



**UNIVERSITA' 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 ed Ambientale*

*Anno Accademico 2009/2010*

**SOMMARIO DELL'ELABORATO DI LAUREA  
RESISTENZA DI STATO CRITICO E COMPRESSIBILITA' ISOTROPA  
DI TERRENI PARZIALMENTE SATURI**

**Relatore**  
**Ch.mo Prof. Gianfranco Urciuoli**  
**Correlatore**  
**Dott. Ing. Raffaele Papa**

**Candidata**  
**Brunella Balzano**  
**518/674**

Il presente elaborato di laurea si colloca all'interno di un più ampio percorso di ricerca svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica ed Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e dedicato allo studio e alla caratterizzazione meccanica dei terreni parzialmente saturi.

In particolar modo la presente tesi è incentrata sulla descrizione dell'attività sperimentale svolta su campioni di piroclastite prelevati dal sito sperimentale di Monteforte Irpino. La sperimentazione consiste in tre prove triassiali non sature eseguite su tre provini prelevati da altrettanti campioni del terreno 4, svolte al fine di determinare il comportamento del terreno in questione in condizioni di parziale saturazione.

Infine i risultati di tale sperimentazione sono stati utilizzati in un' applicazione ad un caso al finito, svolta presso la Strathclyde University of Glasgow, con l'intento di dimostrare l'importanza della condizione di parziale saturazione dei terreni anche nella pratica professionale.

Per anni, lo studio del comportamento meccanico dei terreni è stato limitato al solo caso dei terreni saturi o asciutti. Anche se era già noto che i terreni possono trovarsi in condizioni di parziale saturazione, solo recentemente è nata un'attività di ricerca prettamente incentrata sulla meccanica dei terreni parzialmente saturi.

Studi e ricerche condotte negli ultimi decenni hanno evidenziato che i fondamenti della geotecnica tradizionale non sempre sono idonei per la caratterizzazione del comportamento dei terreni non saturi.

La condizione di parziale saturazione si verifica molto di frequente nei problemi applicativi. Essa si può ritrovare in prossimità del piano campagna nella zona al di sopra del pelo libero della falda (detta zona vadosa), in cui la pressione dell'acqua di porosità può raggiungere valori negativi anche di migliaia di kPa.

I terreni non saturi vengono comunemente schematizzati a mezzo di un modello trifase (solido- acqua- aria) idoneo ad introdurre nuove variabili tensionali per la loro caratterizzazione.

L'aria che occupa i pori dei terreni in condizione di parziale saturazione è contenuta in piccole sacche delimitate da una superficie d'acqua detta "menisco"; la pressione dell'aria e quella dell'acqua non assumono di norma lo stesso valore ed in particolare la loro differenza prende il nome di "suzione di matrice"

$$s = (P_a - P_w)$$

La suzione è pertanto una delle variabili tensionali utilizzate per la descrizione e lo studio del comportamento dei terreni non saturi; la seconda invece è la "tensione netta"

$$\sigma_n = \sigma - P_a$$

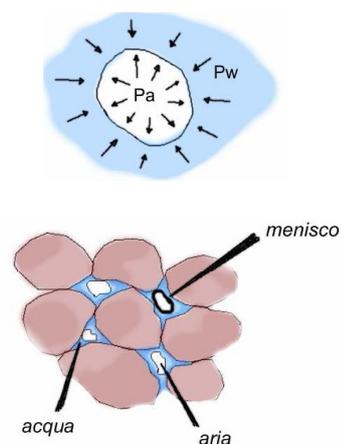


Fig.1 Schematizzazione menichi

La sperimentazione svolta per la presente tesi è consistita in tre prove triassiali non sature in cella Bishop a stress- path e suzione controllati, apparecchiatura completamente progettata presso il D.I.G.A. dell' Università degli Studi di Napoli Federico II.



Fig.2 Cella triassiale Bishop

L'apparecchiatura (Fig.2) è caratterizzata da una cella triassiale contenente il bicchiere all'interno del quale è posto il provino immerso in acqua, collegata ad altra strumentazione che gestisce le pressioni dell'acqua e dell'aria nel provino.

La macchina è stata concepita tenendo conto di tre variabili che è d'obbligo monitorare per i terreni parzialmente saturi:

- suzione
- deformazioni volumetriche
- contenuto d'acqua

In particolar modo per la misura della suzione è stata utilizzata la tecnica della

traslazione degli assi: essa consiste nell'incrementare artificialmente la pressione dell'aria al fine di traslare la pressione dell'acqua interstiziale nel campo dei valori positivi, misurabili dal trasduttore di pressione di cui la macchina è dotata. Tale tecnica si fonda su alcune osservazioni sperimentali dalle quali è stato possibile evincere che ad un incremento della pressione dell'aria al contorno di un campione corrisponde, nell'ipotesi di flusso nullo, un'uguale variazione della pressione dell'acqua al suo interno. Se quindi si deve misurare la suzione di matrice di un campione è indifferente se tale misura viene effettuata alla pressione di 1 o più atm purchè l'operazione non comporti una variazione delle deformazioni volumetriche del provino.

Le deformazioni volumetriche vengono invece monitorate con una misura di livello, utilizzando una buretta collegata con l'interno del bicchiere contenente il provino immerso in acqua.

Infine le variazioni di contenuto d'acqua sono misurate ancora una volta osservando il livello raggiunto in un sistema costituito da due burette delle quali una è collegata direttamente con il provino, mentre la seconda funge da riferimento.

Come già riportato, per la presente tesi, sono state svolte tre prove per due diversi valori di suzione applicata e tre diversi gradi di sovraconsolidazione.

A tal proposito si ricorda che il grado di sovraconsolidazione, nella pratica indicato con la sigla O.C.R. (overconsolidation ratio), è rappresentato, per definizione, dal rapporto tra il massimo stato tensionale subito dal terreno e quello attuale.

$$OCR = \frac{\sigma'_{vo}}{\sigma'_v}$$

Il grado di sovraconsolidazione può assumere valori non inferiori ad 1: se maggiore dell'unità il terreno è detto sovraconsolidato, mentre, qualora invece fosse uguale o di poco maggiore di 1, il terreno si dice normal consolidato.

Il quadro completo delle prove è riportato nella tabella seguente:

TERRENO 4							
trincea/fronte #	Campione #	Tipo di prova		Suzione applicata KPa	$w_0$	$n_0$	$(u_a - u_w)_0$ kPa
		Fase consolidazione	Fase Rottura				
trincea 7	G17	Isotropa $p - u_a = 400$ kPa	$p - u_a = 50$ kPa	20	0,622	0,711	6,4
	G15	Isotropa $p - u_a = 300$ kPa	$p - u_a = 50$ kPa	20	0,587	0,698	5,8
	G12	Isotropa $p - u_a = 650$ kPa	$p - u_a = 50$ kPa	6	0,586	0,704	5,9

Le prove si dividono in varie fasi:

- *Fase di misura della suzione*: utilizzando la tecnica della traslazione degli assi sopra citata, viene incrementata artificialmente la pressione dell'aria al fine di misurare il valore naturale di suzione del provino
- *Fase di equalizzazione*: a partire dalle condizioni iniziali del provino si applica un valore di suzione assegnato, mantenendo inalterata la pressione dell'aria e variando linearmente quella dell'acqua;
- *Fase di consolidazione*: il provino viene isotropicamente compresso mantenendo la suzione al valore raggiunto nella precedente fase, fino ad un fissato valore di tensione media netta dipendente dall'OCR stabilito per la prova. In questo modo il provino viene sovraconsolidato artificialmente. La fase termina con lo scarico del provino fino ad una tensione media netta pari a 50 kPa che verrà mantenuta costante nella successiva fase di rottura;
- *Fase di rottura*: si applica un deviatore al fine di poter misurare la resistenza.

I risultati a rottura delle tre prove sono riportati nei piani ( $q$ ,  $\epsilon_a$ ) in cui è possibile evidenziare un picco nei diagrammi, più marcato per le prove ad OCR maggiore, dopo il quale si può notare che i tre provini tendono ad una condizione di stato critico, condizione però che non è stato possibile raggiungere a causa di misure falsate della macchina dovute alle eccessive deformazioni subite da ciascun provino.

Nel secondo diagramma invece in cui i risultati sono riportati nel piano ( $\epsilon_v$ ,  $\epsilon_a$ ), è possibile notare un comportamento dilatante dei provini come è giusto che sia essendo essi stati sovraconsolidati artificialmente.

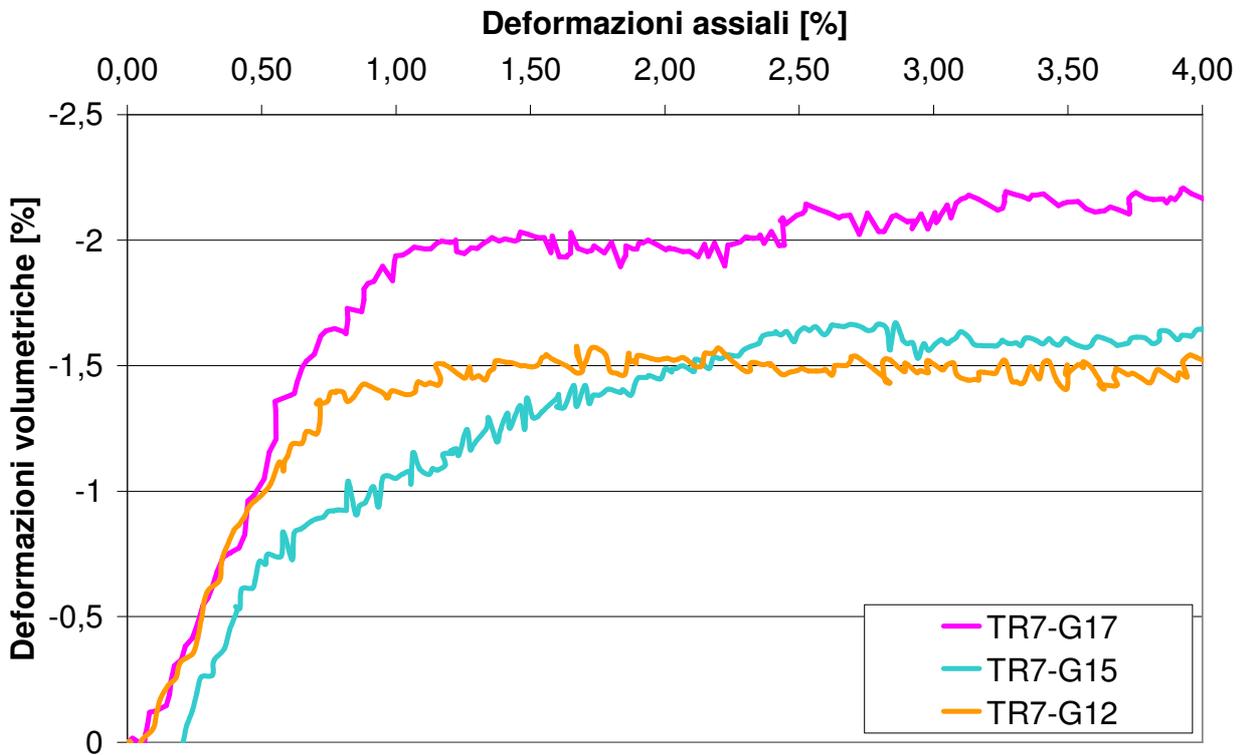
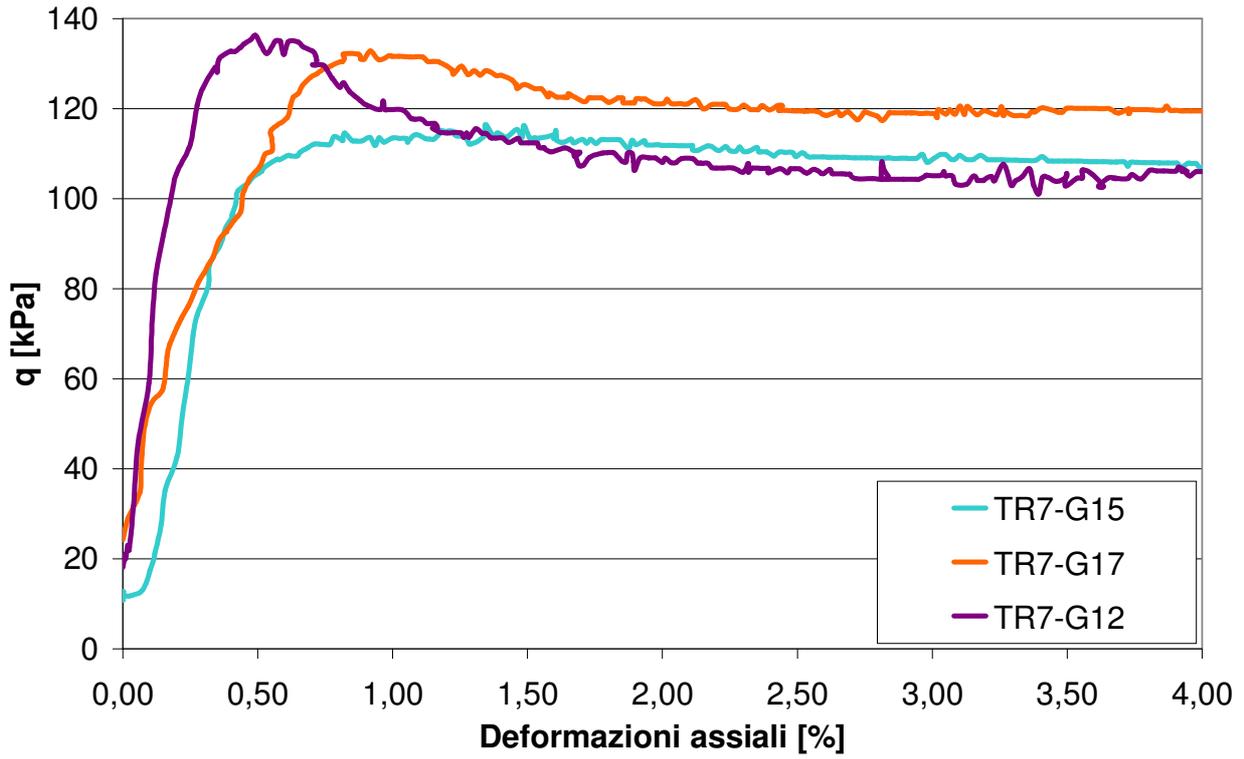


Fig.3 Risultati a rottura delle prove

Tali risultati sperimentali sono infine stati utilizzati in un'applicazione ad un caso al finito, in particolare si è calcolata la spinta attiva su un muro di sostegno a gravità tenendo conto della condizione di parziale saturazione del terreno, utilizzano la teoria dell'analisi limite basata su due ipotesi fondamentali:

- Mezzo perfettamente plastico
- Flusso nullo

Si è resa necessaria, però, l'introduzione di un criterio di resistenza apposito per i terreni non saturi

$$\tau = (\sigma - u_w Sr) \tan \phi'$$

esso sfrutta un modello esponenziale appositamente scelto per la curva di ritenzione

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

L'analisi limite ricerca mediante un metodo cinematico e un metodo statico rispettivamente un limite superiore e un limite inferiore per il carico di collasso reale di una struttura.

Il teorema del limite superiore stabilisce che, se è possibile individuare un meccanismo di collasso tale che il lavoro svolto dalle forze esterne sia eguale all'energia dissipata dalle tensioni interne, si verifica la rottura e le forze esterne costituiscono un limite superiore del carico di collasso reale.

Il teorema del limite inferiore stabilisce che, se esiste una configurazione di forze esterne  $F_1$  in equilibrio con uno stato tensionale interno  $\sigma_1'$  che non violi in alcun punto il criterio di rottura del materiale, il collasso non può verificarsi e la configurazione dei carichi corrisponde a un limite inferiore di quella di rottura.

In condizioni limite generalmente si suppone che il terreno si comporti come un mezzo perfettamente plastico: sotto tale ipotesi valgono i due teoremi dell'analisi limite, che consentono quindi di individuare un intervallo entro il quale deve essere contenuto il carico di collasso reale. Studiando diverse discontinuità statiche e cinematiche e imponendo in un caso (teorema del limite superiore o metodo cinematico) le condizioni di congruenza e nell'altro (teorema del limite inferiore o metodo statico) l'equilibrio, è stato possibile ottenere la soluzione esatta per il caso in esame, nella quale limite superiore e inferiore coincidono, ossia la soluzione che soddisfa al tempo stesso congruenza ed equilibrio.

Tale soluzione consente di calcolare la spinta attiva per un terreno in condizioni di parziale saturazione utilizzando la seguente formulazione

$$Sa = \left[ \gamma_d \frac{H^2}{2} + (\gamma_s - \gamma_d) e^{-a\gamma_w H_w} (e^{a\gamma_w H} a\gamma_w H - 1) \frac{1}{(a\gamma_w)^2} \right] ka + \\ + (1 - ka) \frac{\gamma_w}{(a\gamma_w)^2} \left\{ [-1 + a\gamma_w (H - H_w)] e^{a\gamma_w (H - H_w)} + (1 + a\gamma_w H_w) e^{-a\gamma_w H_w} \right\}$$

Essa è stata diagrammata in funzione della variazione del piano di falda ed è stata confrontata con quella ottenuta dall'analisi tradizionale nella quale si utilizza la formula seguente

$$S = \gamma' k_a \frac{H^2}{2} + \frac{1}{2} \gamma_w (H - H_w)^2$$

Il calcolo della spinta è stato effettuato tenendo conto dei seguenti dati

DATI								
$\gamma_w$	$\gamma_d$	$\gamma_{sat}$	$\gamma'$	$\varphi'$	$ka$	$n$	$a$	$H$
[kN/mc]	[kN/mc]	[kN/mc]	[kN/mc]				[kPa <sup>(-1)</sup> ]	[m]
10	8,8	15,39	5,39	36,9	0,249672	0,659	0,017	5

in cui

- $\gamma_w$  è il peso specifico dell'acqua;
- $\gamma_d$  è il peso secco nell'unità di volume;
- $\gamma_{sat}$  è il peso nell'unità di volume saturo;
- $\varphi'$  è l'angolo di attrito del terreno;
- $ka$  è il coefficiente di spinta attiva;
- $n$  è la porosità del terreno;
- $a$  è un parametro caratteristico del terreno ricavato sperimentalmente.

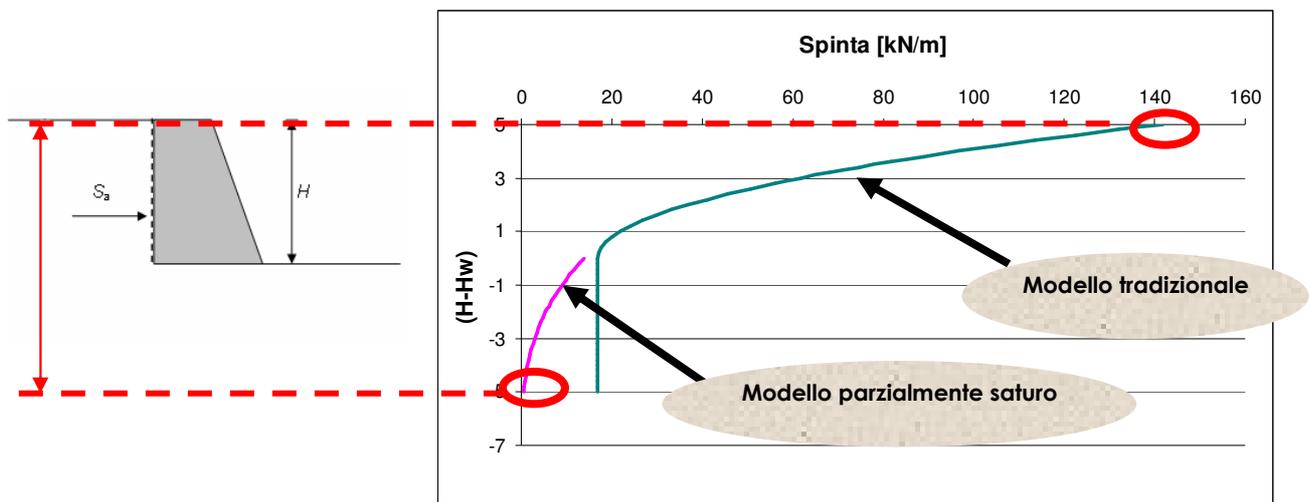


Fig.4 Spinta attiva su un muro a gravità calcolata utilizzando il modello tradizionale ed il modello parzialmente saturo

E' possibile notare come il modello tradizionale tenda a sovrastimare il valore della spinta attiva quando la falda si trova al di sotto del piano di posa del muro, mentre il modello che tiene conto della condizione di parziale saturazione mostra come lo scavo possa persino autosostenersi: ciò è reso evidente dall'annullarsi della spinta per valori di  $Hw$  di circa 9-10m.

I risultati conseguiti mostrano come le condizioni di parziale saturazione abbiano conseguenze di notevole 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.

