

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA, GEOTECNICA E

AMBIENTALE

SOMMARIO DELL'ELABORATO DI LAUREA

**"Compressibilità edometrica di terreni parzialmente saturi"**

RELATORE  
PROF. GIANFRANCO URCIUOLI  
CORRELATORE  
ING. RAFFAELE PAPA

CANDIDATO  
ALESSIA AMABILE  
518/712

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

Per anni, lo studio del comportamento meccanico delle terre è stato limitato al caso dei terreni saturi o asciutti, sebbene fosse già noto che il terreno può trovarsi in stato di parziale saturazione. Questa condizione ricorre anzi con grande frequenza nella realtà: basti pensare a tutti quei terreni posti al di sopra del pelo libero della falda.

Obiettivo del presente elaborato di laurea è dimostrare come la condizione di parziale saturazione non vada trascurata, date le sue influenze di notevole interesse in ambito progettuale.

A questo scopo sono state condotte alcune prove sperimentali su terreni non saturi presso il Laboratorio di Geotecnica del D.I.G.A. dell'Università degli Studi di Napoli Federico II; i risultati di tali prove sono stati analizzati ed interpretati anche alla luce di precedenti sperimentazioni svolte presso lo stesso Laboratorio. Successivamente tali dati sono stati adoperati per l'analisi di un problema al finito svolta presso la Strathclyde University of Glasgow, in particolare per il calcolo della spinta su un muro di sostegno attraverso l'applicazione dei teoremi dell'analisi limite.

I terreni parzialmente saturi si presentano più complessi da studiare rispetto ai terreni saturi o asciutti; nell'approccio tradizionale il terreno è infatti schematizzato come un mezzo bifase, costituito dallo scheletro solido e da un fluido di porosità, che può essere l'aria nel caso dei terreni asciutti o l'acqua per i terreni saturi. In questo caso è valido il principio delle tensioni efficaci di Terzaghi. I terreni parzialmente saturi vanno invece schematizzati come mezzi trifase, poiché all'interno dei pori sono presenti contemporaneamente entrambi i fluidi. È dunque necessario definire due nuove variabili tensionali:

- Suzione di matrice,  $s = u_a - u_w$ ;
- Tensione netta,  $\sigma_n = \sigma - u_a$ .

La suzione in particolare ha un ruolo molto importante nella meccanica dei terreni parzialmente saturi; essa è relazionata al contenuto d'acqua tramite la curva di ritenzione, rappresentata generalmente nel piano  $s, S_r$  oppure  $s, \theta$ .

Obiettivo della sperimentazione svolta è stata la determinazione della curva di ritenzione per un provino sottoposto a un carico assiale non nullo, in particolare pari a 36 kPa: questo valore è infatti prossimo al carico al quale è sottoposto un elemento del materiale in esame posto a una profondità di circa 2,5 m. Il materiale utilizzato nella sperimentazione è stato già ampiamente analizzato presso lo stesso Laboratorio; si tratta in particolare di una piroclastite campana, che dall'analisi granulometrica è risultata essere una sabbia con limo debolmente ghiaiosa.

Le prove sono state svolte in un edometro a suzione controllata progettato e realizzato presso il D.I.G.A. Il provino è alloggiato all'interno di una cella parzialmente riempita di acqua; è confinato da un anello edometrico e poggiato su una piastra porosa ad alto valore di ingresso d'aria, attraverso la quale è collegata con il circuito di drenaggio.

La macchina sfrutta la tecnica della traslazione degli assi per il controllo della suzione, basata sull'applicazione di incrementi uguali di  $u_a$  e  $u_w$  al fine di mantenerne la differenza invariata portando però  $u_w$  a valori positivi, per evitare il problema della cavitazione all'interno dei circuiti.

Per la misura delle variazioni di contenuto d'acqua si utilizzano due burette, delle quali una funge da riferimento, mentre l'altra è collegata al provino con un trasduttore differenziale di pressione.

È stata svolta in particolare una prova a carico costante e suzione variabile; dopo la fase di misura della suzione naturale del provino, risultata pari a 14 kPa, è stato gradualmente applicato il carico assiale. Sono state poi effettuate diverse fasi di umidificazione (wetting) e essiccamento (drying), esplorando un intervallo di suzione compreso tra 3 e 25 kPa. Le variazioni di suzione sono state imposte agendo sulla pressione dell'acqua e lasciando inalterata quella dell'aria; sono state svolte in particolare le seguenti fasi:

- Umidificazione, suzione da 14 a 3 kPa;
- Essiccamento, suzione da 3 a 5 kPa;
- Essiccamento, suzione da 5 a 10 kPa;
- Essiccamento, suzione da 10 a 25 kPa.

In particolare per ciascuna fase è stato possibile diagrammare l'andamento dei cedimenti e delle variazioni di contenuto d'acqua nel tempo.

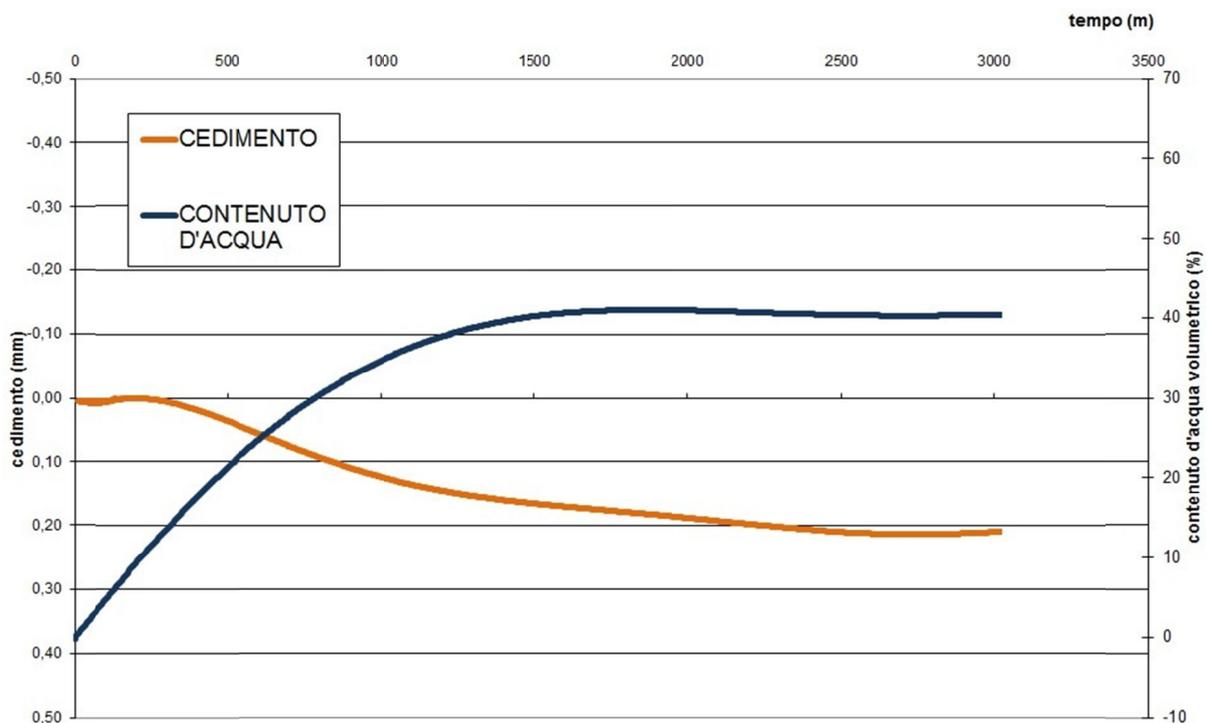


Fig. 1 – Cedimento e variazione del contenuto d'acqua nella fase di umidificazione.

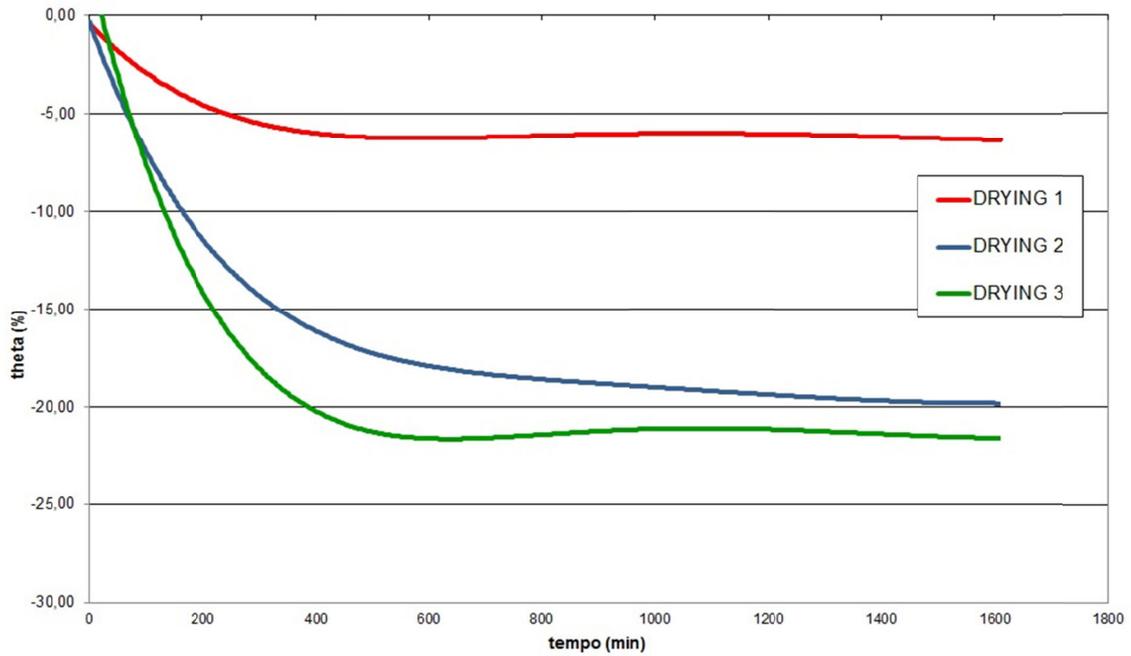


Fig. 2 – Variazioni di contenuto d'acqua nelle tre fasi di essiccamento.

I risultati ottenuti sono stati riportati nel piano  $s, \theta$  per tracciare la curva di ritenzione.

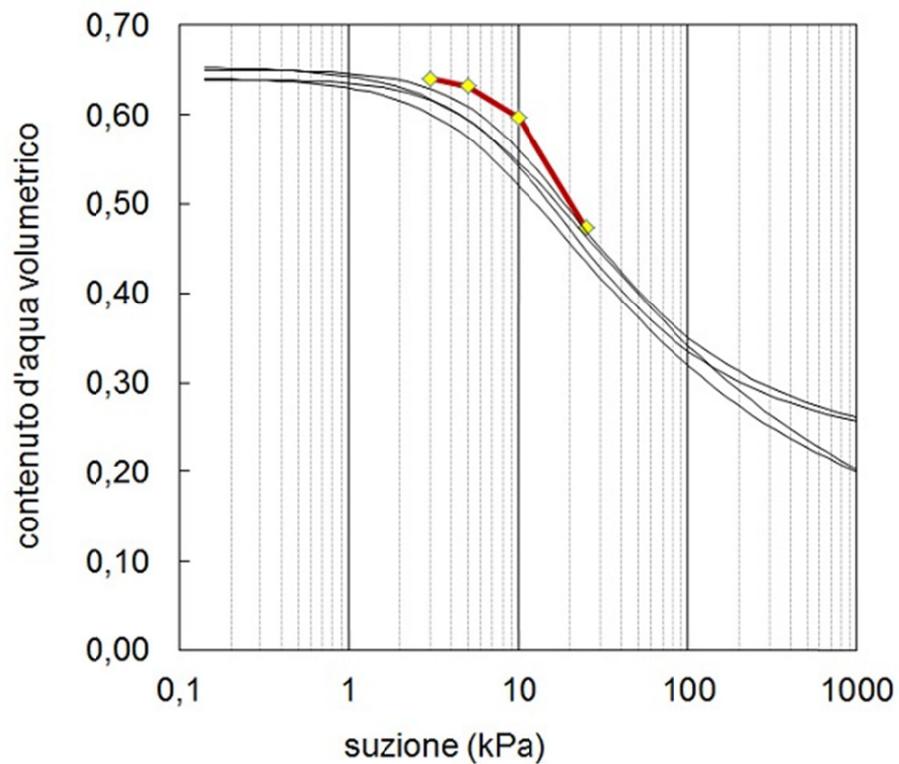


Fig. 3 – Curva di ritenzione determinata sperimentalmente.

La curva ottenuta dalla prova edometrica ( $\sigma_v = 36$  kPa) è stata confrontata con quella ottenuta da prove di evaporazione ( $\sigma_v = 0$ ): all'aumentare del carico assiale quindi il valore di ingresso dell'aria aumenta e la pendenza nella fascia centrale della curva diventa più ripida.

I dati ottenuti dalla sperimentazione sono stati adoperati per il calcolo della spinta su un muro di sostegno; in particolare la spinta è stata calcolata attraverso i metodi dell'analisi limite: mediante il teorema statico e il teorema cinematico sono stati trovati rispettivamente un limite inferiore equilibrato e un limite superiore congruente per la spinta. Avendo trovato i due limiti coincidenti, è stata determinata la soluzione esatta del problema proposto.

Per procedere all'applicazione dei teoremi è necessario stabilire un criterio di crisi per i terreni parzialmente saturi; si è fatto riferimento alla seguente formulazione:

$$\tau = (\sigma - u_w S_r) \cdot \tan \varphi'$$

Per la curva di ritenzione è stato scelto un modello esponenziale che ben si addice ai risultati sperimentali:

$$S_r = e^{-as} = e^{au_w}$$

in cui  $a$  è un parametro caratteristico del terreno.

La formula ottenuta per il calcolo della spinta in condizioni di parziale saturazione del terreno è quindi la seguente:

$$S_a = k_a \left[ \frac{\gamma_{dry} H^2}{2} + (\gamma_{sat} - \gamma_{dry}) e^{-a\gamma_w H_w} \left( \frac{e^{a\gamma_w H} - a\gamma_w H - 1}{(a\gamma_w)^2} \right) \right] + (1 - k_a) \frac{\gamma_w}{(a\gamma_w)^2} \left[ e^{a\gamma_w(H-H_w)} (a\gamma_w(H - H_w) - 1) + e^{-a\gamma_w H_w} (a\gamma_w H_w + 1) \right]$$

In cui:

- $\gamma_{dry}$  è il peso secco per unità di volume del materiale;
- $H$  è l'altezza del muro;
- $H_w$  è la profondità del pelo libero della falda rispetto al piano campagna;
- $\gamma_w$  è il peso per unità di volume dell'acqua;
- $k_a$  è il coefficiente di spinta attiva pari a  $\tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ .

A titolo di esempio è stata calcolata la spinta per un muro a mensola di altezza pari a 4 m utilizzando questa formulazione allo scopo di confrontare i risultati con quelli ottenuti attraverso la formulazione classica:

$$S_a = k_a \gamma' \frac{H^2}{2} + \gamma_w \frac{H^2}{2}$$

I risultati sono stati diagrammati al variare della profondità della falda.

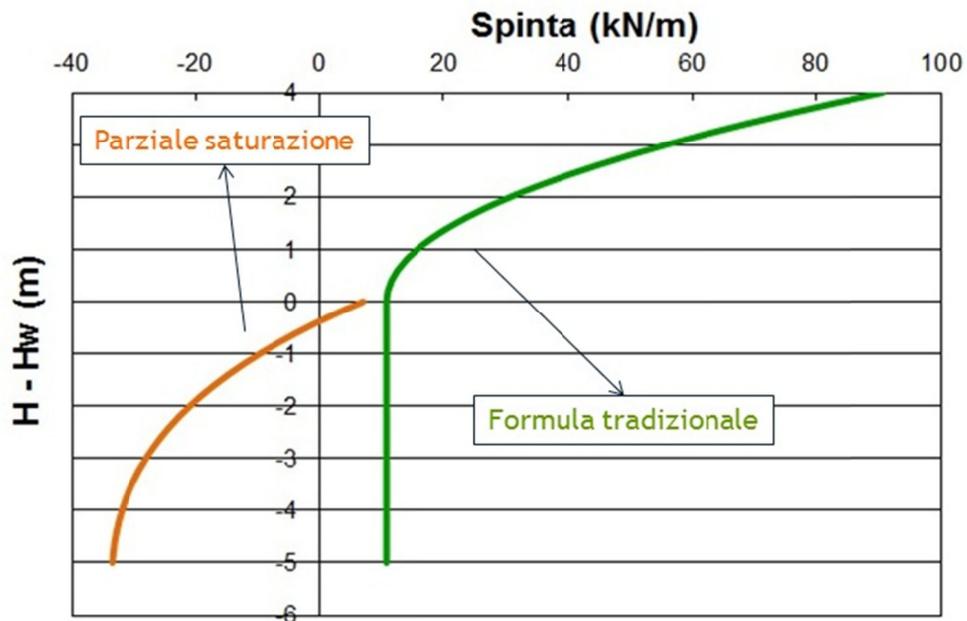


Fig. 4 – Andamento della spinta rispetto alla profondità della falda  $H_w$ .

Dal confronto tra i due grafici risulta evidente che attraverso la formulazione tradizionale la spinta viene notevolmente sovrastimata, mentre gli effetti della suzione conducono a un decremento della spinta tale che per alcuni valori di profondità della falda essa raggiunge anche valori negativi, mostrando che lo scavo può dunque autosostenersi.

I risultati conseguiti mostrano come le condizioni di parziale saturazione abbiano conseguenze di grande interesse nel campo applicativo; appare dunque ampiamente giustificato lo sviluppo di una linea di ricerca rivolta in questa direzione, sia attraverso la messa a punto di apparecchiature da laboratorio adeguate, che consentano di comprendere al meglio tutti gli effetti che la parziale saturazione può avere sulle caratteristiche idrauliche e meccaniche dei materiali, sia attraverso lo sviluppo di nuove trattazioni che, con rappresentazioni sempre più accurate delle reali condizioni al contorno, permettano di ottenere i migliori risultati anche in sede di progetto.