UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

SINTESI DELLA TESI

COMPORTAMENTO MECCANICO DI TERRE ARTIFICIALI PREPARATE CON INERTI FINI

Relatore

Ch.mo Prof.

Ing. Gianfranco Urciuoli

Correlatori

Dott. Ing. Enza Vitale

Ing. Domenico De Sarno

Candidato

Pierangelo Salandra

Matr. M67/241

ANNO ACCADEMICO

2016/2017

Introduzione

Nel lavoro di tesi si è studiato il comportamento meccanico (compressibilità, resistenza) dei terreni trattati ed alleggeriti, attraverso l'esecuzione di prove di laboratorio. Le terre trattate ed alleggerite, *Lightweight Treated Soils* (LWTS), sono materiali innovativi, simili ai più noti calcestruzzi cellulari, prodotti artificialmente mescolando in determinate proporzioni materiali argillosi o limosi con elevato contenuto d'acqua, agenti schiumogeni e leganti idraulici. Con tale procedura si ottiene un materiale semiliquido di elevata lavorabilità che a presa avvenuta dà luogo ad un materiale solido di notevole porosità, leggerezza ed elevata resistenza al taglio.

Queste caratteristiche rendono i LWTS dei materiali ideali in molte applicazione di natura geotecnica, in particolare nella realizzazione di rilevati alleggeriti, come materiale di riempimento per cavità e scavi per la posa in opera di condotte, come rinterro alle spalle di opere di sostegno; essi danno luogo infatti a spinte ridotte e permettono di ottenere elevate rigidezze senza la necessità di compattazione meccanica, riducendo i tempi di realizzazione.

È inoltre significativo che la tecnologia dei LWTS permetta di riutilizzare i materiali di scavo anche in presenza di terreni argillosi o limosi di scadenti caratteristiche meccaniche che altrimenti andrebbero destinati a rifiuto in apposite cave. Pertanto l'impiego di questi materiali consente di ridurre notevolmente l'impatto ambientale, in quanto è possibile reimpiegare il terreno di scavo e abbattere i costi dovuti allo smaltimento del materiale scavato e all'acquisto e al trasporto di materiale di cava per il riempimento, in quanto può essere prodotto direttamente in sito tramite apposite apparecchiature.

I materiali LWTS sono sufficientemente trattati nella letteratura tecnica e scientifica internazionale, in cui sono reperibili alcune conoscenze che possono ritenersi consolidate:

- la riduzione della densità del prodotto si ottiene con l'aggiunta di una schiuma preformata che consente di ottenere un peso dell'unità di volume della miscela variabile tra 5 e 15 kN/m^3;
- la resistenza e la rigidezza del prodotto finito sono generalmente crescenti con la densità; la resistenza non confinata, q_u, è variabile tra 40 e 500 kPa, mentre la rigidezza è compresa tra 100 e 200 q_u.

Le caratteristiche di leggerezza si ottengono quindi tramite l'aggiunta di una schiuma preformata alla miscela. Gli agenti schiumogeni più diffusi sono le soluzioni a base di

acqua e tensioattivi quali detergenti, agenti umettanti ed emulsionanti. Tali sostanze hanno la proprietà di abbassare la tensione superficiale di un liquido, nel caso in questione dell'acqua, aumentando la bagnabilità delle superfici, e quindi la stabilità delle bolle. Le bolle d' aria presenti nella schiuma restano intrappolate nel materiale e così ne aumentano la porosità e ne riducono la densità.

Mix design

Nel progettare la miscela (mix design) per ottenere un terreno trattato ed alleggerito (LWTS) è necessario impostare i valori di progetto, in modo da garantire la giusta viscosità e fluidità del terreno necessarie durante la posa in opera e adeguati valori di resistenza e peso dell'unità di volume richiesti dalle esigenze di progetto.

Dati i diversi elementi coinvolti nelle varie fasi del trattamento, i parametri di mix design sono molteplici. Poiché si propone il riutilizzo di una terra da scavo, il terreno da trattare e le sue proprietà sono fissati mentre è possibile scegliere il tipo di cemento e di schiuma.

Per realizzare il materiale il terreno viene sciolto ad un elevato contenuto d'acqua per ottenere un fango miscelabile con gli altri elementi, pertanto il primo parametro di trattamento è il contenuto d'acqua del fango, $\mathbf{w_{slurry}}$, generalmente compreso tra 1.5 e 3 volte il limite liquido del terreno, w_L.

Il legante idraulico viene aggiunto sotto forma di boiacca per assicurare una maggiore omogeneità e un'adeguata idratazione del cemento, per cui è necessario stabilire il rapporto in peso acqua/cemento, $\mathbf{w_c/c}$, della boiacca.

La quantità di boiacca aggiunta al fango è quantizzata sulla base del rapporto tra il peso secco di cemento e il peso secco di terreno, **c/s**. In tal modo, fissato il peso secco di terreno da trattare è noto il peso di cemento necessario per il trattamento e, dato il rapporto acqua/cemento, il peso della boiacca da aggiungere.

Per realizzare una terra cementata e alleggerita alla miscela di fango e boiacca viene aggiunta una schiuma preformata, il volume di schiuma da utilizzare nel trattamento è quantizzato con il parametro $\mathbf{n_f}$, definito come il rapporto tra il volume di schiuma aggiunto, V_{foam}, ed il volume di miscela idealmente prodotto, V_{TOT}, ottenuto addizionando i volumi di fango, boiacca e schiuma. L'aggiunta di schiuma alla miscela di fango e boiacca permette di ottenere al termine della fase di presa una terra cementata e alleggerita

Attività Sperimentale – Analisi del comportamento meccanico

La sperimentazione oggetto del lavoro di tesi è stata svolta presso il laboratorio di Ingegneria Geotecnica del dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale della scuola Politecnica e delle Scienze di Base Federico II, in collaborazione con la facoltà di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale e con lo spin-off TERRE LEGGERE s.r.l. dell'Ateneo Federico II.

L'obiettivo della sperimentazione è stato analizzare il comportamento meccanico (compressibilità, resistenza) dei terreni trattati e alleggeriti, attraverso l'esecuzione di prove di laboratorio.

La resistenza meccanica è stata investigata con prove di taglio diretto: si è studiata l'evoluzione del comportamento delle varie miscele prodotte eseguendo prove a 7 e 28 giorni di maturazione; dai risultati di tali prove è stato possibile ottenere l'inviluppo di rottura del materiale e determinare i parametri di resistenza a taglio quindi i valori di coesione drenata (c') e angolo di attrito (ϕ').

La compressibilità è stata analizzata in condizioni di consolidazione monodimensionale attraverso l'esecuzione di prove di compressione edometrica eseguendo prove a 7, 14 e 28 giorni di maturazione.

I materiali utilizzati per la realizzazione dei provini sono stati scelti in modo da ridurre il numero di variabili in gioco, in particolare è stato usato:

- ✓ terreno: Caolino Speswhite (peso specifico 25.9 kN/m^3, limite liquido 70%, limite plastico 32%);
- ✓ legante: Cemento Portland al calcare (Buzzi Unicem Tipo II/A- LL 42.5R);
- ✓ agente schiumogeno: Tensioattivo (ISOCEM - S/L EST) con concentrazione 2.5% e densità fissata a 75 gr/l.

Nell'attività sperimentale, il caolino è stato miscelato con acqua distillata ad un contenuto d'acqua gravimetrico w_{slurry}=140%, corrispondente a $2w_L$. Separatamente è stata preparata la boiacca cementizia con rapporto acqua/cemento, w_c/c, pari a 0.5.

Le prove di taglio diretto sono state eseguite su tre diverse miscele realizzate con rapporto cemento/terreno (c/s), pari al 20% con e senza aggiunta di schiuma. In particolare nei

provini con aggiunta di schiuma il rapporto (n_f) tra volume della schiuma (V_{foam}) e volume totale (V_{TOT}) è pari al 20% e al 40%.

A parità di tensione di confinamento (100 kPa), dalle prove eseguite dopo 28 giorni di maturazione è possibile osservare nel piano (τ, δ_h), *Figura 1*, che la resistenza è maggiore per il caolino cementato non alleggerito e decresce al crescere della percentuale di schiuma aggiunta. Il comportamento dei provini con schiuma è stabile, mentre per il provino cementato senza schiuma si osserva un comportamento instabile.

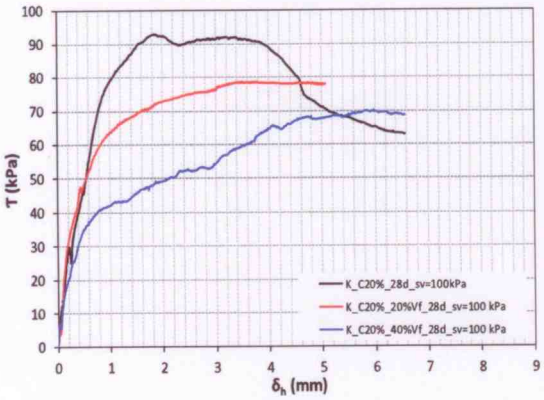

Figura 1: Effetto della cementazione e della % di schiuma sulla resistenza.

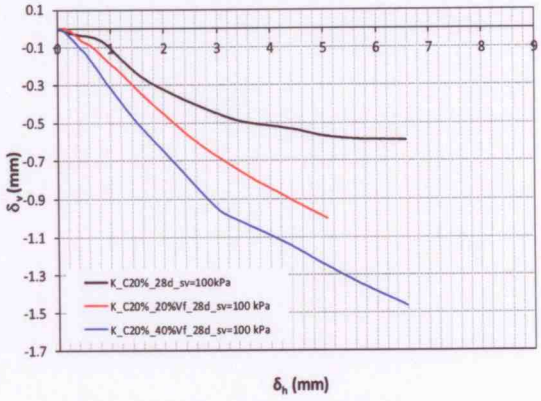

Figura 2: Effetto sul comportamento deformativo

Dal punto di vista volumetrico, nel piano (δ_h, δ_v), *Figura 2,* si osserva per tutti i campioni un comportamento contraente, quindi le miscele si riducono di volume per effetto della tensione tangenziale applicata.

Volendo valutare l'effetto del tempo di maturazione si riportano nel piano (τ, δ_h) i risultati delle prove dopo 7 e 28 giorni di maturazione alla tensione di confinamento di 100 kPa per le miscele realizzate con rapporto cemento/terreno (c/s) pari al 20%, con aggiunta di schiuma, n_f =40%, *Figura 3*, e senza aggiunta di schiuma, *Figura 4*.

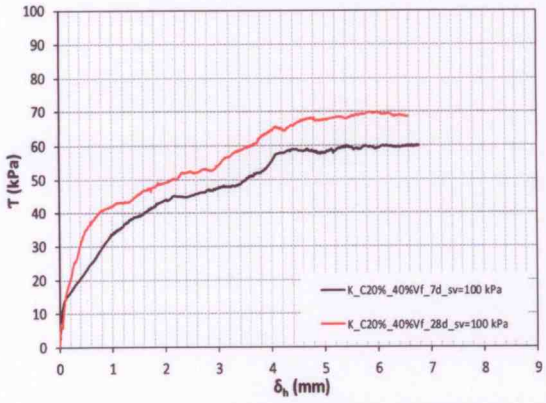

Figura 3: Effetto del tempo di maturazione - K_C20%_40%Vf

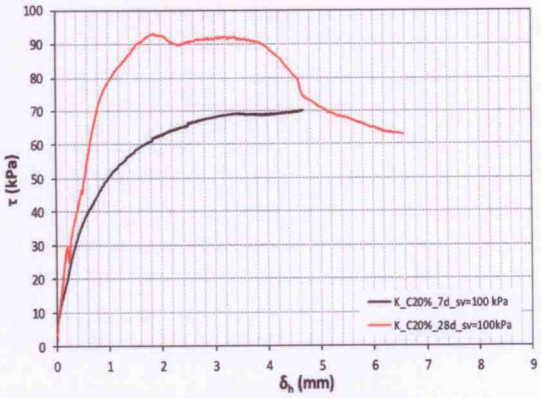

Figura 4: Effetto del tempo di maturazione - K_C20%

In entrambi i casi è possibile osservare che all'aumentare del tempo di maturazione si registra un valore di resistenza (τ) maggiore, stessa considerazione può farsi per la rigidezza.

I campioni con schiuma esibiscono un comportamento stabile, i campioni cementati non alleggeriti mostrano un comportamento stabile a 7 giorni di maturazione che diventa instabile a 28 giorni di maturazione.

Le prove di compressione edometrica sono state eseguite su miscele realizzate con rapporto cemento/terreno (c/s) pari al 20%, con e senza aggiunta di schiuma. Nei provini con aggiunta di schiuma il rapporto (n_f) tra volume della schiuma (V_f) e volume totale (V_{TOT}) è pari al 20% e al 40%. Inoltre sono state realizzate due miscele con rapporto cemento/terreno (c/s) pari al 40%, con e senza aggiunta di schiuma. Nei provini con aggiunta di schiuma il rapporto (n_f) è pari al 40%.

Volendo valutare l'effetto della schiuma sul trattamento si riportano confronti a 28 giorni di maturazione su campioni caratterizzati da diversi rapporti cemento/terreno, 20% e 40% e stessa percentuale di schiuma, pari al 40%.

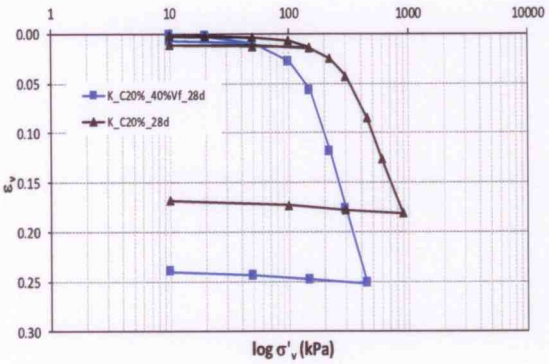

Figura 5: Effetto della schiuma c/s=20%

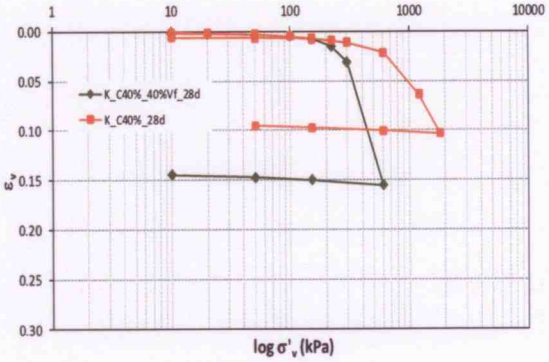

Figura 6: Effetto della schiuma c/s=40%

Dal confronto delle miscele con c/s pari al 20%, *Figura 5*, si osserva che il materiale con schiuma già a basse tensioni (100 kPa) esibisce maggiori deformazioni, segno che tale miscela si sta avvicinando alla tensione di sovraconsolidazione che risulta essere la metà di quella della miscela cementata non alleggerita. Confrontando le miscele con contenuto di cemento del 40%, *Figura 6*, si nota nella fase iniziale un stesso comportamento deformativo fino alla tensione di 100 kPa, dopodiché il provino cementato non alleggerito presenta una minore compressibilità. Anche in questo caso la tensione di

sovraconsolidazione del provino cementato non alleggerito è molto maggiore, circa il doppio, rispetto alla tensione di sovraconsolidazione del materiale cementato e alleggerito.

Conclusioni

L'indagine sperimentale presentata ha permesso di studiare alcuni degli effetti del trattamento a base di cemento e schiuma sul comportamento meccanico delle terre trattate e alleggerite (LWTS) preparate con inerte fine.

Dalle prove di taglio diretto è emerso che all'aumentare del tempo di maturazione si registrano valori di resistenza (τ) maggiori, a prescindere dalla miscela. La resistenza è maggiore nei campioni cementati non alleggeriti e decresce all'aumentare della percentuale di schiuma in quelli alleggeriti.

Le prove di compressione edometrica hanno mostrato che all'aumentare del tempo di maturazione cresce la tensione di sovraconsolidazione delle diverse miscele. Tale tensione aumenta con la percentuale di cementazione e diminuisce al crescere della percentuale di schiuma aggiunta a stessi rapporti in peso cemento/terreno.

Si riportano in *Tabella 1*, per le diverse miscele, dopo 7 e 28 giorni di maturazione, i valori di coesione drenata (c') e dell'angolo d'attrito (φ') di picco, ottenuti nel piano di Mohr (τ, σ'_v) tracciando la retta di regressione lineare dei dati ottenuti dalle prove e i valori di tensione di sovraconsolidazione (σ'_{vp}), determinata attraverso il metodo di Casagrande.

Mix	Maturazione (giorni)	c' (kPa)	φ' (°)	σ'_{vp} (kPa)
K_C20%	7	23.9	25.8	236
	28	43.4	24.4	312
K_C20%_20%Vf	7	30.6	21.8	186
	28	22.3	28.5	-
K_C20%_40%Vf	7	13.9	24.9	-
	28	12.6	26.6	162
K_C40%	7	62.6	37.2	721
	28	74.2	39.3	740
K_C40%_40%Vf	7	24.7	26.5	144
	28	35.8	27.1	282

Tabella 1: Coesione drenata, angolo di resistenza a taglio e tensione di sovraconsolidazione.