	-3,60	4,00 ÷ 4,50	22,80	2,01	1,64	2,67	0,627	38,54	97,06	24,83	39,34	35,83	46	20	26	22	0,883	0,729	25,00	71,55	22,55	1,62
S4	-3,60	7,00 ÷ 7,50	23,22	1,99	1,62	2,66	0,642	39,10	96,11	25,34	39,40	35,26	51	21	30	22	0,931	0,845	29,00	31,36	24,44	1,37
S4	-3,60	13,00 ÷ 13,50	26,28	2,00	1,58	2,71	0,712	41,59	99,98	21,51	36,12	42,37	54	23	31	20	0,890	0,734	25,00	1,96	22,43	1,16
S4	-3,60	19,00 ÷ 19,40	24,68	2,00	1,60	2,68	0,673	40,24	98,29	16,18	38,23	45,59	59	25	34	16	1,010	0,754	21,00	5,88	25,01	1,58
S4	-3,60	24,00 ÷ 24,40	25,13	2,01	1,60	2,69	0,681	40,52	99,37	15,19	32,73	52,08	67	31	36	19	1,163	0,693	18,00	5,88	27,84	1,76
S4	-3,60	29,00 ÷ 29,40	27,43	1,99	1,56	2,74	0,751	42,90	99,87	14,74	40,78	44,48	76	40	36	18	1,367	0,791	17,80	1,96	23,31	1,30
S5	-2,70	1,00 ÷ 1,40	28,97	1,96	1,51	2,75	0,832	45,15	100,00	5,30	50,20	44,20	62	27	35	no	0,900	0,800	no	no	27,50	1,20
S5	-2,70	4,00 ÷ 4,55	29,99	1,96	1,50	2,74	0,820	45,06	100,00	6,30	48,10	45,60	62	22	40	no	0,900	0,870	16,44	26,46	24,50	0,50
S5	-2,70	7,00 ÷ 7,40	24,59	2,04	1,64	2,74	0,671	40,14	100,00	6,10	62,30	31,60	42	21	21	no	0,850	0,800	51,46	83,31	27,90	0,50
S5	-2,70	13,00 ÷ 13,50	23,13	2,06	1,68	2,73	0,631	38,7	100,00	7,50	58,60	33,80	46	21	25	no	0,900	0,760	17,89	53,91	28,60	1,20
S5	-2,70	17,50 ÷ 18,00	24,00	2,05	1,65	2,73	0,655	39,56	100,00	6,30	53,60	40,10	52	23	29	no	0,970	0,730	32,49	47,04	22,70	1,50
S6	-1,00	1,00 ÷ 1,60	25,12	2,00	1,60	2,67	0,672	40,21	99,87	11,10	40,81	48,10	67	30	37	17	1,136	0,767	no	no	22,70	0,66
S6	-1,00	5,00 ÷ 5,60	27,55	1,99	2,56	2,74	0,753	42,95	100,00	6,20	56,30	37,50	53	24	29	no	0,880	0,780	43,28	18,62	27,00	2,00
S6	-1,00	8,00 ÷ 8,60	25,47	2,00	1,59	2,70	0,693	40,92	99,30	18,76	42,39	38,86	53	24	29	17	0,953	0,754	28,00	32,34	25,22	1,39
S6	-1,00	14,00 ÷ 14,60	24,1	2,05	1,65	2,73	0,653	39,50	100,00	9,00	57,90	33,10	51	21	30	no	0,890	0,930	10,60	126,43	28,30	0,80
S6	-1,00	19,00 ÷ 19,50	25,64	2,00	1,59	2,71	0,696	41,04	99,70	17,69	39,76	42,55	57	24	33	15	0,966	0,769	22,00	0,00	22,85	1,16

Sondaggio	Quota bocca - foro sul l.m.	Profondità di prelievo a partire dal bocca - foro	Contenuto d'acqua	γ [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume	γ_d [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume del terreno secco	Peso Specifico della fase solida	Indice dei Vuoti	Porosità	S [%]	Frazione Sabbiosa	Frazione Limosa	Frazione Argillosa	Limite Liquido	Limite Plastico	Indice Plastico	Limite di Ritiro	Indice di Consistenza	Attività	Angolo d'attrito	c' [kPa]	Carbonati	Sostanze Organiche
N°	[m]	[m]	w [%]	γ [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume	γ_d [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume del terreno secco	Gs	e	n [%]	S [%]	Frazione Sabbiosa	Frazione Limosa	Frazione Argillosa	wL [%]	WP [%]	PI [%]	ws [%]	IC	A	ϕ [°]	c' [kPa]	Carbonati	Sostanze Organiche

S7	-1,90	1,10 ÷ 1,60	25,49	2,00	1,59	2,68	0,686	40,68	99,70	26,92	40,05	33,02	49	21	28	16	0,848	0,845	no	no	no	no	25,75	2,39
S7	-1,90	4,00 ÷ 4,50	23,69	2,05	2,05	2,74	0,647	39,28	100,00	5,70	62,80	31,50	44	27	17	no	1,220	0,530	27,09	66,65	27,09	66,65	26,50	0,90
S7	-1,90	7,60 ÷ 8,10	24,77	2,00	1,60	2,69	0,679	40,45	98,30	25,96	39,93	34,12	52	23	29	15	0,936	0,854	28,00	33,32	28,00	33,32	26,51	1,25
S7	-1,90	12,70 ÷ 13,10	26,26	2,01	1,59	1,59	0,714	41,67	100,00	6,80	55,20	38,00	50	22	28	no	0,860	0,730	39,56	18,62	39,56	18,62	25,10	0,90
S7	-1,90	19,00 ÷ 19,50	25,68	2,00	1,59	2,70	0,694	40,97	99,80	14,24	35,92	49,85	65	31	34	19	1,175	0,666	19,00	2,94	19,00	2,94	21,43	1,34
S8	-3,30	1,40 ÷ 1,90	24,45	2,04	1,64	1,64	0,669	40,07	100,00	5,20	59,00	35,90	45	21	24	no	0,860	0,680	no	no	no	no	27,10	1,30
S8	-3,30	4,50 ÷ 4,90	21,46	2,09	1,72	2,72	0,585	36,92	99,87	10,60	64,90	24,50	41	20	21	no	0,910	0,880	56,95	212,68	56,95	212,68	27,30	1,00
S8	-3,30	7,80 ÷ 8,30	19,88	2,12	1,77	2,73	0,545	35,28	100,00	7,30	62,60	30,10	39	19	20	no	0,930	0,670	31,02	70,57	31,02	70,57	24,70	0,30
S8	-3,30	13,10 ÷ 13,60	21,64	2,05	1,69	2,73	0,619	38,23	95,42	18,79	39,91	41,13	57	28	29	16	1,203	0,711	24,00	0,98	24,00	0,98	23,59	1,43
S8	-3,30	19,10 ÷ 19,60	22,05	2,08	1,71	2,74	0,603	37,61	100,00	7,60	57,40	35,00	44	20	24	no	0,910	0,690	28,72	86,25	28,72	86,25	27,80	0,70
S9	-3,50	2,00 ÷ 2,50	22,49	2,05	1,68	2,73	0,627	38,54	97,80	29,44	35,64	34,93	52	27	25	15	1,180	0,726	no	no	no	no	28,08	0,76
S9	-3,50	5,00 ÷ 5,50	23,07	2,06	1,67	2,73	0,628	38,57	100,00	5,80	62,70	31,50	41	19	22	no	0,810	0,690	26,07	60,77	26,07	60,77	26,90	0,30
S9	-3,50	7,60 ÷ 8,10	25,19	2,01	1,6	2,69	0,629	40,45	99,80	23,92	37,68	38,40	52	28	24	15	1,108	0,630	24,00	26,46	24,00	26,46	24,56	1,01
S9	-3,50	13,50 ÷ 14,00	22,76	2,03	1,66	2,67	0,609	37,87	99,65	17,16	43,53	39,32	56	33	23	21	1,460	0,577	23,00	1,96	23,00	1,96	22,65	1,20
S9	-3,50	19,00 ÷ 19,50	26,04	2,01	1,6	2,76	0,730	42,19	98,60	16,32	34,20	49,48	72	38	34	29	1,341	0,700	16,00	19,60	16,00	19,60	21,50	1,51
S10	-2,20	1,55 ÷ 2,10	23,74	2,02	1,64	2,68	0,640	39,01	99,60	29,74	37,24	33,02	43	24	19	22	0,997	0,582	no	no	no	no	26,16	1,66
S10	-2,20	4,20 ÷ 4,65	25,72	2,02	1,61	2,74	0,708	41,44	99,60	15,78	45,17	39,05	50	26	24	18	1,002	0,633	19,00	0,00	19,00	0,00	26,54	1,22
S10	-2,20	7,50 ÷ 8,00	20,30	2,05	1,70	2,67	0,568	36,24	95,41	34,22	33,27	32,51	41	22	19	16	1,116	0,559	10,00	45,08	10,00	45,08	23,51	1,69
S10	-2,20	13,00 ÷ 13,50	26,60	1,97	1,56	2,67	0,714	41,67	99,56	19,80	35,56	44,64	57	26	31	21	0,977	0,695	23,00	0,98	23,00	0,98	25,83	1,43
S10	-2,20	19,00 ÷ 19,55	26,67	1,99	1,57	2,70	0,721	41,91	99,95	20,61	33,80	45,59	59	30	29	20	1,121	0,633	16,80	5,88	16,80	5,88	20,99	1,17
S11	-3,00	1,60 ÷ 2,10	25,39	1,99	1,59	2,68	0,689	40,78	98,78	34,15	32,18	33,67	45	23	22	21	0,893	0,657	no	no	no	no	25,76	1,39
S11	-3,00	4,70 ÷ 5,15	22,55	2,03	1,66	2,69	0,623	38,40	97,33	43,10	28,06	28,84	40	21	19	19	0,934	0,662	20,00	0,98	20,00	0,98	21,97	1,57
S11	-3,00	8,30 ÷ 8,80	27,58	1,98	1,55	2,71	0,750	42,87	99,65	27,07	29,17	43,76	54	28	26	21	1,019	0,559	17,00	5,88	17,00	5,88	24,56	1,81
S11	-3,00	13,00 ÷ 13,55	27,35	1,98	1,55	2,70	0,743	42,62	99,61	19,61	34,45	45,94	55	24	31	21	0,906	0,666	13,00	37,24	13,00	37,24	20,13	0,93
S11	-3,00	19,00 ÷ 19,55	29,53	1,94	1,50	2,69	0,795	44,29	99,97	14,83	36,28	48,89	63	35	28	25	1,196	0,578	11,00	18,62	11,00	18,62	24,46	1,25
S12	0,00	4,50 ÷ 5,00	28,16	1,96	1,53	2,69	0,759	43,15	99,99	26,17	39,87	33,96	45	23	22	20	0,763	0,648	no	no	no	no	21,16	1,39
S12	0,00	8,30 ÷ 8,95	21,48	2,05	1,68	2,72	0,614	38,02	95,14	43,44	30,16	26,39	37	20	17	18	0,922	0,655	17,00	4,90	17,00	4,90	21,12	1,27
S12	0,00	12,80 ÷ 13,40	21,30	2,07	1,70	2,69	0,578	36,63	99,05	34,96	32,91	32,13	40	20	20	18	0,947	0,612	25,00	0,00	25,00	0,00	22,40	1,52
S12	0,00	15,00 ÷ 15,45	25,72	2,00	1,59	2,70	0,699	41,13	99,33	20,98	34,43	44,60	51	29	22	17	1,131	0,494	24,00	32,34	24,00	32,34	19,84	1,23
S12	0,00	18,50 ÷ 19,00	27,05	1,98	1,56	2,69	0,730	42,19	99,80	21,64	30,56	47,80	54	27	27	15	0,990	0,576	17,00	0,00	17,00	0,00	22,59	1,29
S13	0,00	5,00 ÷ 5,50	26,10	2,00	1,58	2,71	0,709	41,50	99,57	24,99	37,11	37,90	45	24	21	18	0,904	0,550	no	no	no	no	20,37	2,19
S13	0,00	8,70 ÷ 9,20	25,02	2,02	1,61	2,71	0,677	40,38	99,93	19,12	38,51	42,37	52	26	26	16	1,042	0,610	16,00	16,66	16,00	16,66	24,56	1,01
S13	0,00	12,60 ÷ 13,10	21,80	2,05	1,68	2,68	0,589	37,08	99,04	12,51	44,11	43,38	56	26	30	16	1,151	0,688	22,00	13,72	22,00	13,72	22,56	1,26
S13	0,00	16,00 ÷ 16,50	26,45	1,98	1,57	2,69	0,713	41,63	99,59	17,96	36,38	45,66	56	23	33	20	0,895	0,722	14,00	0,00	14,00	0,00	21,91	0,99

Sondaggio	Quota bocca - foro sul l.m.	Profondità di prelievo a partire dal bocca - foro	Contenuto d'acqua	γ [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume	γ_d [g/cm ³]	Peso dell'unità di volume del terreno secco	Gs	Indice dei Vuoti	Porosità	S [%]	Grado di Saturazione	Frazione Sabbiosa	Frazione Limosa	Frazione Argillosa	Limite Liquido	Limite Plastico	PI [%]	Ws [%]	Indice di Consistenza	Attività	Angolo d'attrito	c' [kPa]	Carbonati	Sostanze Organiche
N°	[m]	[m]	w [%]	γ [g/cm ³]	γ [g/cm ³]	γ_d [g/cm ³]	volume del terreno secco		e	n [%]	S [%]		Frazione Sabbiosa	Frazione Limosa	Frazione Argillosa	WL [%]	WP [%]	PI [%]	ws [%]	IC	A	ϕ [°]	c' [kPa]	[%]	[%]

S13	0,00	19,00 ÷ 19,55	25,58	1,99	1,59	2,69	0,695	41,01	99,01	11,46	36,18	52,35	62	31	31	26	1,187	0,592	16,00	1,96	22,32	1,37		
S14	-1,20	1,20 ÷ 1,70	23,72	2,02	1,64	2,68	0,638	38,96	99,58	24,79	39,86	35,35	44	22	22	20	0,947	0,621	no	no	22,26	1,62		
S14	-1,20	5,00 ÷ 5,40	20,30	2,02	1,68	2,71	0,615	38,06	89,57	36,40	32,17	31,44	44	21	23	16	1,039	0,730	16,00	13,72	22,56	1,26		
S14	-1,20	8,70 ÷ 9,25	21,38	2,06	1,70	2,67	0,576	36,55	99,19	45,20	29,23	25,57	45	23	22	19	1,065	0,857	18,00	4,90	21,12	1,27		
S14	-1,20	13,00 ÷ 13,50	21,33	2,05	1,69	2,70	0,599	37,46	96,23	38,06	31,34	30,60	47	21	26	18	0,991	0,845	26,00	13,72	23,28	1,50		
S14	-1,20	18,50 ÷ 19,00	26,93	1,98	1,56	2,70	0,730	42,20	99,44	25,92	28,89	45,19	52	22	30	16	0,825	0,663	18,00	5,88	21,69	0,87		
G1A	-1,10	6,10 ÷ 6,55	19,26	1,99		2,72				11,63	66,68	21,69	40	30	10		2,074	0,461	25	45,00	22,90	2,07		
G1B	-1,60	7,80 ÷ 8,25	19,00	2,05		2,69				4,94	65,33	29,73	38	29	9		2,111	0,303	17	45,00	23,60	2,20		
G1C	-1,80	11,30 ÷ 11,95	23,32	2,03		2,68				5,03	66,23	28,74	41	27	14		1,263	0,487	18	21,00	23,50	2,41		
G1D	-1,50	15,75 ÷ 16,18	20,43	2,00		2,68				10,22	64,58	25,20	55	32	23		1,503	0,913	8	110,00	24,90	2,09		
G1F	-1,60	21,9 ÷ 22,4	26,38	2,00		2,67				8,01	66,94	25,05	51	30	21		1,172	0,838	14	90,00	24,10	1,22		
G1H	-1,87	27,43 ÷ 27,86	20,86	1,98		2,69				8,77	65,08	26,15	46	30	16		1,571	0,612	17	34,00	25,10	1,95		
G2A	-2,20	4,00 ÷ 4,30	17,66	2,01		2,66				3,46	63,56	32,98	43	27	16		1,584	0,485	19	29,00	22,50	2,64		
G2C	-2,20	9,20 ÷ 9,70	25,40	2,03		2,65				7,48	57,73	34,79	47	27	20		1,080	0,575	17	48,00	20,70	2,64		
G2D	-2,20	10,60 ÷ 11,00	17,22	2,07		2,69				7,10	60,83	32,07	54	25	29		1,268	0,904	18	48,00	21,20	1,47		
G2E	-2,20	12,00 ÷ 12,45	25,68	2,07		2,66				5,02	60,56	34,42	45	38	7		2,760	0,203	13	41,00	21,00	3,03		
G2G	-2,00	15,4 ÷ 16,00	22,19	2,04		2,66				3,07	58,08	38,85	42	7	35		0,566	0,901	17	111,00	21,20	2,28		
G3A	-4,70	5,20 ÷ 5,60	19,02	2,03		2,65				3,45	54,72	41,83	41	23	18		1,221	0,430	22	30,00	21,70	2,49		
G3C	-5,10	8,30 ÷ 8,90	19,88	2,04		2,65				4,50	54,69	40,81	37	29	8		2,140	0,196	20	45,00	21,90	3,35		
G3E	-5,10	12,00 ÷ 12,45	26,00	2,03		2,66				7,71	76,62	19,67	37	30	7		1,571	0,356	20	35,00	23,70	2,68		
G3F	-5,10	15,00 ÷ 15,45	23,95	1,95		2,62				3,10	64,30	32,60	49	27	22		1,139	0,675	12	120,00	23,50	1,41		
G3G	-5,10	17,8 ÷ 18,2	26,07	1,94		2,61				4,17	59,82	36,01	52	28	24		1,080	0,666	13	124,00	24,20	3,26		

Mescolamento del terreno in situ.

La tecnologia del mescolamento del terreno (SM, soil mixing) in situ per migliorare le proprietà meccaniche ed ambientali di terreni molli o contaminati può essere suddivisa in due metodi generali: Metodo di Mescolamento Profondo (Deep Mixing Method, DMM) e Metodo di Mescolamento Superficiale (Shallow Mixing Method, SMM).

Sia DMM che SMM comprendono una varietà di sistemi brevettati (Fig. B1).

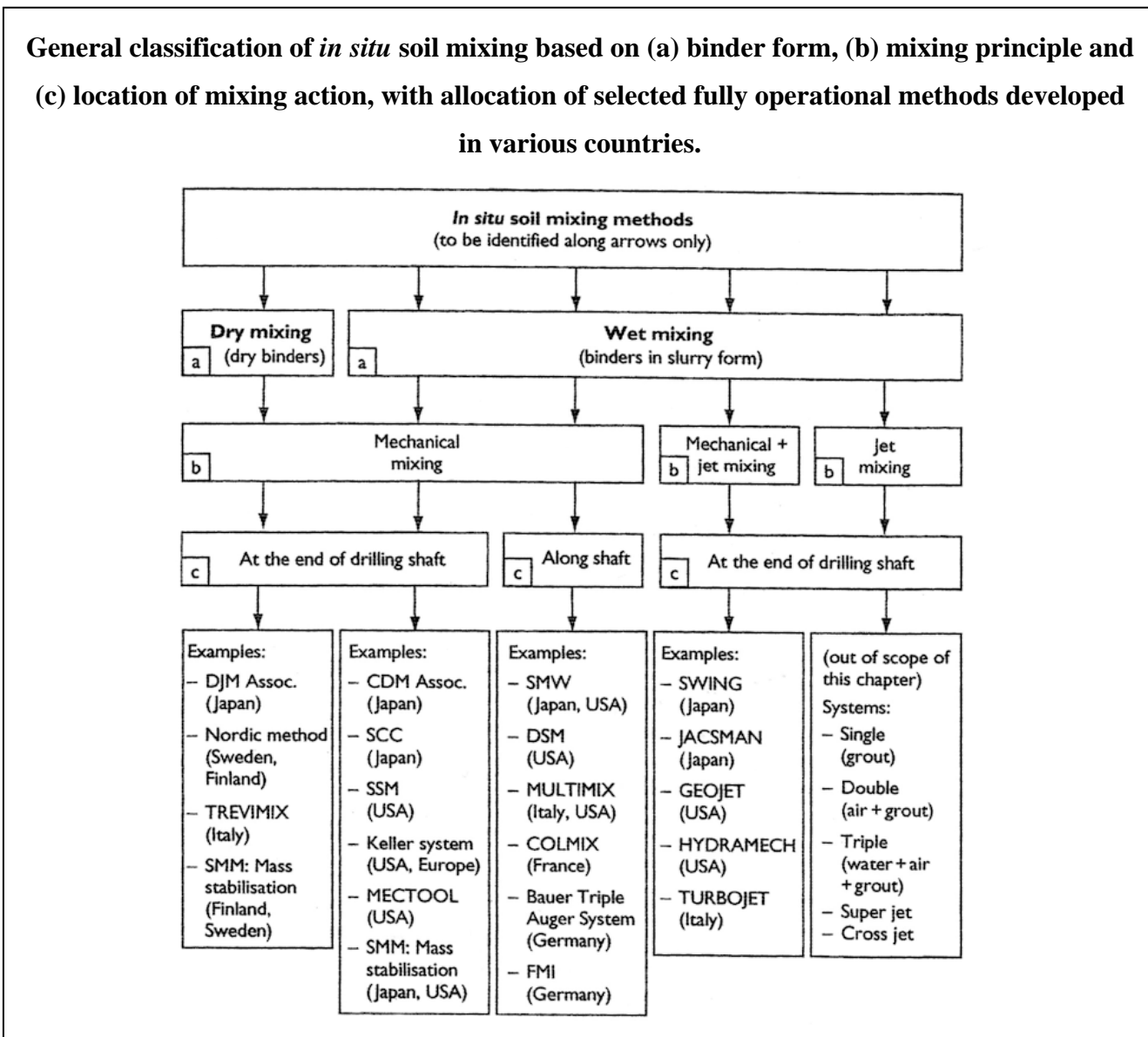


Fig. B1: Metodi di mescolamento in situ del terreno (da Topolnicki, 2004).

Il più di frequente usato e meglio sviluppato Metodo di Mescolamento Profondo (DMM) viene applicato per stabilizzare il terreno in colonne discrete sino ad almeno 3 m di profondità, con un limite, all'attualità, pari a circa 50 m.

I leganti sono iniettati nel terreno allo stato secco o sotto forma di *slurry* attraverso aste cave di mescolamento rotanti e con alla punta vari attrezzi di taglio.

Le aste sono munite anche di elementi elicoidali discontinui e pale laterali per aumentare l'efficienza del processo di mescolamento. In alcuni metodi, il mescolamento meccanico è migliorato dalla iniezione simultanea – ad alta velocità – di miscele fluide attraverso ugelli sugli elementi di mescolamento o di taglio (Fig. B2).

Selected mixing tools of the Nordic method: a) SD 600 mm; b) modified SD 600 mm; c) PB3 600 mm; d) peat bore 800 mm (courtesy of LCM). Note: changed location of binder outflow hole in relation to the horizontal mixing blade in standard (a) and modified (b) tool.

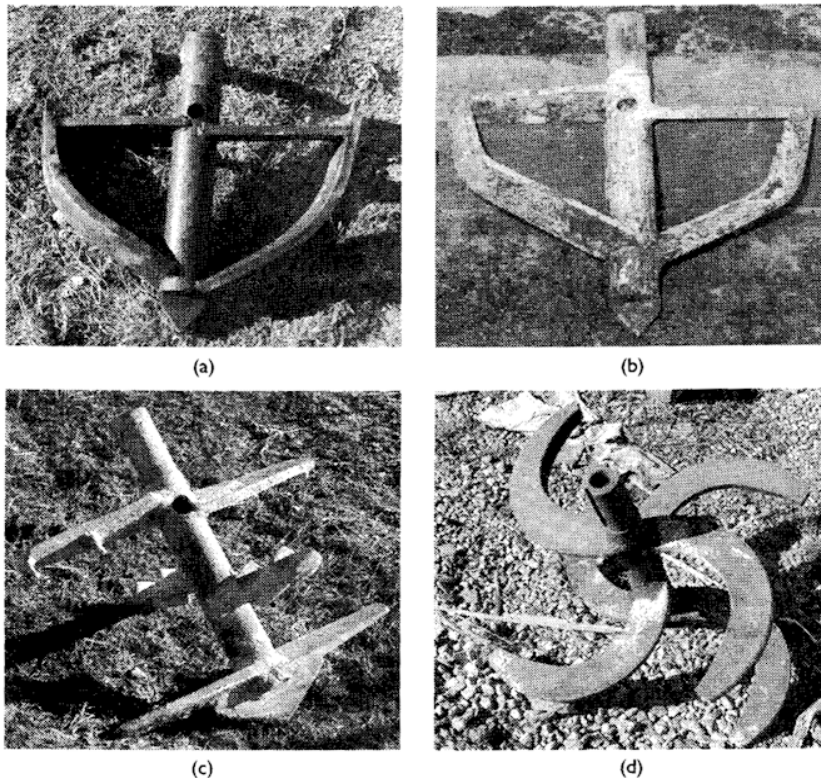


Fig. B2: Utensili di mescolamento (da Topolnicki, 2004).

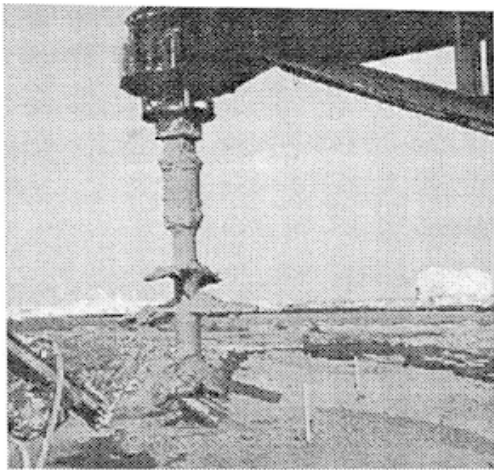
Il complementare Metodo di Mescolamento Superficiale (SMM) è stato sviluppato specialmente per ridurre i costi del miglioramento di terreni superficiali sciolti o molli ricoprenti vaste aree, tra cui,

anche, sedimenti dragati depositati sulla terraferma e terreni organici umidi di alcuni metri di spessore.

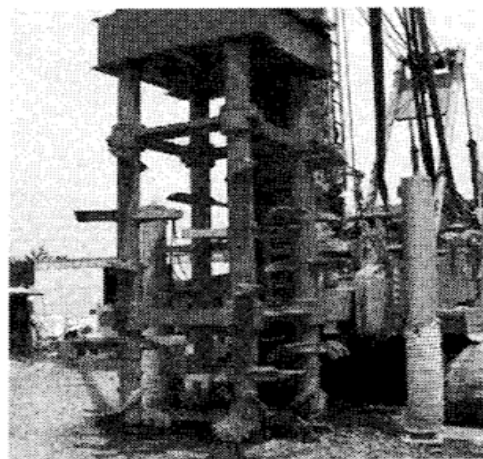
Questo tipo di mescolamento di terreno è spesso denotato come “stabilizzazione di massa”. Che può ottenersi anche realizzando colonne verticali compenetrantesi.

La sua convenienza economica è maggiore se vengono usate trivelle di mescolamento di grande diametro o sistemi ad aste multiple (Fig. B3).

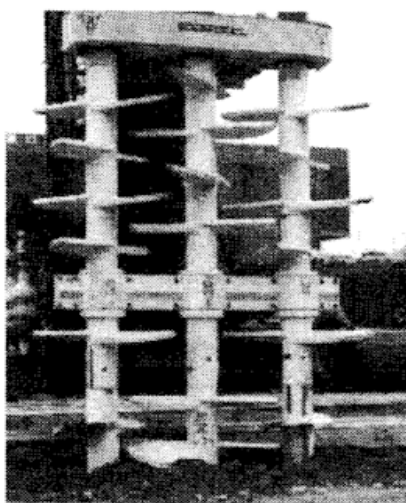
Multiple shaft mixing tools: (a) single axis mixing tool diameter 2,1 m; (b) standard CDM 2x1.0 m (CDM Association, 2002); (c) CDM Land4 4x1.0 m (CDM Association,2002); (d) SMW mixing paddles 3x1.5 m (R. Jakiel).



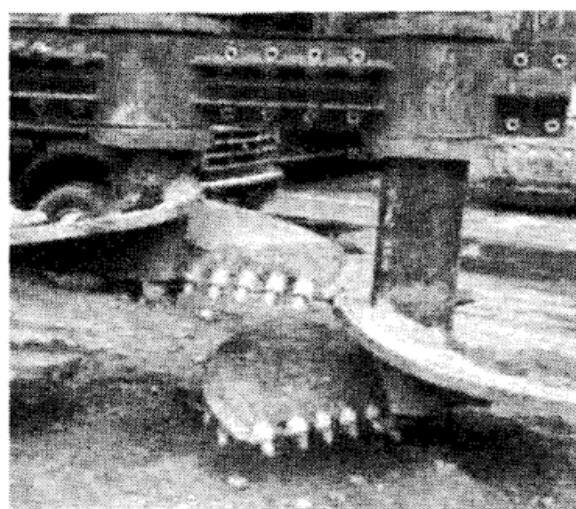
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. B3: Utensili di mescolamento ad asta singola a) e ad asta multipla b), c), d) (da Topolnicki, 2004).

Con questo tipo di equipaggiamento è possibile stabilizzare terreni molto poco resistenti sino ad una profondità massima di 12 m.

Più recentemente (Topolnicki, l. c.) in Finlandia e Svezia è stato implementato un altro metodo di stabilizzazione di massa in cui il processo di mescolamento può essere ripetuto verticalmente ed orizzontalmente nella massa di terreno usando vari dispositivi di mescolamento.

Il legante è alimentato da una unità separata che consta di contenitore pressurizzato del legante, compressore, essiccatore dell'aria e unità di controllo dell'alimentazione.

La profondità di trattamento per questo sistema è comunemente limitata a 5 m (Fig. B4).

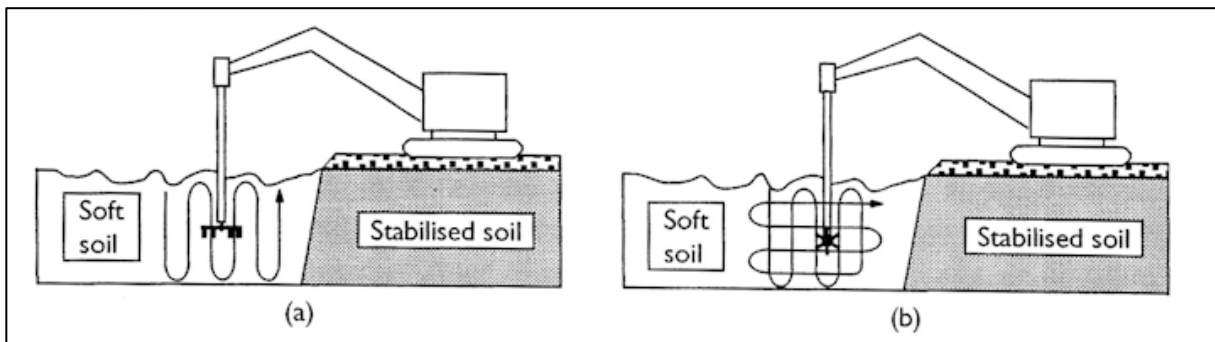


Fig. B4: Stabilizzazione di massa con leganti allo stato secco: a) mescolamento prevalentemente verticale b) mescolamento verticale ed orizzontale (da Topolnicki, 2004).

Nell'applicazione delle tecnologie di mescolamento in situ del terreno con leganti allo stato secco o umido, la riuscita dell'intervento ovvero la qualità della stabilizzazione dell'intero volume di terreno trattato dipende strettamente dall'accuratezza del mescolamento.

APPENDICE C

Caratteristiche della calce viva usata nelle miscele.

	LABORATORIO CENTRALE GRUPPO UNICALCE	Presso: UNICALCE S.p.A. Via Lisso, 12 24010 Sedrina (BG) rmuratori@unicalce.it lcariboni@unicalce.it
---	---	---

BOLLETTINO DI ANALISI E PROVE

Richiedente	ICICO - Dott. Moreschi		
Materiale	Ossido di calcio 0/1 MM		
Provenienza	CSP Palagiano		
Campionamento	01/12/08	silo	
Motivo richiesta			
Codice Campione CO 1598/08	Ricevimento 03/12/08	Bollettino S 1454-08	Emissione 03/12/08

Descrizione campione: calce viva in polvere, 0.5 kg.

Proprietà chimica	Metodo	Valore	u. m.	Proprietà fisica	Metodo	Valore	u. m.
P.a.f. ^(*)	Muffola 1050 °C	3.34	%	Prova di reattività	UNI EN 459-2		
P.a.f.	Muffola 580 °C		%	Temperatura max, T' _{max}	misura	70.6	°C
CO ₂	Apparecchio Eltra	2.79	%	Reatt., tempo t _u (80% reaz.)	calcolo	0.8	min
SO ₃ ^(*)	Apparecchio Eltra	0.79	%	T _u = (0,8xT' _{max}) + (0,2xT _o)	calcolo	60.4	°C
CaO totale ^(*)	Complessimetria	94.69	%	T _{max} = (1,1xT' _{max}) - 2	calcolo	75.7	°C
MgO totale ^(*)	Complessimetria	0.77	%	Reattività, tempo t ₆₀	misura	0.7	min
SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ ^(*)	Gravimetria	0.32	%	Granulometria	UNI EN 12485		
Calce solubile in acqua	EN 12485:2001		%	Residuo 4 mm	Setacc. Alpine	1.8	%
				Residuo 2 mm	Setacc. Alpine	26	%
				Residuo 1 mm	Setacc. Alpine	53	%
				Residuo 500 micron	Setacc. Alpine	66	%
				Residuo 200 micron	Setacc. Alpine	75	%
				Residuo 90 micron	Setacc. Alpine	81	%
				Residuo 63 micron	Setacc. Alpine		%
				Residuo 40 micron	Setacc. Alpine		%
Somma analitica ^(*)			%	Massa volumica	UNI EN 459-2	1.05	kg/dm ³

Note:

Visto di controllo	Visto di approvazione	L'analista
	Dott.ssa Roberta Muratori	

APPENDICE D

Caratteristiche del cemento usato nelle miscele.

CEMENTO PORTLAND ALLA LOPPA (EN 197/1: 2000 + A1: 2003 + A3: 2007) CEM II/A-S 42,5R.

Chimiche	P.a.f		%
	SO ₃	2,93	%
	Cloruri	0,05	%
	Residuo insolubile		%
	Saggio di Pozzolanicità		%
Fisiche	Peso specifico	3,13	g/cm ³
	Residuo a 32 micron	6,15	%
	Superficie specifica Blaine	341	m ² /g
	Consistenza normale	29,07	%
	Tempo iniziale di presa	124	min
	Pinze di Le Chatelier	3	mm
Meccaniche	Resistenza in malta plastica (secondo UNI EN 196/1) - MPa		
RESISTENZA A COMPRESSIONE MPa			
	2gg	7gg	28gg
	24,5		47,7

APPENDICE E

Pesi specifici della fase solida delle miscele argilla – legante.



POLITECNICO DI BARI

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente e per lo Sviluppo Sostenibile

Via A. De Gasperi s/n 74 100 - Taranto Tel. 099 473 33 00 - Fax 099 473 33 04

PESI SPECIFICI DELLA FASE SOLIDA

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CALCE (2%)

Picnometro n.	9	10
Peso picnometro	55,32	56,57
Peso della terra secca + picnometro	65,59	66,59
Peso della terra secca	10,27	10,02
Peso picnometro + acqua a 20°C	155,14	156,4
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	161,57	162,69
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,674	2,686
G_s = γ_s/γ_w = 2,68		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CALCE (4%)

Picnometro n.	3	4
Peso picnometro	57,53	57,46
Peso della terra secca + picnometro	65,54	67,49
Peso della terra secca	8,01	10,03
Peso picnometro + acqua a 20°C	157,24	157,31
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	162,29	163,62
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,706	2,696
G_s = γ_s/γ_w = 2,70		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CALCE (8%)

Picnometro n.	3	4
Peso picnometro	57,56	57,45
Peso della terra secca + picnometro	67,38	67,56
Peso della terra secca	9,82	10,11
Peso picnometro + acqua a 20°C	157,24	157,31
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	163,36	163,59
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,654	2,640
G_s = γ_s/γ_w = 2,65		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CEMENTO (2%)

Picnometro n.	7	8
Peso picnometro	55,60	56,08
Peso della terra secca + picnometro	65,62	66,27
Peso della terra secca	10,02	10,19
Peso picnometro + acqua a 20°C	155,56	155,80
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	161,88	162,21
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,708	2,696
G_s = γ_s/γ_w = 2,70		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CEMENTO (4%)

Picnometro n.	11	12
Peso picnometro	63,07	63,17
Peso della terra secca + picnometro	73,93	73,62
Peso della terra secca	10,86	10,45
Peso picnometro + acqua a 20°C	162,73	162,93
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	169,62	169,55
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,736	2,728
G_s = γ_s/γ_w = 2,73		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CEMENTO (8%)

Picnometro n.	5	6
Peso picnometro	57,59	58,30
Peso della terra secca + picnometro	67,44	68,48
Peso della terra secca	9,85	10,18
Peso picnometro + acqua a 20°C	157,40	158,17
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	163,67	164,64
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,751	2,744
G_s = γ_s/γ_w = 2,75		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CALCE/CEMENTO (25/75) (2%)

Picnometro n.	5	6
Peso picnometro	57,60	58,31
Peso della terra secca + picnometro	67,63	66,55
Peso della terra secca	10,03	8,24
Peso picnometro + acqua a 20°C	157,40	158,17
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	163,64	163,29
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,646	2,641
G_s = γ_s/γ_w = 2,64		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CALCE/CEMENTO (25/75) (4%)

Picnometro n.	7	8
Peso picnometro	55,62	56,12
Peso della terra secca + picnometro	65,80	66,36
Peso della terra secca	10,18	10,24
Peso picnometro + acqua a 20°C	156,56	155,80
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	162,48	162,52
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,590	2,909
G_s = γ_s/γ_w = 2,65		

ARGILLA DI BASE MESCOLATA CON CALCE/CEMENTO (25/75) (8%)

Picnometro n.	1	2
Peso picnometro	57,60	57,46
Peso della terra secca + picnometro	67,83	67,67
Peso della terra secca	10,23	10,21
Peso picnometro + acqua a 20°C	157,37	157,21
Peso picnometro + acqua + terra secca a 20°C	163,76	163,59
Peso dell'unità di volume della fase solida	2,664	2,666
G_s = γ_s/γ_w = 2,67		

APPENDICE F

Limiti di consistenza delle miscele argilla – legante.

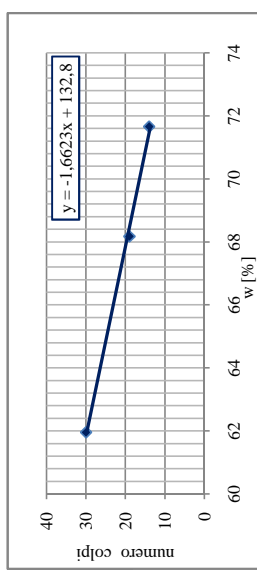
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

Campione: Argilla di base mescolata con calce

2% CALCE						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	63,97	96,10	83,81	12,29	19,84	61,95
5	61,68	91,21	79,24	11,97	17,56	68,17
6	62,08	110,16	90,09	20,07	28,01	71,65

1	63,89	92,94	83,32	9,62	19,43	49,51
2	64,13	103,03	90,50	12,53	26,37	47,52
3	64,48	108,66	93,22	15,44	28,74	53,72



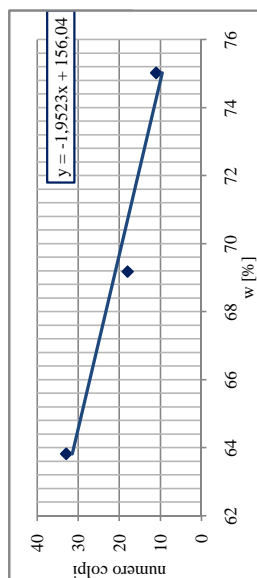
2% CALCE						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
34	7,83	21,99	18,36	3,63	10,53	34,47

LIMITE LIQUIDO **WL = 65%**
 LIMITE PLASTICO **WP = 34%**
 INDICE PLASTICO **PI = 31%**

Tempo di maturazione: 2d

4% CALCE						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
A	64,20	89,51	79,65	9,86	15,45	63,82
7	62,68	100,39	84,97	15,42	22,29	69,18
8	64,77	104,71	87,59	17,12	22,82	75,02

1	63,89	92,94	83,32	9,62	19,43	49,51
2	64,13	103,03	90,50	12,53	26,37	47,52
3	64,48	108,66	93,22	15,44	28,74	53,72

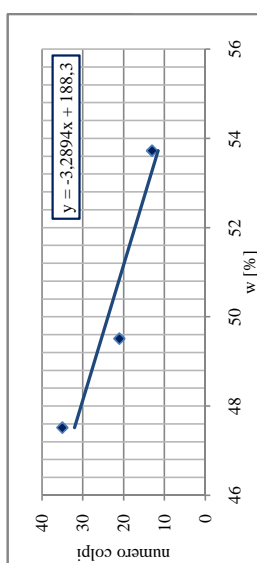


4% CALCE						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
41	7,87	18,22	15,27	2,95	7,40	39,86

LIMITE LIQUIDO **WL = 67%**
 LIMITE PLASTICO **WP = 40%**
 INDICE PLASTICO **PI = 27%**

8% CALCE						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
1	63,89	92,94	83,32	9,62	19,43	49,51
2	64,13	103,03	90,50	12,53	26,37	47,52
3	64,48	108,66	93,22	15,44	28,74	53,72

1	63,89	92,94	83,32	9,62	19,43	49,51
2	64,13	103,03	90,50	12,53	26,37	47,52
3	64,48	108,66	93,22	15,44	28,74	53,72



8% CALCE						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
38	8,36	19,39	16,46	2,93	8,10	36,17

LIMITE LIQUIDO **WL = 50%**
 LIMITE PLASTICO **WP = 36%**
 INDICE PLASTICO **PI = 14%**

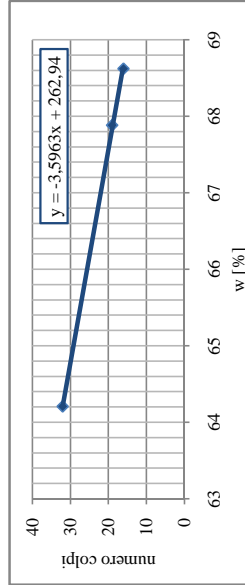
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

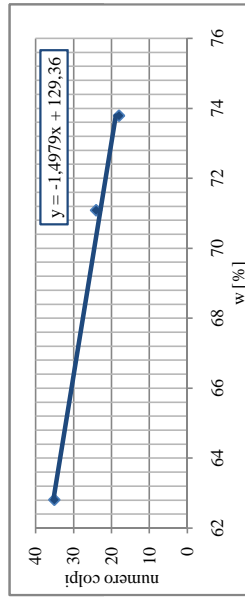
Campione: Argilla di base mescolata con calce

Tempo di maturazione: 7d

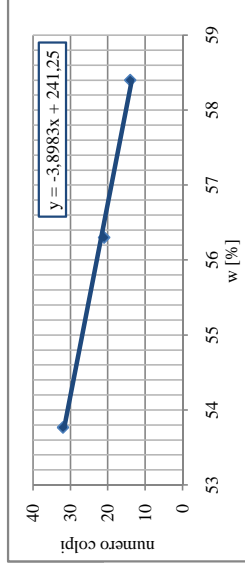
2% CALCE						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
9	20,77	62,84	46,39	16,45	25,62	64,21
10	20,83	55,80	41,66	14,14	20,83	67,88
11	21,13	59,07	43,63	15,44	22,50	68,62
Numero colpi						
						32



4% CALCE						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
1	63,89	95,15	83,09	12,06	19,20	62,81
2	64,13	103,65	87,23	16,42	23,10	71,08
3	64,48	101,67	85,88	15,79	21,40	73,79
Numero colpi						
						35
						24
						18

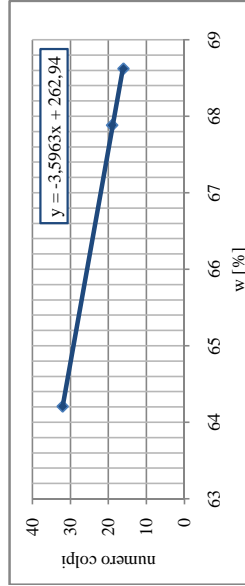


8% CALCE						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
1	63,87	101,85	88,57	13,28	24,70	53,77
2	64,12	100,71	87,53	13,18	23,41	56,30
3	64,93	101,98	88,32	13,66	23,39	58,40
Numero colpi						
						32
						21
						14

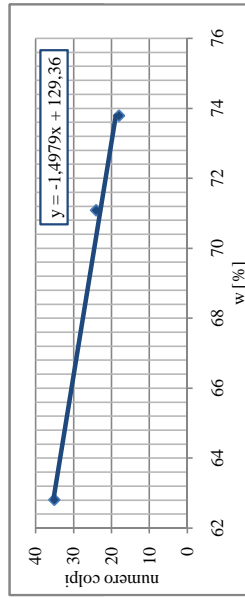


Tempo di maturazione: 7d

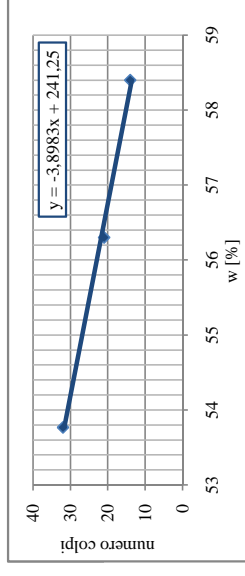
2% CALCE						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	64,19	75,58	72,69	2,89	8,50	34,00
Numero colpi						
						38



4% CALCE						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
8	64,75	78,80	74,86	3,94	10,11	38,97
Numero colpi						
						8



8% CALCE						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
8	64,75	78,80	74,86	3,94	10,11	38,97
Numero colpi						
						8



LIMITE LIQUIDO **WL = 55%**
 LIMITE PLASTICO **WP = 39%**
 INDICE PLASTICO **PI = 16%**

LIMITE LIQUIDO **WL = 70%**
 LIMITE PLASTICO **WP = 39%**
 INDICE PLASTICO **PI = 31%**

LIMITE LIQUIDO **WL = 66%**
 LIMITE PLASTICO **WP = 34%**
 INDICE PLASTICO **PI = 32%**

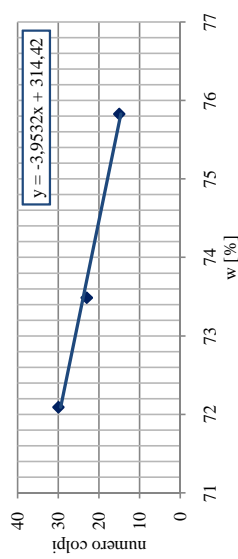
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

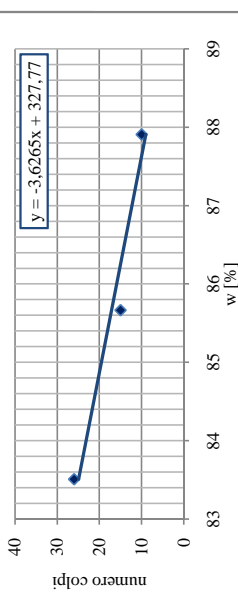
Campione: Argilla di base mescolata con calce

Tempo di maturazione: 28d

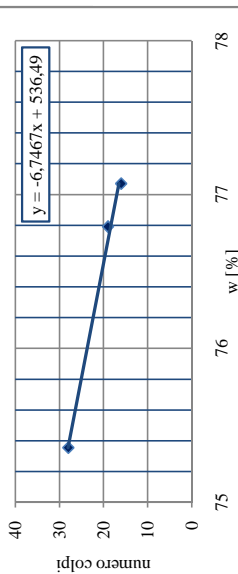
2% CALCE							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi
9	20,77	63,81	45,78	18,03	25,01	72,09	30
10	20,83	73,57	51,23	22,34	30,40	73,49	23
11	21,13	71,61	49,84	21,77	28,71	75,83	15



4% CALCE							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi
6	62,06	97,11	81,16	15,95	19,10	83,51	26
5	61,69	105,08	85,06	20,02	23,37	85,67	15
1	63,89	104,14	85,31	18,83	21,42	87,91	10



8% CALCE							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi
1	63,87	107,27	88,62	18,65	24,75	75,35	28
2	64,12	105,56	87,56	18,00	23,44	76,79	19
3	64,48	105,72	87,77	17,95	23,29	77,07	16



2% CALCE							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi
A	64,19	77,48	74,18	3,30	9,99	33,03	

LIMITE LIQUIDO WL = 73%
 LIMITE PLASTICO WP = 33%
 INDICE PLASTICO PI = 40%

4% CALCE							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi
8	64,77	76,53	73,30	3,23	8,53	37,87	

LIMITE LIQUIDO WL = 83%
 LIMITE PLASTICO WP = 38%
 INDICE PLASTICO PI = 45%

8% CALCE							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi
8	64,76	80,22	74,98	5,24	10,22	51,27	

LIMITE LIQUIDO WL = 76%
 LIMITE PLASTICO WP = 51%
 INDICE PLASTICO PI = 25%

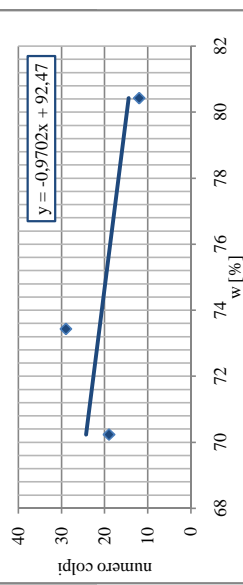
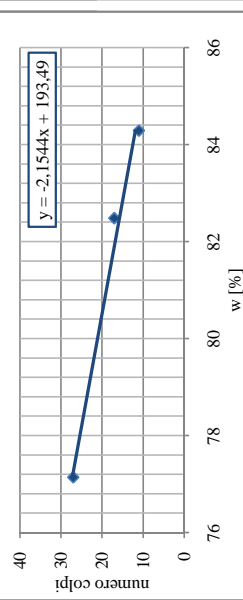
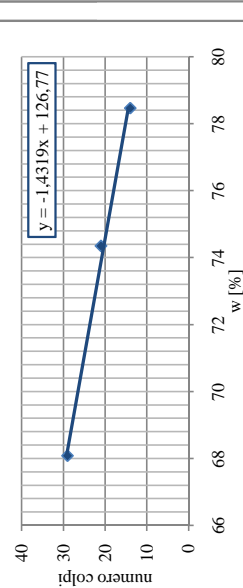
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

Campione: Argilla di base mescolata con cemento

Tempo di maturazione: 2d

2% CEMENTO							4% CEMENTO							8% CEMENTO								
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi	Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi	Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi		
9	20,78	44,43	34,85	9,58	14,07	68,09	29	17,39	43,50	32,13	11,37	14,74	77,14	27	15	17,37	40,02	30,43	9,59	13,06	73,43	29
10	20,83	51,08	38,18	12,90	17,35	74,35	21	20,91	45,91	34,61	11,30	13,70	82,48	17	16	17,28	44,04	33,00	11,04	15,72	70,23	19
11	21,12	48,30	36,35	11,95	15,23	78,46	14	17,28	44,37	31,98	12,39	14,70	84,29	11	17	17,35	54,77	38,09	16,68	20,74	80,42	12



2% CEMENTO							4% CEMENTO							8% CEMENTO							
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi	Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi	Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Contenuto di acqua [%]	Numero colpi	
36	9,21	23,2	19,59	3,61	10,38	34,78	35	7,98	15,51	13,26	2,25	5,28	42,61	42	27,32	35,18	32,80	2,38	5,48	43,43	42

LIMITE LIQUIDO WL = 71%
 LIMITE PLASTICO WP = 35%
 INDICE PLASTICO PI = 36%

LIMITE LIQUIDO WL = 78%
 LIMITE PLASTICO WP = 43%
 INDICE PLASTICO PI = 35%

LIMITE LIQUIDO WL = 70%
 LIMITE PLASTICO WP = 43%
 INDICE PLASTICO PI = 27%

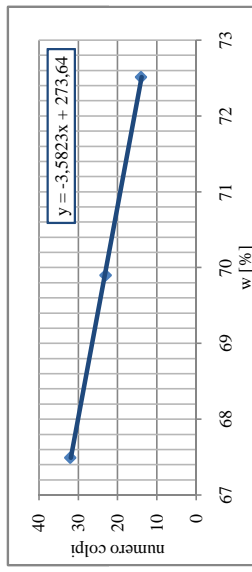
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

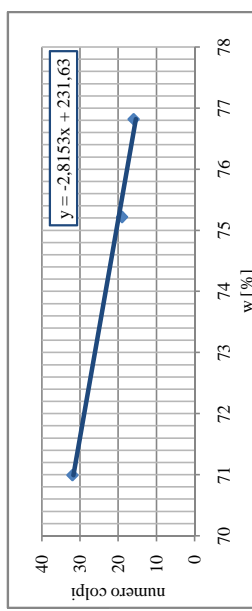
Campione: Argilla di base mescolata con cemento

Tempo di maturazione: 7d

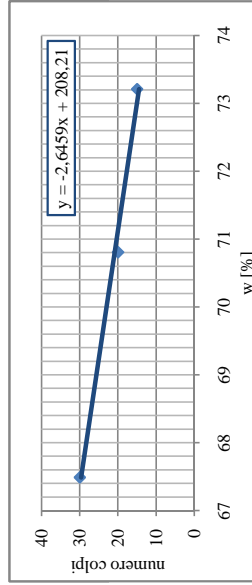
2% CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	63,98	106,02	89,08	16,94	25,10	67,49
5	61,70	106,40	88,01	18,39	26,31	69,90
6	62,03	98,43	83,13	15,30	21,10	72,51
Numero colpi						
32						



4% CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
6	62,06	98,14	83,16	14,98	21,10	71,00
5	61,70	97,97	82,40	15,57	20,70	75,22
1	64,00	99,01	83,80	15,21	19,80	76,82
Numero colpi						
32						



8% CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
30	14,72	53,41	37,82	15,59	23,10	67,49
31	14,04	52,13	36,34	15,79	22,30	70,81
32	14,46	61,40	41,56	19,84	27,10	73,21
Numero colpi						
30						



2% CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
A	64,23	77,26	74,03	3,23	9,80	32,96

LIMITE LIQUIDO WL = 69%
 LIMITE PLASTICO WP = 33%
 INDICE PLASTICO PI = 36%

4% CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
8	64,79	70,81	69,09	1,72	4,30	40,00

LIMITE LIQUIDO WL = 73%
 LIMITE PLASTICO WP = 40%
 INDICE PLASTICO PI = 33%

8% CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
29	18,36	24,84	22,86	1,98	4,50	44,00

LIMITE LIQUIDO WL = 69%
 LIMITE PLASTICO WP = 44%
 INDICE PLASTICO PI = 25%

LIMITI DI CONSISTENZA

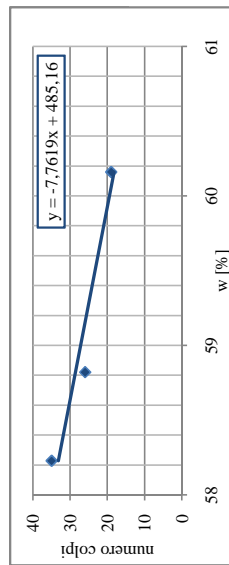
Località: Porto di Taranto

Campione: Argilla di base mescolata con cemento

Tempo di maturazione: 28d

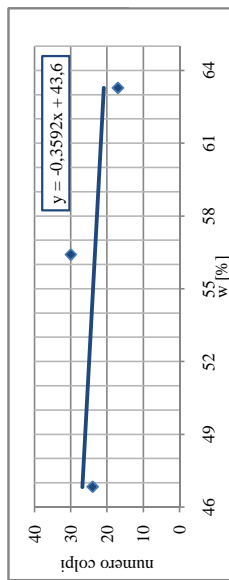
2% CEMENTO						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	64,21	107,09	91,31	15,78	27,10	58,23
2	64,13	112,65	94,68	17,97	30,55	58,82
3	64,49	116,27	96,82	19,45	32,33	60,16

30	14,72	52,83	37,67	15,16	22,95	66,06
31	14,04	56,24	39,00	17,24	24,96	69,07
32	14,46	63,97	43,08	20,89	28,62	72,99



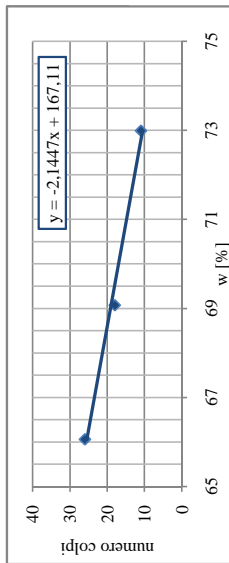
4% CEMENTO						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
21	17,26	46,21	35,77	10,44	18,51	56,40
18	17,43	42,20	34,30	7,90	16,87	46,83
28	16,26	64,05	45,53	18,52	29,27	63,27

30	14,72	52,83	37,67	15,16	22,95	66,06
31	14,04	56,24	39,00	17,24	24,96	69,07
32	14,46	63,97	43,08	20,89	28,62	72,99



8% CEMENTO						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
30	14,72	52,83	37,67	15,16	22,95	66,06
31	14,04	56,24	39,00	17,24	24,96	69,07
32	14,46	63,97	43,08	20,89	28,62	72,99

30	14,72	52,83	37,67	15,16	22,95	66,06
31	14,04	56,24	39,00	17,24	24,96	69,07
32	14,46	63,97	43,08	20,89	28,62	72,99



2% CEMENTO						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
7	62,67	73,41	71,08	2,33	8,41	27,71

33	20,91	30,48	28,28	2,20	7,37	29,85
----	-------	-------	-------	------	------	-------

LIMITE LIQUIDO WL = 59%
 LIMITE PLASTICO WP = 28%
 INDICE PLASTICO PI = 31%

4% CEMENTO						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
33	20,91	30,48	28,28	2,20	7,37	29,85

33	20,91	30,48	28,28	2,20	7,37	29,85
----	-------	-------	-------	------	------	-------

LIMITE LIQUIDO WL = 52%
 LIMITE PLASTICO WP = 30%
 INDICE PLASTICO PI = 22%

8% CEMENTO						Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
29	18,36	24,92	22,89	2,03	4,53	44,81

29	18,36	24,92	22,89	2,03	4,53	44,81
----	-------	-------	-------	------	------	-------

LIMITE LIQUIDO WL = 66%
 LIMITE PLASTICO WP = 45%
 INDICE PLASTICO PI = 21%

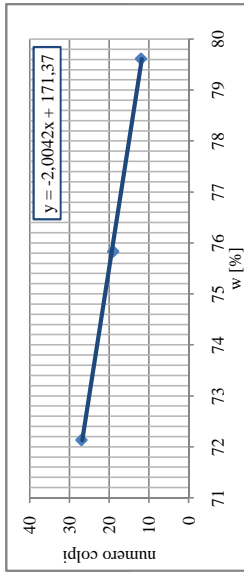
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

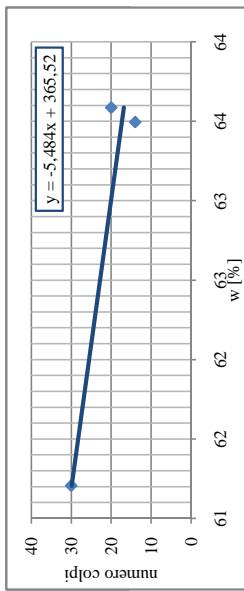
Campione: Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75)

Tempo di maturazione: 2d

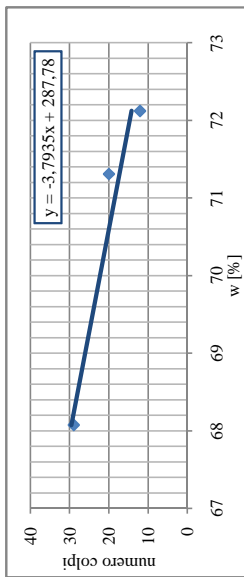
2% CALCE/CEMENTO							Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	
22	17,54	42,74	32,18	10,56	14,64	72,13	27
23	17,39	44,38	32,74	11,64	15,35	75,83	19
24	17,43	48,09	34,50	13,59	17,07	79,61	12



4% CALCE/CEMENTO							Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	
25	25,93	50,82	41,37	9,45	15,44	61,20	30
26	15,62	48,19	35,53	12,66	19,91	63,59	20
27	15,75	48,22	35,61	12,61	19,86	63,49	14



8% CALCE/CEMENTO							Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	
18	17,50	43,03	32,69	10,34	15,19	68,07	29
19	17,49	48,00	35,30	12,70	17,81	71,31	20
20	17,35	52,48	37,76	14,72	20,41	72,12	12



2% CALCE/CEMENTO							Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	
39	7,94	19,75	16,63	3,12	8,69	35,90	

LIMITE LIQUIDO WL = 73%
 LIMITE PLASTICO WP = 36%
 INDICE PLASTICO PI = 37%

4% CALCE/CEMENTO							Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	
40	7,97	17,68	15,37	2,31	7,40	31,22	

LIMITE LIQUIDO WL = 62%
 LIMITE PLASTICO WP = 31%
 INDICE PLASTICO PI = 31%

8% CALCE/CEMENTO							Numero colpi
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione unito [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]	
37	7,96	16,40	13,61	2,79	5,65	49,38	

LIMITE LIQUIDO WL = 69%
 LIMITE PLASTICO WP = 49%
 INDICE PLASTICO PI = 20%

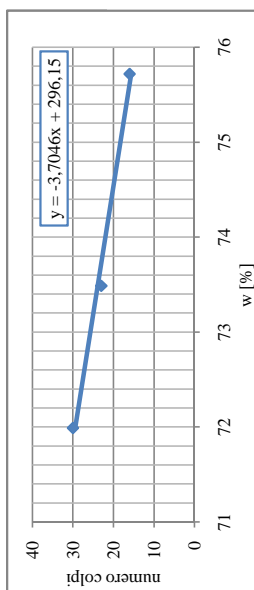
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

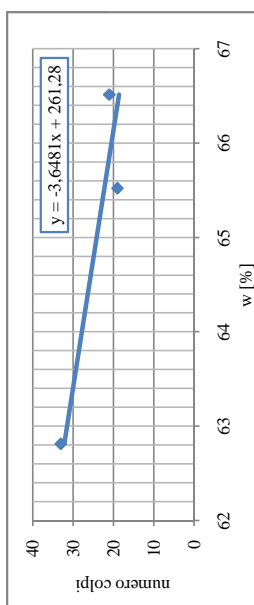
Campione: Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75)

Tempo di maturazione: 7d

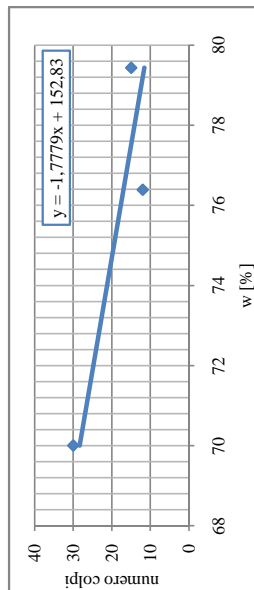
2% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
7	62,68	97,25	82,78	14,47	20,10	71,99
8	64,79	106,08	88,59	17,49	23,80	73,49
A	64,19	103,20	86,39	16,81	22,20	75,72
						16
						23
						30



4% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	63,96	105,64	89,56	16,08	25,60	62,81
5	61,70	101,83	85,80	16,03	24,10	66,51
6	62,06	107,86	89,73	18,13	27,67	65,52
						19
						21
						33



8% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
2	64,13	105,10	88,23	16,87	24,10	70,00
4	63,96	102,18	85,26	16,92	21,30	79,44
1	63,82	107,00	88,30	18,70	24,48	76,39
						12
						15
						30



2% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
6	62,07	75,93	72,19	3,74	10,12	36,96

LIMITE LIQUIDO WL = 73%
 LIMITE PLASTICO WP = 37%
 INDICE PLASTICO PI = 36%

4% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	64,21	76,38	73,36	3,02	9,15	33,01

LIMITE LIQUIDO WL = 65%
 LIMITE PLASTICO WP = 33%
 INDICE PLASTICO PI = 32%

8% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
3	64,52	87,32	79,62	7,70	15,10	50,99

LIMITE LIQUIDO WL = 72%
 LIMITE PLASTICO WP = 51%
 INDICE PLASTICO PI = 21%

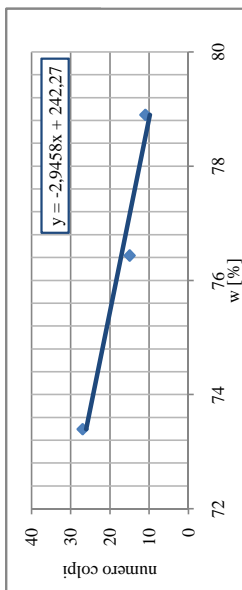
LIMITI DI CONSISTENZA

Località: Porto di Taranto

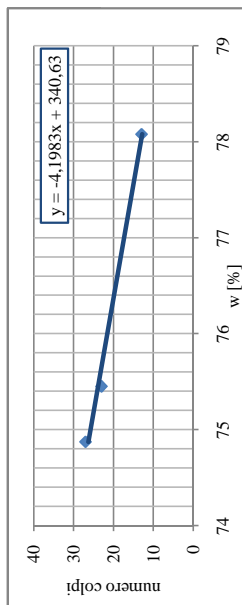
Campione: Argilla di base mescolata con calce/cemento (25/75)

Tempo di maturazione: 28d

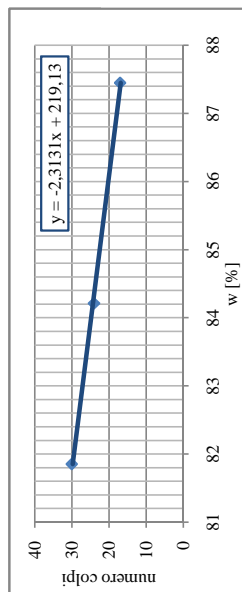
2% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
4	63,98	110,12	90,59	19,53	26,61	73,39
5	61,68	108,10	87,99	20,11	26,31	76,43
6	62,05	99,44	82,95	16,49	20,90	78,90
Numero colpi						
27						



4% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
7	62,68	96,92	82,26	14,66	19,58	74,87
8	64,78	106,66	88,65	18,01	23,87	75,45
A.	64,19	103,42	86,22	17,20	22,03	78,08
Numero colpi						
27						



8% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
2	64,13	109,32	88,98	20,34	24,85	81,85
4	63,99	103,19	85,27	17,92	21,28	84,21
1	63,91	109,01	87,97	21,04	24,06	87,45
Numero colpi						
30						



2% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
A.	64,22	77,17	73,37	3,80	9,15	41,53

LIMITE LIQUIDO WL = 74%
 LIMITE PLASTICO WP = 42%
 INDICE PLASTICO PI = 32%

4% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
6	62,07	77,23	72,69	4,54	10,62	42,75

LIMITE LIQUIDO WL = 75%
 LIMITE PLASTICO WP = 43%
 INDICE PLASTICO PI = 32%

8% CALCE/CEMENTO						
Recipiente n.	Peso recipiente [g]	Peso recipiente + campione umido [g]	Peso recipiente + campione secco [g]	Peso dell'acqua [g]	Peso campione secco [g]	Contenuto di acqua [%]
3	64,50	92,50	82,44	10,06	17,94	56,08

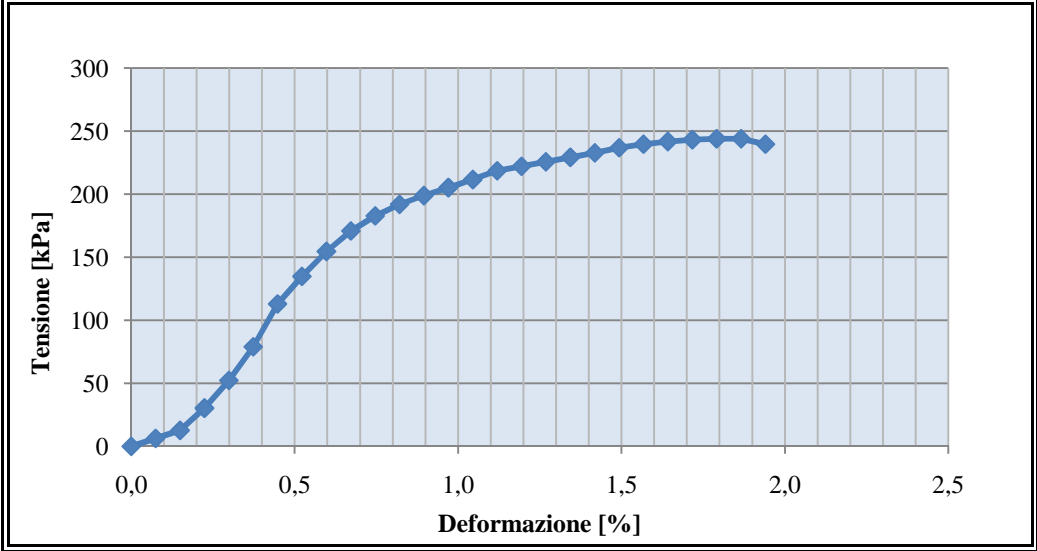
LIMITE LIQUIDO WL = 84%
 LIMITE PLASTICO WP = 56%
 INDICE PLASTICO PI = 28%

APPENDICE G

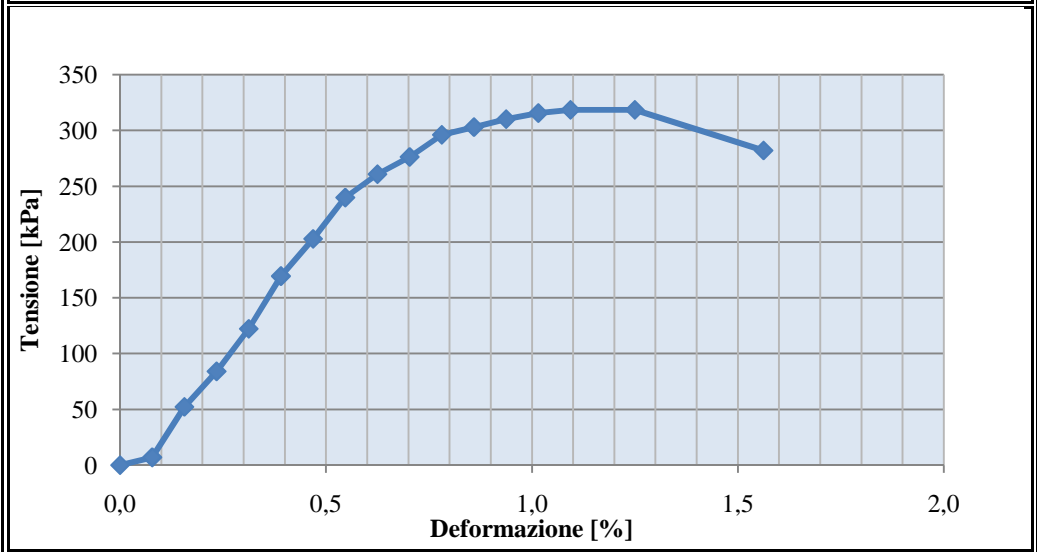
Risultati delle prove di compressione non confinata.

PROVA DI COMPRESSIONE AD ESPANSIONE LATERALE LIBERA

Argilla di base mescolata con cemento (8%)
Tempo di maturazione: 28d
 Geometria del provino: D = 38mm, H = 67mm
 Velocità di prova: 0,5mm/min
 Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,59 \text{ g/cm}^3$
 Contenuto d'acqua: $w = 72,61\%$



Argilla di base mescolata con cemento (10%)
Tempo di maturazione: 28d
 Geometria del provino: D = 38 mm, H = 64 mm
 Velocità di prova: 0,5 mm/min
 Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,60 \text{ g/cm}^3$
 Contenuto d'acqua: $w = 87\%$



Argilla di base mescolata con calce (8%)

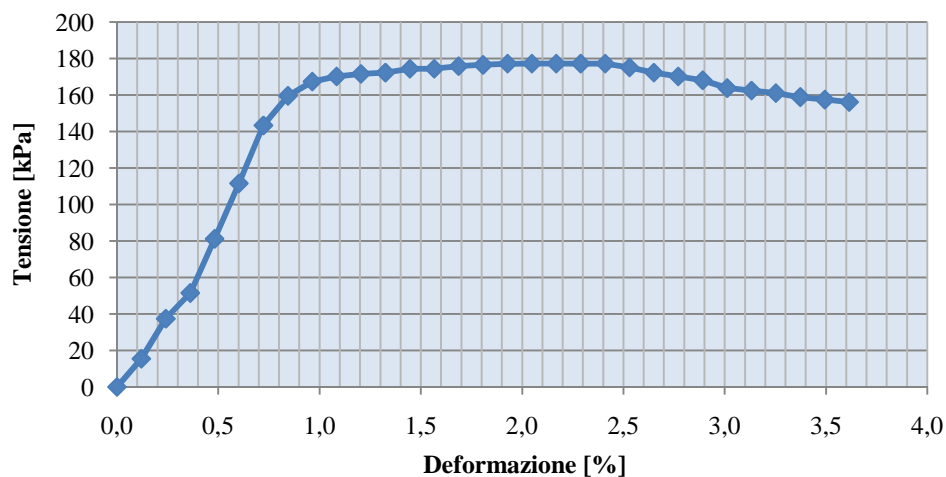
Tempo di maturazione: 38d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 41,5 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,60 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 73,16\%$



Argilla di base mescolata con calce (10%)

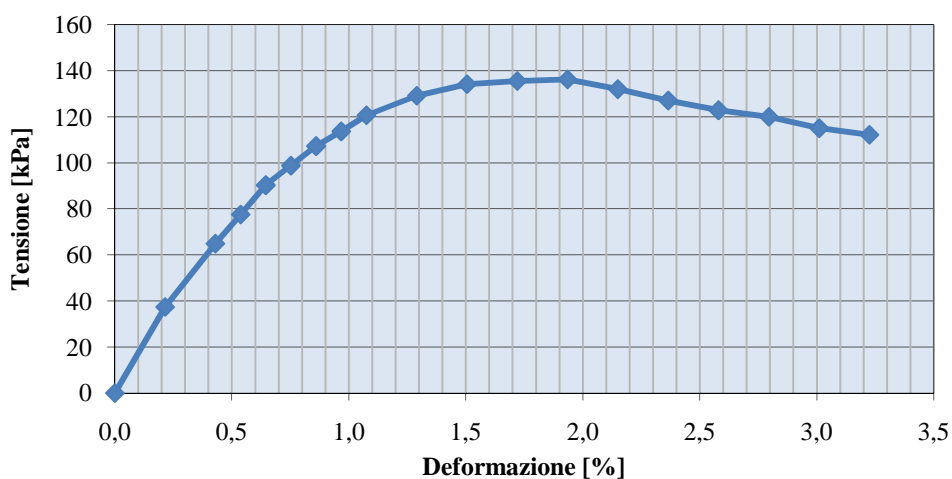
Tempo di maturazione: 38d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 46,5 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,56 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 70,74\%$



Argilla di base mescolata con cemento (10%)

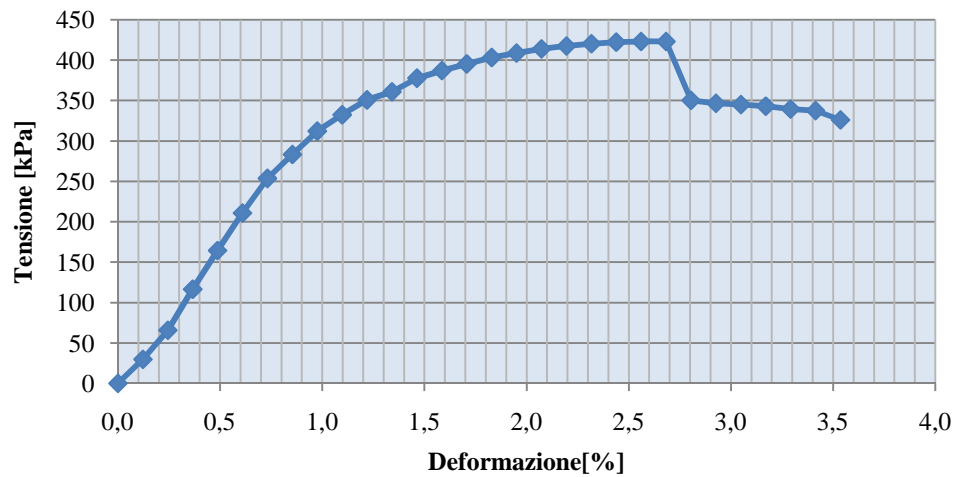
Tempo di maturazione: 38d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 41 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,62 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: w = 71,48%



Argilla di base mescolata con calce (4%)

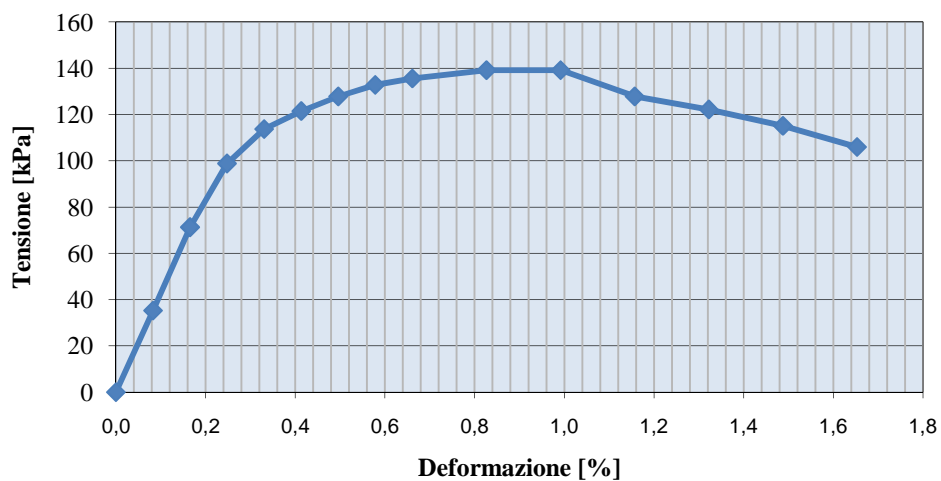
Tempo di maturazione: 60d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 60,5 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,57 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: w = 75,42%



Argilla di base mescolata con calce (8%)

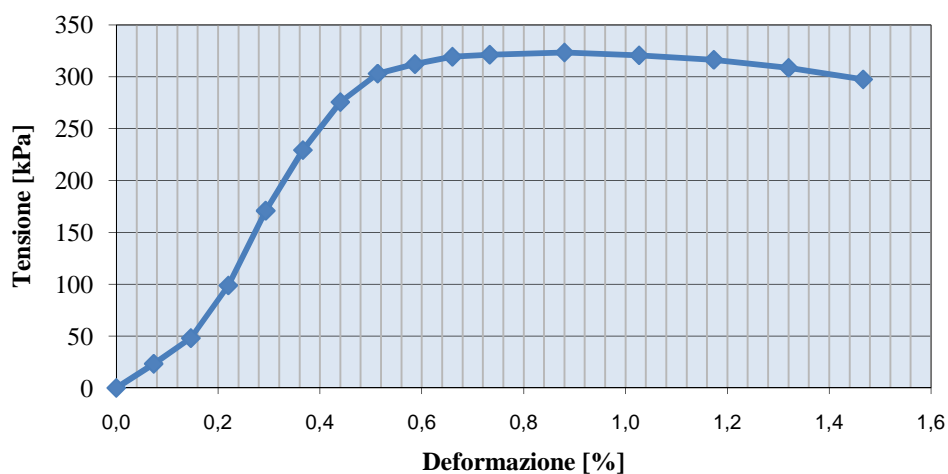
Tempo di maturazione: 60d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 68,2 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,59 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 72,02\%$



Argilla di base mescolata con calce (10%)

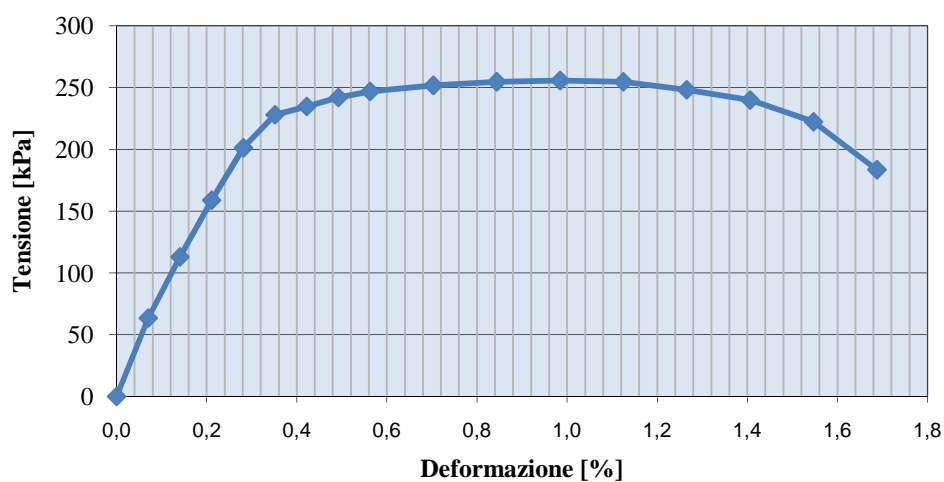
Tempo di maturazione: 60d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 71,1 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,58 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 71,03\%$



Argilla di base mescolata con cemento (4%)

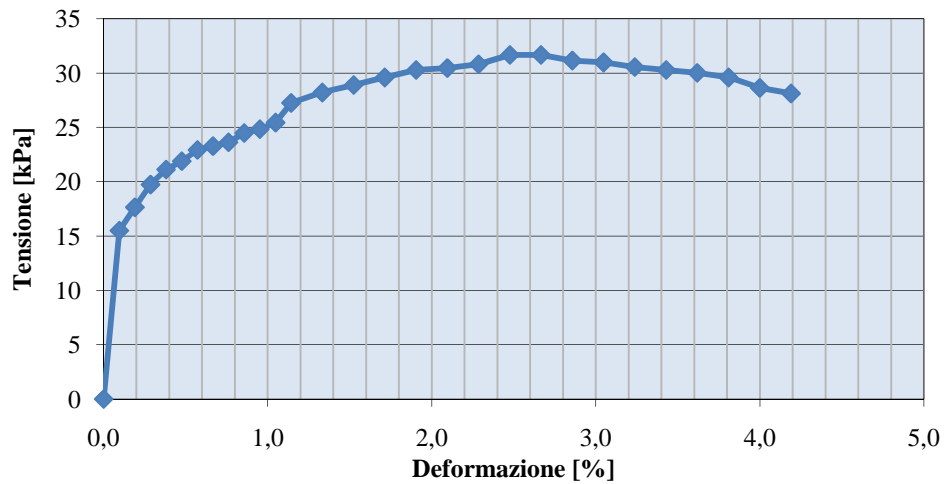
Tempo di maturazione: 60d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 52,5 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,54 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 76,77\%$



Argilla di base mescolata con cemento (8%)

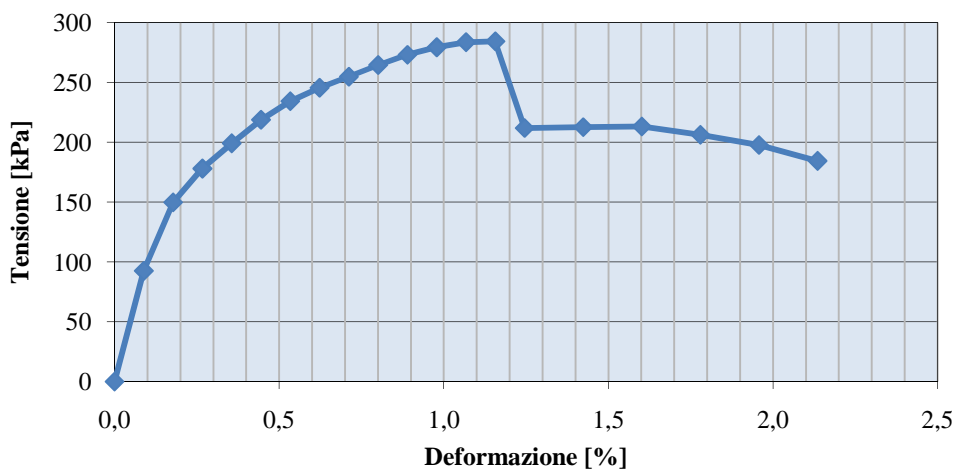
Tempo di maturazione: 60d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 56,2 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,58 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 72,98\%$



Argilla di base mescolata con cemento (10%)

Tempo di maturazione: 60d

Geometria del provino: D = 38 mm, H = 63,5 mm

Velocità di prova: 0,5 mm/min

Peso dell'unità di volume: $\gamma = 1,64 \text{ g/cm}^3$

Contenuto d'acqua: $w = 72,14\%$

