

## **CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DI UN'ARGILLA TRATTATA CON CALCE POSTA A RILEVATO**

Camillo Airò Farulla, Clara Celauro, Marco Rosone, Claudio Torta

*Università degli Studi di Palermo*

*camillo.airofarulla@unipa.it; clara.celauro@unipa.it; marco.rosone@unipa.it;*

*claudio.torta@gmail.com;*

### **Sommario**

Nelle nota si presentano alcuni risultati di un'indagine di laboratorio eseguita su campioni indisturbati prelevati da un rilevato sperimentale, realizzato trattando con calce i terreni argillosi provenienti dallo scavo di una vicina galleria artificiale. La ricerca è stata sviluppata nell'ambito dei lavori di ammodernamento della S.S. 640 tra Agrigento e Caltanissetta. I risultati, oltre ad evidenziare gli usuali effetti derivanti dalle modifiche delle caratteristiche geotecniche dell'argilla indotti dai processi di stabilizzazione con calce, consentono di evidenziare alcune peculiarità del comportamento meccanico delle argille trattate.

### **1. Introduzione**

L'intervento di stabilizzazione con calce può farsi rientrare, con riferimento ai lavori di costruzioni stradali, nel novero delle pratiche di sviluppo sostenibile, poiché consente di utilizzare le argille prelevate dagli scavi in prossimità dei rilevati da realizzare, minimizzando allo stesso tempo il fabbisogno di idonei materiali da cave di prestito e la necessità del trasporto a rifiuto delle argille scavate, di norma non idonee al reimpiego. A tal proposito, è ben noto come la stabilizzazione con calce costituisce uno dei metodi maggiormente impiegati per il miglioramento delle caratteristiche meccaniche di diversi tipi di terreni. In particolare, essa determina, attraverso lo sviluppo di processi fisico-chimici, un drastico miglioramento della lavorabilità dell'argilla e delle sue proprietà meccaniche. Infatti, come dimostrato da una miriade di esperimenti e applicazioni, il trattamento con calce produce una rapida alterazione delle proprietà fisico-chimiche dell'argilla per effetto dello scambio degli ioni calcio  $Ca^{2+}$  con i cationi dei minerali argillosi. Seguono, differite nel tempo, reazioni più complesse che, in seguito alla dissoluzione in ambiente fortemente basico degli ossidi costituenti l'argilla ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ) danno luogo allo sviluppo di silicati ed alluminati di calcio idrati, con la formazione di legami di cementazione tra gli aggregati argillosi (Boardman, et al., 2001). Nonostante le reazioni basilari del trattamento siano note, e siano altresì ben caratterizzati i miglioramenti delle caratteristiche meccaniche, e in particolare della rigidezza e della resistenza a taglio delle argille trattate, problemi possono derivare in situ durante la costruzione per la variabilità delle caratteristiche delle argille e la definizione delle modalità operative più efficaci per garantire le prestazioni richieste ai materiali posti in opera (Celauro & Celauro, 2011). Inoltre, sebbene l'impiego del trattamento è molto diffuso, non sono molti gli studi che hanno analizzato il comportamento nei tempi lunghi delle argille trattate o gli effetti di ripetuti cicli di carico e variazioni delle condizioni idrauliche al contorno. In particolare, un problema che si ritiene molto interessante da approfondire è quello della durabilità nel tempo delle proprietà acquisite col trattamento per effetto di variazioni ripetute delle pressioni interstiziali, ovvero del grado di saturazione dei materiali posti in opera.

La presente ricerca si inserisce all'interno di un articolato programma portato avanti dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM) dell'Università degli Studi di

Palermo nel corso dei lavori di ammodernamento di una strada di grande comunicazione in Sicilia, la S.S. 640 tra Agrigento e Caltanissetta, ove è stata valutata la possibilità di riutilizzare, dopo il trattamento con calce, un'argilla di alta plasticità proveniente dalle contigue zone di scavo. A tale scopo per la definizione ottimale delle modalità di posa in opera e lo studio delle caratteristiche fisiche e meccaniche dell'argilla trattata e compattata in sìto, è stato realizzato un rilevato sperimentale, utilizzato per l'esecuzione di numerose prove di carico su piastra, prove pressiomeriche e prove penetromeriche in sìto e per il prelievo di numerosi campioni indisturbati. Nella nota si presentano i risultati di alcune prove di compressione edometrica e di compressione triassiale consolidate non drenate *CIU* eseguite su campioni di argilla trattata in situ con una percentuale di calce pari a circa il 2%, prelevati subito dopo la compattazione e fatti maturare in laboratorio fino a 18 mesi in ambiente controllato. Per evidenziare gli effetti del trattamento con calce in sìto sul comportamento meccanico dell'argilla sono riportati, per confronto, i risultati di analoghe prove eseguite su provini dell'argilla non trattata e trattata in laboratorio (Airò Farulla et al., 2013).

## 2. Materiale e programma sperimentale

Il materiale impiegato è stato prelevato in sìto da un rilevato sperimentale realizzato in contrada Favarella, nella provincia di Caltanissetta. Il rilevato sperimentale ha lunghezza di poco superiore a 50 m, larghezza di 8 m alla base (4 strisce di 2 m ciascuna), ridotta dopo la costruzione del rilevato a 6.20 m in testa per sagomatura dei fianchi delle strisce laterali (scarpata 1:1), altezza totale fuori terra pari a 105 cm circa, oltre la bonifica di fondazione di 75 cm. Per essere rappresentativo dei materiali impiegati per la costruzione delle diverse zone (fondazione, parte inferiore e superiore) dei rilevati da realizzare, il rilevato di prova risulta costituito da una fondazione realizzata in due strati con dosaggio del 2% di CaO, pari al minimo identificato dalle prove di CIC, il primo dei quali ottenuto asportando 40 cm di terreno vegetale e trattando con calce il terreno sottostante in sìto per uno spessore di 35 cm. Gli strati in rilevato sono stati realizzati impiegando nell'ordine: uno strato spesso 40 cm di terra trattata con 1.6% di CaO, rappresentativo di eventuali casi di sottodosaggio in calce, uno strato dello spessore di 30 cm di terra trattata con 2% di CaO, rappresentativo degli strati destinati alla costruzione della parte inferiore del rilevato, uno strato di 35 cm di terra trattata con calce con dosaggio del 2.8%, rappresentativo degli strati della parte superiore del rilevato. L'argilla prima del trattamento è stata disgregata per mezzo di un Motor Grader fino ad ottenere un materiale con granulometria apparente caratterizzata dai passanti agli stacci avenuti apertura  $d = 31.5$  mm e  $d = 4.76$  mm, rispettivamente, pari a  $f_{31.5} = 100\%$  e  $f_{4.76} = 63\%$ . I campioni indisturbati utilizzati per gli esperimenti di laboratorio sono stati prelevati, all'atto della realizzazione del rilevato, tramite infissione di fustelle metalliche nelle strisce centrali ad una profondità tra  $0.30 \div 0.60$  m (campioni F2B e F2C) e tra  $0.90 \div 1.20$  m (F4B). Controlli di spandimento effettuati con misura della massa di calce sparsa in superficie, hanno evidenziato che il quantitativo di calce effettivamente impiegato negli strati considerati è risultato essere pari al 2.3% (Airò Farulla, et al., 2014). I campioni prelevati sono stati avvolti con più strati di pellicola e sono stati fatti maturare per un periodo di 18 mesi in un armadio climatizzato con temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$  ed umidità relativa  $Ur \geq 90\%$ . Per ciascuno dei campioni prelevati sono stati determinati il contenuto d'acqua  $w$ , la composizione granulometrica, il limite di liquidità  $w_l$  e di plasticità  $w_p$ , l'indice di plasticità  $I_p$  e di attività  $I_a$ , il peso specifico dei grani  $\gamma_s$ , il peso secco dell'unità di volume  $\gamma_d$  e l'indice di porosità  $e$ . I valori ottenuti sono riportati nella tabella 1, unitamente ai risultati delle stesse prove eseguite sull'argilla non trattata.

La variazione delle caratteristiche di deformabilità e della resistenza al taglio, rispetto allo stesso materiale non sottoposto a trattamento, sono state valutate attraverso l'esecuzione di prove di compressione edometrica su provini avenuti diametro  $d = 56$  mm ed altezza  $h = 20$  mm, prove di compressione triassiale consolidate non drenate *CIU* su provini avenuti un diametro  $d = 38$  mm ed un'altezza  $h = 76$  mm. I provini sottoposti alle prove di compressione triassiale sono stati saturati con una "backpressure"  $u_{w,0} = 300$  kPa, successivamente consolidati a pressioni efficaci comprese tra 50 e 300 kPa e portati a rottura con una velocità di deformazione pari a 1.6%/ora.

Tabella 1 - Caratterizzazione fisica dei campioni prelevati dal rilevato sperimentale (valori medi).

Campione	Profondità [m]	$f_g$ [%]	$f_s$ [%]	$f_l$ [%]	$f_a$ [%]	$w_n$ [%]	$w_l$ [%]	$w_p$ [%]	$I_p$ [%]	$I_a$ [%]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$e_0$
Non trattato	-	0	6	50	44	4.8	64	52	42	0.95	26.8	-	-
F2B	0.30 ÷ 0.60	6	17	53	24	17.6	52	28	24	1.00	26.4	17.4	0.52
F2C	0.30 ÷ 0.60	1	9	59	31	21.8	51	27	24	0.77	26.3	15.9	0.65
F4B	0.90 ÷ 1.20	0	9	39	52	19.2	53	25	28	0.54	26.3	16.6	0.58

### 3. Analisi dei risultati

Nelle figure 1, 2 e 3 sono riportati i risultati delle prove edometriche eseguite sull'argilla trattata proveniente dal rilevato sperimentale e sull'argilla naturale compattata in laboratorio (Airò Farulla et al., 2013). Durante la fase iniziale di saturazione, ottenuta sottoponendo il provino immerso in acqua alla pressione verticale efficace  $\sigma'_v = 10$  kPa, il materiale non trattato ha subito un rigonfiamento pari a 1.164 mm (deformazione assiale  $\varepsilon_a = 5.82\%$ ), mentre il materiale prelevato dal rilevato ha avuto un rigonfiamento pari a 0.094 mm ( $\varepsilon_a = 0.45\%$ ) (Fig. 1). Nel grafico in Fig. 2, dove sono riportate le curve di compressione edometrica di entrambi i provini, è possibile osservare che durante la fase di rigonfiamento libero il materiale non trattato ha avuto un incremento dell'indice di porosità molto pronunciato ( $\Delta e = 0.073$ ), passando da un valore di  $e_0 = 0.663$  ad un valore di  $e = 0.736$ , mentre il materiale prelevato dal rilevato sperimentale nella medesima fase ha mantenuto sostanzialmente inalterato il suo volume ( $\Delta e = 0.008$ ), passando da un valore di  $e_0 = 0.588$  ad un valore di  $e = 0.596$ . Alla fine della fase di carico ( $\sigma'_{v,max} = 6$  MPa), il provino di argilla non trattata ha accumulato un cedimento complessivo di 3.46 mm, corrispondente a  $\varepsilon_a = 17.31\%$ , mentre il provino di argilla trattata in sito, ha avuto un cedimento complessivo di 1.97 mm, corrispondente ad una deformazione assiale  $\varepsilon_a = 9.84\%$ . Al termine della successiva fase di scarico, il materiale non trattato ha subito un cedimento complessivo (cedimento irreversibile) pari a 1.09 mm mentre il rigonfiamento (cedimento reversibile) è risultato pari a 2.38 mm. Il cedimento finale del materiale proveniente dal rilevato sperimentale è risultato pari a 1.14 mm mentre il rigonfiamento in fase di scarico è risultato pari a 0.83 mm.

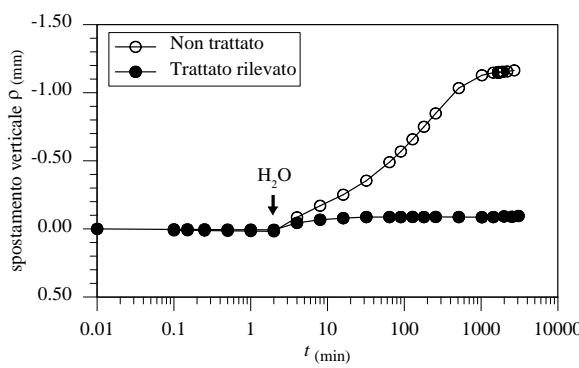


Fig. 1. Rigonfiamento durante la fase di saturazione in cella

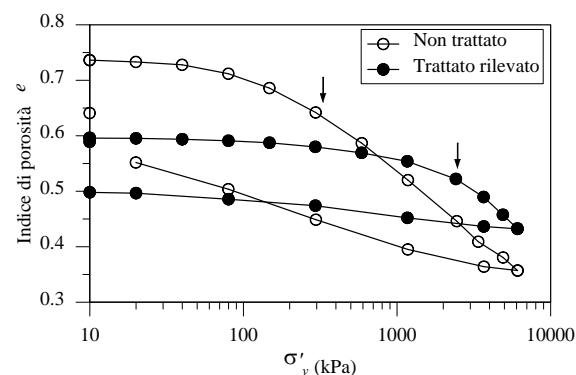


Fig. 2. Curve edometriche dell'argilla non trattata e dell'argilla trattata in situ.

Dall'andamento delle curve edometriche riportate in Fig. 2, sono state stimate le tensioni di snervamento dei due materiali con il metodo di Casagrande, ottenendo, rispettivamente  $\sigma'_{v,max} = 320$  kPa, per il materiale non trattato, e  $\sigma'_{v,max} = 2430$  kPa, per il materiale del rilevato sperimentale. Tuttavia, superato il carico di snervamento la pendenza dei tratti rettilinei delle due curve risulta praticamente la stessa ( $c_c$  pari a 0.249 e 0.258 per i due materiali), anche se il coefficiente di rigonfiamento  $c_s$  dell'argilla naturale compattata ( $c_s = 0.078$ ) è circa tre volte quello dell'argilla trattata in rilevato ( $c_s = 0.024$ ).

L'analisi dei dati riportati in Fig. 3, ottenuti attraverso un'analisi inversa delle curve cedimento-tempo, consente di evidenziare alcuni significativi aspetti degli effetti del trattamento con calce sulla rigidezza e permeabilità dell'argilla al variare del carico applicato in condizioni edometriche. In particolare, i dati

riportati nella Fig. 3a indicano che il modulo di compressione edometrica,  $E_{ed}$ , dell'argilla trattata si mantiene praticamente costante fino al carico di snervamento e maggiore all'incirca di un ordine di grandezza di quello che compete all'argilla non trattata. Superato tale carico, tuttavia, la rigidezza dell'argilla trattata si riduce rapidamente, quella dell'argilla non trattata continua a crescere con un maggiore gradiente, per cui i due moduli raggiungono lo stesso valore in corrispondenza degli incrementi finali del carico applicato. La variazione delle caratteristiche dell'argilla trattata dopo il superamento del carico di snervamento è molto evidente anche nel diagramma di Fig. 3b che rappresenta i valori calcolati del coefficiente di consolidazione  $c_v$ , che rimane grossomodo costante, e significativamente maggiore di quello dell'argilla non trattata, fino al carico  $\sigma_{v,max}$ , per poi decrescere rapidamente. L'effetto combinato dell'andamento dei valori di  $E_{ed}$  e  $c_v$ , si riflette ovviamente sull'andamento di valori del coefficiente di permeabilità,  $k$ , dei due materiali, rappresentati nei diagrammi di Fig. 3c. Tali considerazioni si applicano anche ai valori del coefficiente di consolidazione secondaria,  $c_\alpha$ . A partire dal carico di snervamento il comportamento dell'argilla trattata è del tutto identico a quello dell'argilla non trattata, mentre per valori più bassi della pressione applicata i sedimenti secondari nell'argilla trattata evolvono con velocità significativamente minore (di circa un ordine di grandezza).

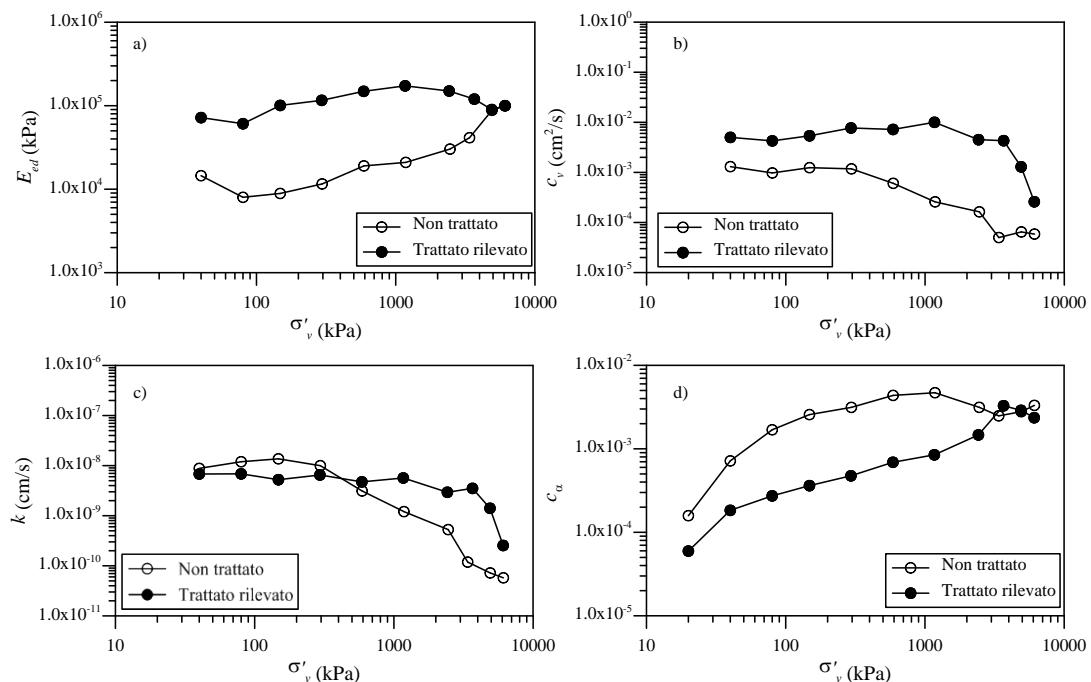


Fig 3. Andamento del modulo edometrico  $E_{ed}$  (a), del coefficiente di consolidazione primaria  $c_v$  (b), del coefficiente di permeabilità  $k$  (c) e del coefficiente di consolidazione secondaria  $c_\alpha$  (d).

In Figura 4 sono riportati gli andamenti delle fasi di rottura delle prove di compressione triassiale consolidate non drenate con misura delle pressioni neutre eseguite sui provini provenienti dal rilevato sperimentale. Dall'analisi del grafico di Fig. 4a, in cui viene riportata la tensione deviatorica  $q$  in funzione della deformazione assiale  $\varepsilon_a$ , è possibile notare come l'argilla a seguito del trattamento con calce, mostri un andamento tipico delle argille leggermente sovraconsolidate, caratterizzato da un picco di resistenza poco pronunciato e dalla formazione di una ben evidente superficie di rottura. Al procedere delle deformazioni oltre il picco, la tensione deviatorica dopo una lieve caduta assume nuovamente un andamento blandamente crescente. In alcuni casi a fine prova si sono raggiunti valori di resistenza superiori a quelli ottenuti in corrispondenza del picco. Nel diagramma che riporta la variazione delle pressioni neutre in funzione della deformazione assiale (Fig. 4b), è possibile osservare un comportamento del materiale di tipo dilatante, che dà luogo all'insorgenza di sovrappressioni interstiziali negative. In particolare è stato osservato che queste, dopo una fase iniziale in cui presentano

un rapido incremento, decrescono e tendono ad un valore costante, inferiore alla pressione interstiziale di inizio prova. Per quanto detto, il coefficiente di Skempton  $A$  assume a rottura valori compresi tra  $-0.15 \div 0.02$  per tensioni di confinamento minori di  $p' = 100$  kPa e valori compresi tra  $0.18 \div 0.28$  per le tensioni di confinamento maggiori.

In Fig. 5a sono riportati gli inviluppi di rottura ricavati dalle prove di compressione triassiale finora descritte e delle prove di taglio diretto eseguite su provini, di materiale non trattato e trattato in laboratorio con una percentuale di calce del 2%, saturati per immersione in acqua all'interno della scatola di taglio e sottoposti a valori di tensione verticale efficace  $\sigma'_v = 100 \div 300$  kPa (Airò Farulla et al., 2013). Le prove di compressione triassiale hanno confermato l'efficacia del trattamento. Difatti, il confronto tra gli inviluppi evidenzia un incremento di resistenza molto significativo, in considerazione del fatto che i parametri di resistenza al taglio dell'argilla non trattata (compattata alle condizioni di ottimo Proctor) sono pari a  $c' = 38$  kPa e  $\varphi' = 20^\circ$ . Appare subito evidente come i provini preparati in laboratorio e maturati a 28 giorni e i provini ottenuti dai campioni prelevati in situ dal rilevato sperimentale, e maturati in laboratorio per più di 18 mesi, abbiano angoli di resistenza al taglio molto simili tra di loro ( $\varphi'_{lab} = 40.5^\circ$  e  $\varphi'_{ril} = 41^\circ$ ). I due campioni presentano però differenze sostanziali per quanto riguarda il valore di coesione intercetta ( $c'_{lab} = 75$  kPa e  $c'_{ril} = 21.5$  kPa). Tale differenza può essere imputabile a diversi fattori. Innanzitutto la differenza del trattamento, in quanto il trattamento in laboratorio presenta una maggiore accuratezza nella preparazione (dimensione degli aggregati), nella miscelazione (uniformità) e nella compattazione del materiale trattato essendo i volumi in gioco di diversi ordini di grandezza inferiori nei confronti del medesimo trattamento svolto in situ su grandi quantità di materiale con l'impiego di macchine operatrici. Un secondo fattore potrebbe essere imputabile alle differenti modalità di prova, in quanto sono state eseguite prove di taglio diretto sul materiale trattato in laboratorio, e prove di compressione triassiale CIU, sul materiale proveniente dal rilevato sperimentale. Non appare chiaro al riguardo quale ruolo sia stato svolto dal tempo di maturazione, di gran lunga maggiore per i campioni trattati e compattati in situ. In fig. 5b si riporta il confronto tra gli inviluppi di resistenza al taglio di stato critico. È possibile notare

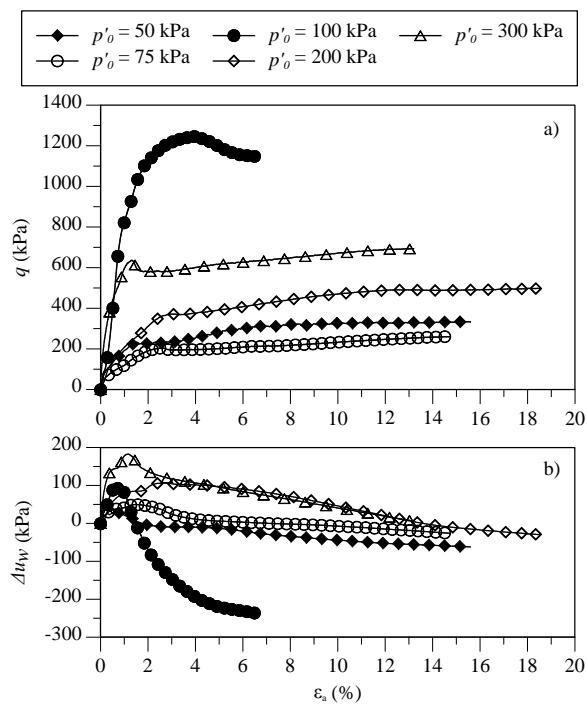


Fig. 4. Risultati delle prove di compressione triassiale CIU sui campioni prelevati dal rilevato sperimentale.

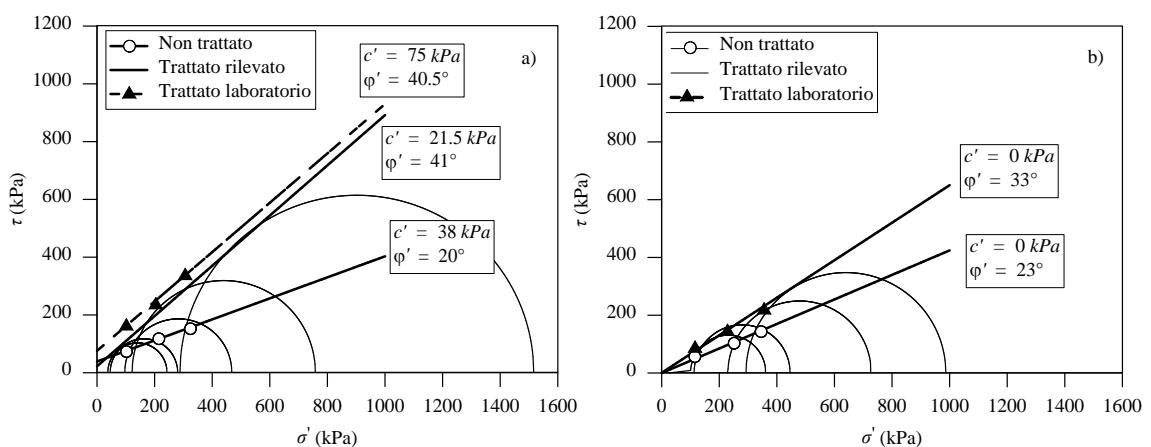


Fig 5. Inviluppi di resistenza al taglio di picco (a) e di stato critico (b) dell'argilla naturale, trattata in situ e trattata in laboratorio

come in tali condizioni non si risenta più dell'effetto della compattazione in sito, in quanto i parametri di resistenza misurati sui provini trattati in laboratorio e sui provini trattati in sito sono praticamente coincidenti ( $c' = 0$  kPa e  $\varphi' = 33^\circ$ ). Sempre in Fig. 5b è possibile notare che anche nella condizione di post-picco il materiale trattato risulta più resistente di quello non trattato, confermando ancora una volta che il trattamento con calce altera le proprietà fisiche dell'argilla. A causa dello scambio cationico, infatti, le particelle argillose flocculano ed assumono un comportamento simile a quello di un terreno granulare ed inoltre, col progredire nel tempo delle reazioni pozzolaniche, le modifiche microstrutturali e lo sviluppo dei legami di cementazione tra gli aggregati accentuano il comportamento dilatante e la fragilità dell'argilla trattata (Al-Mukhtar, et al., 2012; Airò Farulla et al., 2013).

#### 4. Conclusioni

La sperimentazione condotta in laboratorio su provini di argilla trattata con calce prelevati da un rilevato sperimentale realizzato nell'ambito dei lavori di ammodernamento di una strada di grande comunicazione in Sicilia, ha fornito risultati significativi per valutare la natura e la durabilità delle migliorate caratteristiche meccaniche derivanti dal trattamento.

In particolare, è stato evidenziato che le reazioni di lungo termine inducono una vera e propria "struttura" nel materiale, nel senso che si formano dei legami tra le particelle argillose da cui derivano significativi incrementi del modulo di compressione edometrica in un ampio intervallo delle pressioni applicate. Tale struttura provoca, inoltre, incrementi marcati del coefficiente di consolidazione primaria  $c_v$ , mentre più modesto sembra essere l'effetto sulla variazione del coefficiente di permeabilità  $k$  e del coefficiente di consolidazione secondaria  $c_\alpha$ . Inoltre, rispetto all'argilla non trattata, quella trattata presenta un forte incremento della pressione di snervamento, ovvero del carico di preconsolidazione apparente. Tuttavia, per effetto di pressioni maggiori di quella di snervamento, il materiale tende ad assumere un comportamento molto simile a quello dell'argilla naturale. L'elevato incremento di resistenza, evidenziato dai risultati delle prove di compressione triassiale e delle prove di taglio diretto, che si ottiene per effetto dei processi fisico-chimici indotti dal trattamento con calce sulla struttura delle argille risulta dipendente dalle modalità di trattamento. La sostanziale differenza in termini di coesione intercetta tra la resistenza del materiale preparato in laboratorio e quella del materiale prelevato in sito dovrebbe, molto probabilmente, essere imputato all'effetto scala derivanti dalle forti differenze tra i volumi di terreno trattati in sito con l'impiego di procedure meccanizzate e quelli dei campioni trattati in laboratorio. Un fattore al riguardo da considerare dovrebbe essere quello della dimensione degli aggregati argilosì, derivanti dai processi di disgregazione applicati in sito e in laboratorio, rispettivamente. Si deve, comunque, osservare che l'angolo di resistenza al taglio non è influenzato dalla tipologia di trattamento sia nelle condizioni di picco che allo stato critico. In ogni caso, tali valori sono ben superiori di quello dell'argilla non trattata ed evidenziano che per effetto dei processi di breve termine, le particelle flocculano, e gli aggregati che si vengono a formare risultano molto resistenti per cui l'argilla trattata si comporta come un materiale granulare addensato con comportamento dilatante a rottura.

#### Bibliografia

- Airò Farulla C, Celauro B, Celauro C & Rosone M (2014) "Prova di campo per i lavori di trattamento delle terre argillose con calce per lavori stradali e ferroviari", Ingegneria Ferroviaria, 69(9), 729-753.
- Airò Farulla C, Celauro C & Rosone M (2013) "Caratterizzazione geotecnica di un'argilla di alta plasticità trattata con calce", Atti dell'Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2013, Perugia, 1-6.
- Al-Mukhtar M, Hattab S & Alcover JF (2012) "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", Engineering Geology, 139-140, 17-27.
- Boardman DI, Glendinning S & Rogers CDF (2001) "Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes", Géotechnique, 51(6), 533-543.
- Celauro B & Celauro C (2011) "Criteria for laboratory studies on fine soils treated with lime", Construction and Building: Design, Materials, and Techniques, 1-36, Nova Science Publishers, New York.