

Università degli studi di Napoli Federico II



FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in

**INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO**

(Classe delle Lauree in Ingegneria Civile ed Ambientale, Classe N. L-7)

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA,
GEOTECNICA E AMBIENTALE**

TESI DI LAUREA

**VARIABILI TENSIONALI EFFICACI PER I
TERRENI PARZIALMENTE SATURI**

Relatori:

Ch.mo Prof. G. Urciuoli

Dott. Ing. R. Papa

Candidate:

Filomena Spasiano Matr.N49/30

Arianna Gea Pagano Matr.N49/18

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

“Per aspera ad astra”

(Lucio Anneo Seneca)

INDICE

<u>INTRODUZIONE</u>	<u>4</u>
<u>CAPITOLO I - Basi fisiche, fasi e variabili tensionali dei terreni non saturi</u>	<u>5</u>
I.1 INTRODUZIONE	5
I.2 ANALISI DELLA ZONA PARZIALMENTE SATURA	6
I.3 INFLUENZA DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA ZONA VADOSA	7
I.4 DEFINIZIONE DI SUZIONE	8
I.5 SISTEMA A QUATTRO FASI	12
I.6 TENSIONE SUPERFICIALE	14
I.7 FENOMENO DELLA CAVITAZIONE	19
I.8 FENOMENO DELLA CAPILLARITA'	22
<u>CAPITOLO II - Misura e controllo della suzione: metodi e applicazioni</u>	<u>26</u>
II.1 CONTROLLO DELLA SUZIONE E TECNICHE DI MISURAZIONE IN LABORATORIO ED IN SITO	26
II.1.1 Suzione matriciale - tecnica di traslazione degli assi	26
II.1.1.1 Caratterizzazione idraulica - individuazione delle curve caratteristiche acqua- terreno	28
II.1.1.2 Caratterizzazione meccanica – cella triassiale a “stress-path” controllato	32
II.1.1.3 Caratterizzazione meccanica – prova di taglio diretto	37
II.1.2 Suzione osmotica - Tecnica osmotica	41
II.1.2.1 Applicazioni della Tecnica Osmotica	43

II.1.3 Confronti sperimentali tra Tecnica di traslazione degli assi e Tecnica Osmotica	44
II.1.4 Suzione Totale – Tecniche di Controllo dell’Umidità	45
II.1.4.1 Applicazioni delle Tecniche di Controllo dell’Umidità	46
II.2 STRUMENTI DI MISURA DELLA SUZIONE	48
II.2.1 Psicrometri	49
II.2.2 Metodo della carta da filtro	52
II.2.3 Metodo dei Blocchi Porosi	54
II.2.4 Sensori di conducibilità termica	56
II.2.5 Piastre di suzione e Piastre di pressione	61
II.2.6 Tensiometri	62
II.2.7 Minitensiometro ad alta capacità	64
<u>CAPITOLO 3 - Variabili tensionali per terreni parzialmente saturi</u>	68
III.1 VARIABILI TENSIONALI NEI TERRENI PARZIALMENTE SATURI	68
III.1.1 Variabili tensionali di stato secondo Bishop (1959)	68
III.1.2 Variabili tensionali di stato – Successivi sviluppi	69
III.2 TENSORI DI TENSIONE	71
III.3 INFLUENZA DELLA SUZIONE SULLA RESISTENZA A TAGLIO	74
<u>CONCLUSIONI</u>	77
<u>Bibliografia</u>	78

INTRODUZIONE

L'obiettivo della tesi è di approfondire lo studio sul comportamento meccanico dei terreni parzialmente saturi, analizzando il ruolo della suzione. Quest'ultima viene definita dal punto di vista meccanico e termodinamico, approfondendo il ruolo della pressione dei fluidi di porosità, anche con l'ausilio di semplici schemi particellari, e definendo le variabili tensionali significative per lo studio dei mezzi non saturi.

La suzione assume una notevole rilevanza in ambito geotecnico in quanto, in sito, le caratteristiche dei terreni assumono quasi sempre configurazioni intermedie tra le più generali di terreno asciutto e terreno saturo.

Da un'attenta indagine bibliografica, si propone una prospettiva storica volta a descrivere l'evoluzione degli approcci proposti da alcuni autori i quali, nel corso degli anni, si sono occupati dell'argomento. Vengono inoltre esaminate le prove di laboratorio e in sito necessarie per valutare la suzione di questi terreni.

Nei diversi capitoli, si sono dettagliatamente affrontate definizioni, metodologie e principi di misura della suzione, e si è svolta un'analisi globale dello stato tensionale e dei suoi effetti sulle caratteristiche meccaniche dei terreni parzialmente saturi.

.

CAPITOLO I

BASI FISICHE, FASI E VARIABILI TENSIONALI DEI TERRENI NON SATURI

I.1 INTRODUZIONE

Come sottolineato da Fredlund e Rahardjo (1993), lo studio del comportamento meccanico dei terreni è basato sull'implicito presupposto che il terreno stesso sia asciutto (0% di saturazione) o saturo (100% di saturazione, assumendo in questo caso che il suo comportamento sia disciplinato dal Principio delle Tensioni Efficaci di Terzaghi (1936). In realtà gli stati di terreno asciutto e terreno saturo sono solo due condizioni estreme, mentre in molti problemi di Ingegneria il terreno presenta un grado di saturazione intermedio. È possibile, dunque, utilizzare le conoscenze acquisite nell'ambito dei terreni saturi e quindi estenderle al mondo più ampio dei terreni parzialmente saturi.

Secondo la trattazione di Jennings e Burland del 1962 e Fredlund e Morgenstern del 1977, le variabili tensionali che governano il comportamento meccanico del terreno in caso di presenza di falda freatica sono rappresentate dalle tensioni efficaci di Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u_w$), al di sotto della falda freatica (condizione di completa saturazione), e da due variabili tensionali indipendenti, *tensione netta* ($\sigma - u_a$) e *suzione di matrice* ($u_a - u_w$), al di sopra del livello di falda (condizione di parziale saturazione).

I.2 ANALISI DELLA ZONA PARZIALEMENTE SATURA

Secondo la rappresentazione in Fig. 1.1, al di sotto della falda freatica la pressione interstiziale dell'acqua è positiva ed il terreno è saturo mentre, al di sopra di essa, la pressione interstiziale risulta essere negativa, ovvero minore della pressione atmosferica.

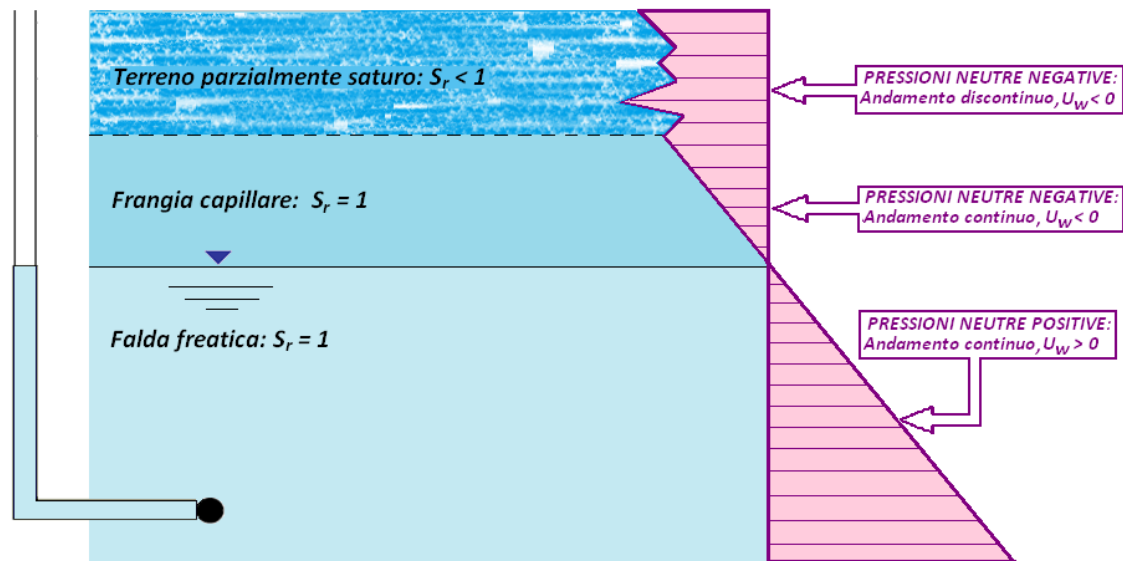


Figura 1.1 – Andamento delle pressioni neutre

La porzione di terreno al di sopra della falda è chiamata *zona vadosa* (o *parzialmente satura*): in particolare, come è illustrato in Fig. 1.2, la zona immediatamente al di sopra del livello di falda, detta *frangia capillare* poiché interessata dal fenomeno di capillarità, è caratterizzata da un grado di saturazione che si avvicina al 100% (maggiore dell'85 %) ed ha uno spessore variabile da meno di 1 metro a circa 10 metri a seconda della tipologia di terreno (Fredlund, 1996); inoltre, la fase liquida può essere considerata continua, mentre la fase aerea è in genere discontinua. Successivamente, è possibile identificare una porzione di terreno, nella quale sia la fase aerea che quella liquida possono essere idealizzate come continue e all'interno di essa il grado si

saturatione può variare dal 20 all' 80 %, a seconda della tipologia e dello stato del terreno. Ancora al di sopra, quest'ultimo diventa progressivamente asciutto, la fase acquosa discontinua e la fase aerea continua.

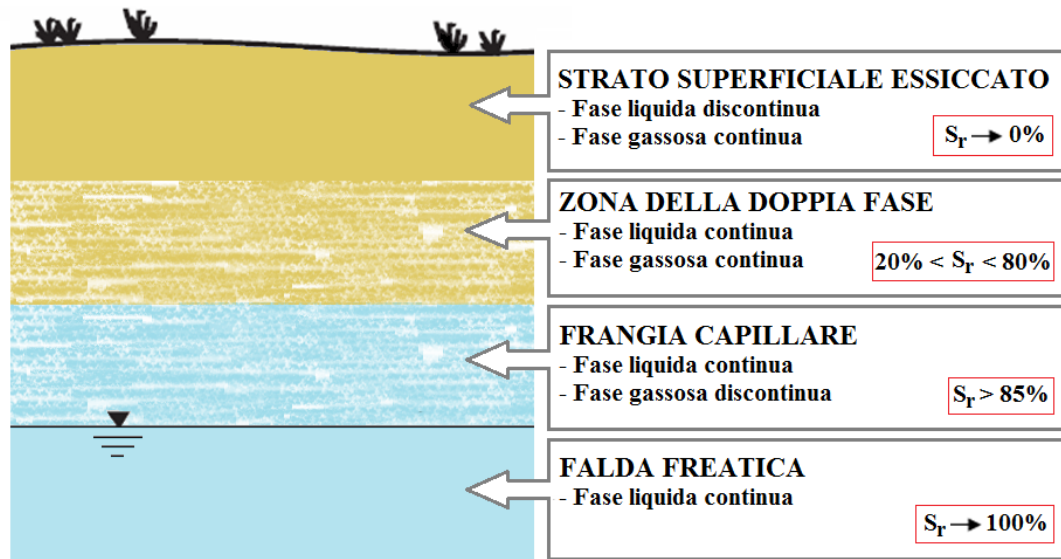


Figura 1.2 – Rappresentazione della zona satura e della zona vadosa

1.3 INFLUENZA DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA ZONA VADOSA

La posizione della falda freatica, e quindi della zona vadosa, è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche della regione in cui si trova. Se quest'ultima è arida o semi arida, il livello delle acque sotterranee si abbassa lentamente nel tempo, mentre se il clima è temperato o umido, tale livello può rimanere abbastanza vicino alla superficie del terreno.

In particolare la falda risulta essere influenzata da due tipologie di flussi di acqua: flusso verso il basso, ovvero precipitazione, e flusso verso l'alto, ovvero evaporazione ed evapotraspirazione. Indipendentemente dal grado di saturazione, la pressione dell'acqua

di porosità assume un profilo idrostatico quando il flusso dalla e alla superficie del terreno è nullo; al contrario, se il flusso è verso l'alto (ad esempio per evaporazione), l'andamento delle pressioni si sposta verso valori negativi mentre, se il flusso è verso il basso (ad esempio per infiltrazione), la pressione tende ad assumere valori positivi.

Risulta allora chiaro che nel caso di flusso verso l'alto si verifica la graduale essiccazione e disidratazione di una massa di terreno, mentre nel caso di fenomeni d'infiltrazione di acqua quest'ultimo tende a saturarsi. Inoltre erbe, alberi e piante che crescono sulla superficie del terreno sono in grado di applicare una pressione sull'acqua presente nei pori di circa 1-2 MPa (ovvero circa 10-20 atm) attraverso il fenomeno di evapotraspirazione (Dorsey, 1940): tale tensione agisce in tutte le direzioni e può facilmente superare la pressione di confinamento laterale del terreno, innescando un fenomeno di desaturazione secondario.

Dunque, i cambiamenti climatici e le caratteristiche della vegetazione inducono fenomeni di contrazione e rigonfiamento dei depositi di terreno, e cioè grandi varietà di distribuzioni delle pressioni dell'acqua dei pori in funzione della profondità. Ciò è materia di indagine geotecnica in quanto tali fenomeni influenzano in maniera considerevole le condizioni al contorno che riguardano la stabilità delle opere di ingegneria superficiali interagenti con la zona vadosa.

I.4 DEFINIZIONE DI SUZIONE

In condizioni di parziale saturazione, i pori del terreno contengono in parte aria e in parte acqua, in genere a pressioni diverse tra loro. Ciò è possibile in quanto i due mezzi sono separati da sottili membrane costituite da molecole d'acqua, dette *menischi*, che aderiscono alle particelle inglobando l'acqua di porosità, che si colloca in prossimità dei contatti interparticellari, formando una sorta di sacche, come mostrato in Figura 1.3.

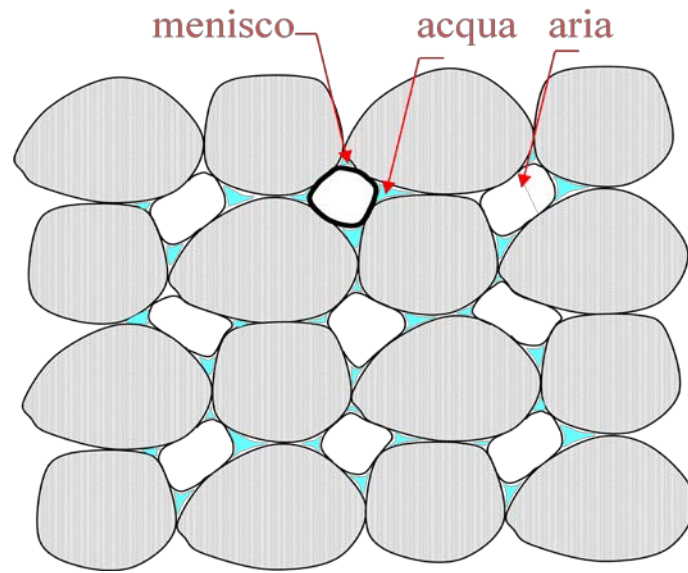


Figura 1.3 – Elemento di volume di terreno parzialmente saturo

Sono quindi i menischi che, essendo in grado di sostenere sforzi di trazione, consentono che la pressione dell'aria, u_a , possa essere maggiore della pressione dell'acqua, u_w .

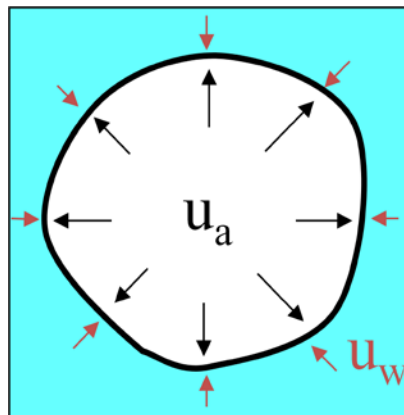


Figura 1.4 – Condizione di pressione all'interno dei menischi

La suzione ha però un'accezione più generale: è comunemente definita come la quantità di energia libera dell'acqua di porosità rapportata all'unità di volume del liquido, ed è

denominata in tal caso *suzione totale*. È evidente che all'energia libera dell'acqua contribuiscono tutte quelle grandezze che, con le loro differenze di distribuzione spaziale, determinano un possibile carico motore: quindi oltre alla pressione, anche il contenuto in ioni ed in linea teorica la densità, se la variabilità di quest'ultima fosse realmente apprezzabile. Dalla definizione appena data consegue che la suzione totale è la pressione relativa alla quale deve essere sottoposta l'acqua distillata per essere in equilibrio, attraverso una membrana semipermeabile, con l'acqua presente nel terreno. Sostituendo all'acqua distillata una soluzione del tutto simile all'acqua di porosità, la pressione di equilibrio è la suzione di matrice. La suzione totale può essere quantitativamente descritta dall'equazione di Kelvin (Sposito, 1981):

$$\psi = -\frac{R \times T}{v_{w0} \times \omega_v} \times \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad [1.1]$$

Dove ψ è la *suzione totale* [kPa], R è la costante universale dei gas [J/(mol×K)], T è la temperatura assoluta [K], v_{w0} è il volume specifico dell'acqua in [m³/Kg], ω_v è la massa molecolare del vapor d'acqua [g/mol], u_v è la pressione parziale di vapore acqueo nei pori in [kPa] e u_{v0} è la pressione di saturazione del vapore acqueo su una superficie piana di acqua pura alla stessa temperatura [kPa].

Il termine $\frac{u_v}{u_{v0}}$ si definisce *umidità relativa* RH e si misura in unità per cento.

La [1.1] a 20°C si riduce a:

$$\psi = -135022 \times \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad [1.2]$$

La suzione totale, quindi, può essere scomposta in due aliquote additive: la *suzione di matrice* ($s = u_a - u_w$), già definita e dipendente dalla pressione dell'acqua di porosità, e la *suzione osmotica* π , dipendente dalla concentrazione di ioni:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad [1.3]$$

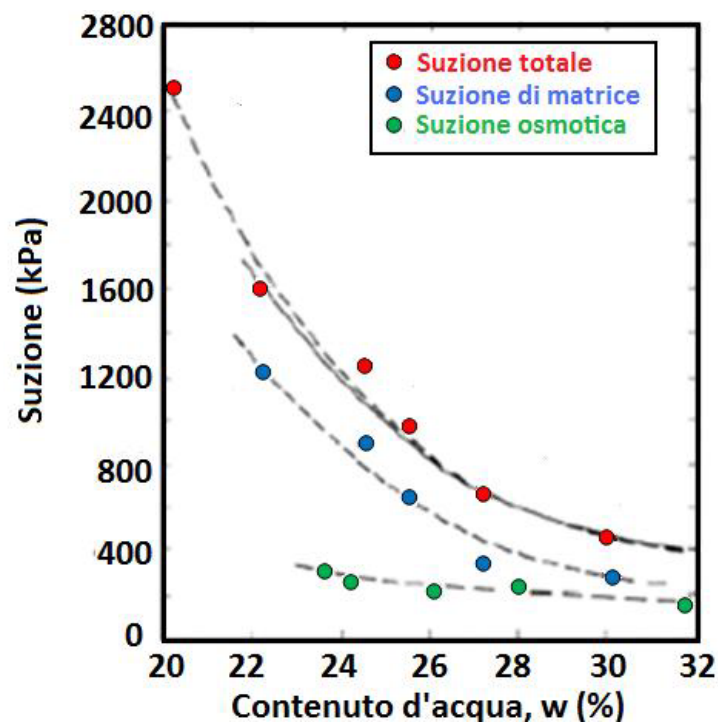


Figura 1.5 – Andamento della suzione in funzione del contenuto d'acqua

In genere, le variazioni di suzione totale sono causate da una variazione di umidità relativa all'interno del terreno, la quale può ridursi a causa della presenza di una superficie curva di acqua prodotta dal fenomeno capillare detta “concractile skin” (Fredlund e Rahardjo, 1993), precedentemente chiamata *menisco*; quest'ultimo è dotato di un raggio di curvatura che è inversamente proporzionale alla suzione di matrice.

In un materiale granulare privo di sali, la suzione totale e la suzione matriciale sono uguali ($\pi = 0$), come si evince dall'equazione precedente; se l'acqua presente nei pori contiene ioni (come avviene generalmente nel caso di terreni argillosi), la tensione di vapore u_v si riduce e la suzione totale aumenta. La tensione supplementare dovuta alla presenza di sali disciolti nel fluido di porosità viene detta *suzione osmotica* e si esprime in termini di pressione; in altre parole, essa rappresenta la riduzione di umidità relativa in un poro dovuta alla presenza di sali disciolti.

I.5 SISTEMA A QUATTRO FASI

Fredlund e Rahardjo nel 1993 sottolinearono per primi che un terreno parzialmente saturo può essere indicato come un *sistema trifase*, costituito da aria, acqua e frazione solida. Tuttavia, i risultati di recenti ricerche hanno sottolineato l'importanza del ruolo dell'interfaccia aria-acqua, già menzionata come "contractile skin", la quale può essere considerata come un'ulteriore fase se si tiene conto di alcuni meccanismi fisici. Infatti, quando la fase aerea è continua la membrana interagisce con le particelle del terreno e fornisce un'influenza sul suo comportamento meccanico. In Fig. 1.6 è schematizzato un elemento di terreno non saturo, caratterizzato da una fase aerea continua.

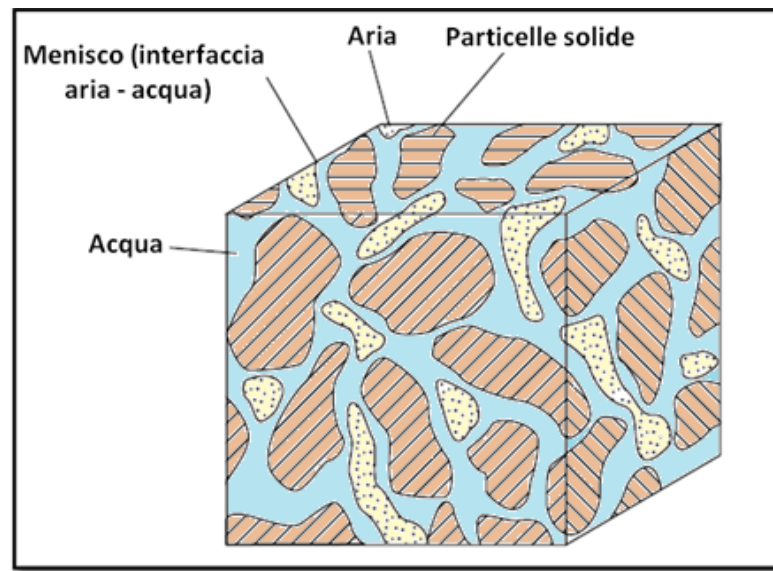


Figura 1.6 - Elemento di terreno parzialmente saturo con fase aerea continua
(Fredlund e Rahardjo, 1993)

La massa ed il volume di un sistema trifase e quadri-fase sono schematicamente rappresentati nei diagrammi di fase in Fig. 1.7.

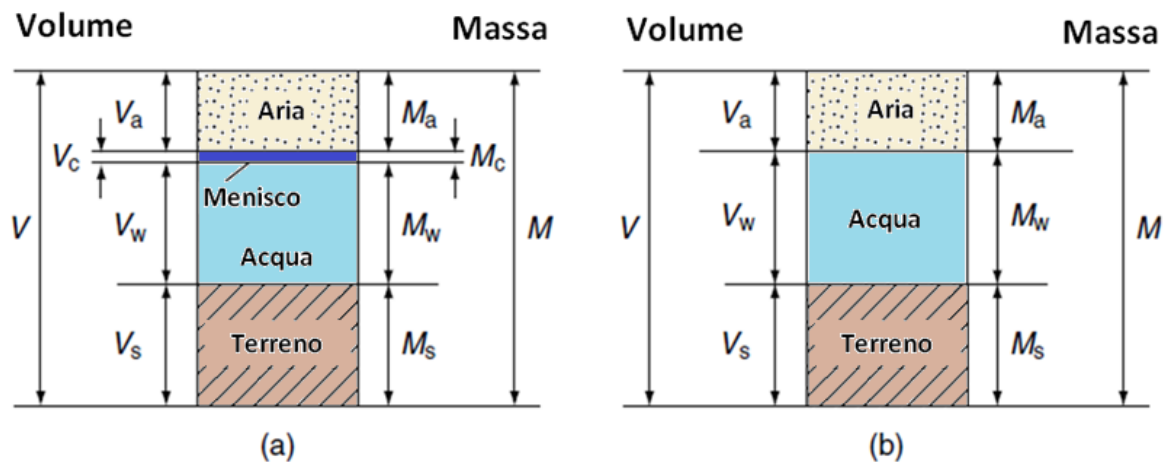


Figura 1.7 - (a) Diagramma rigoroso di un sistema quadri-fase di terreno parzialmente saturo, (b) semplificazione trifase (Fredlund e Rahardjo, 1993)

Lo spessore della membrana di interfaccia aria-acqua è dell'ordine di pochi strati molecolari; pertanto, essa può essere considerata parte della fase acquosa, senza commettere alcun errore significativo, semplificando lo schema quadrifase in uno a tre fasi.

I.6 TENSIONE SUPERFICIALE

La membrana d'interfaccia è in grado di esercitare la *tensione superficiale*; una molecola d'acqua è infatti soggetta a forze intermolecolari differenti a seconda che essa si trovi totalmente immersa nella massa d'acqua oppure solo in parte (cioè parzialmente a contatto con aria).

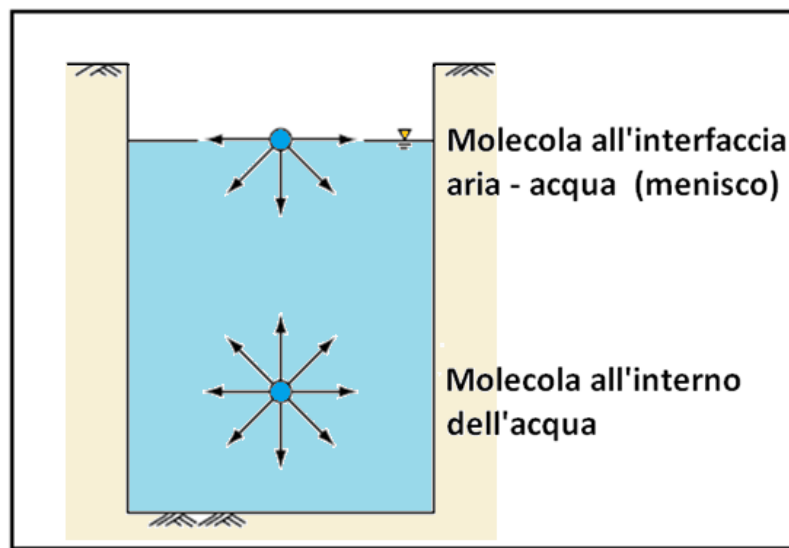


Figura 1.8 - Tensione superficiale all'interfaccia aria-acqua: forze intermolecolari

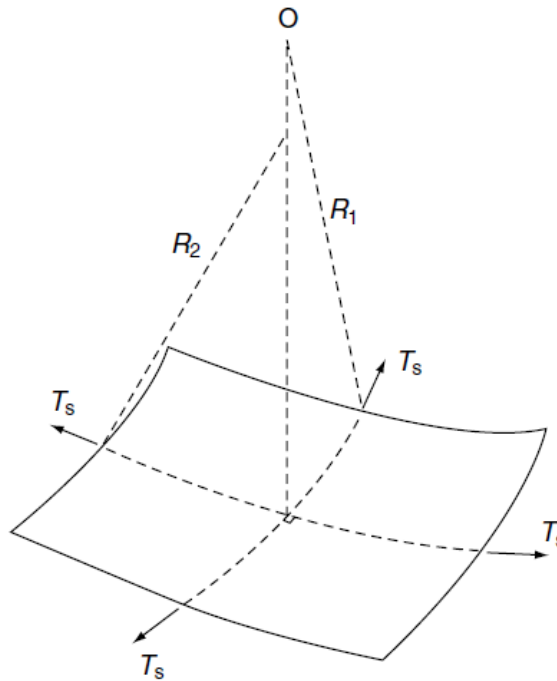
Una molecola completamente immersa in acqua è soggetta all'azione di forze uguali in tutte le direzioni (stato tensionale isotropo), il che significa che non ci sono forze non bilanciate; al contrario, una molecola d'acqua parzialmente a contatto con l'aria subisce

uno stato tensionale sbilanciato verso l'interno della massa d'acqua, per cui, affinché venga raggiunto l'equilibrio, deve necessariamente generarsi un' azione di trazione lungo l'intera membrana di interfaccia.

La proprietà del menisco di generare una tensione di trazione viene dunque definita *tensione superficiale* T_s , intesa come la forza di trazione per unità di lunghezza della membrana di interfaccia [N/m]. Essa agisce tangenzialmente alla superficie del menisco e il suo modulo diminuisce all'aumentare della temperatura, come mostrato in Tabella 1.1.

Temperatura [°C]	Tensione superficiale [mN/m]
0	75.7
10	74.2
15	73.5
20	72.75
25	72.0
30	71.2
40	69.6
50	67.9
60	66.2
70	64.4
80	62.6
100	58.8

*Tabella 1.1 - Tensioni superficiali agenti all'interfaccia aria acqua
(Kaye e Laby, 1973; Fredlund e Rahardjo, 1993)*



*Figura 1.9 - Tensione superficiale su una membrana deformata
(Fredlund e Rahardjo, 1993)*

La tensione superficiale fa sì che il menisco si comporti come una membrana elastica, cioè garantisca che la pressione interna sia maggiore di quella esterna: se una membrana bidimensionale flessibile è sottoposta a pressioni diverse dai due lati, essa deve assumere una curvatura concava verso i valori di pressione maggiore ed esercitare una tensione in modo da essere in equilibrio. La differenza di pressione attraverso la superficie curva può essere correlata alla tensione superficiale ed al raggio di curvatura della superficie stessa, nel rispetto dell'equilibrio della membrana.

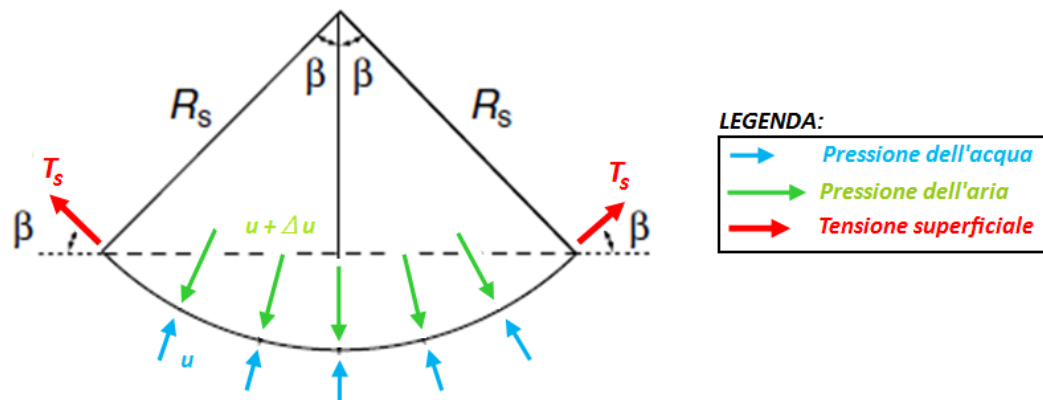


Figura 1.10 - Pressioni e tensione superficiale agenti su una superficie curva bidimensionale (Fredlund e Rahardjo, 1993)

Come mostrato in Figura 1.10, le pressioni agenti sulla membrana sono u , pressione dell'acqua, e $u + \Delta u$, pressione dell'aria; la membrana è caratterizzata da un raggio di curvatura R_s e da una tensione superficiale T_s , tangente ad essa ed inclinata di β rispetto all'orizzontale.

L'equilibrio alla traslazione orizzontale delle forze è banalmente bilanciato, mentre per l'equilibrio alla traslazione verticale deve accadere che:

$$2 T_s \sin \beta = 2 \Delta u R_s \sin \beta \quad [1.4]$$

Dove $2 R_s \sin \beta$ rappresenta la lunghezza della membrana proiettata sul piano orizzontale, su cui agiscono le Δu . Semplificando i termini si ottiene:

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad [1.5]$$

In cui Δu rappresenta la differenza di pressione attraverso una superficie curva bidimensionale di raggio R_S e tensione superficiale T_S .

Se la membrana fosse tridimensionale avremmo invece che:

$$\Delta u = T_S \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad [1.6]$$

Dove R_1 e R_2 sono i raggi di curvatura della membrana in due piani principali ortogonali. Se il raggio di curvatura è il medesimo in tutte le direzioni, ad esempio $R_1 = R_2 = R_S$, l'equazione suddetta diventa:

$$\Delta u = \frac{2 T_S}{R_S}. \quad [1.7]$$

In un terreno parzialmente saturo, il menisco è sottoposto alla pressione dell'aria u_a superiore alla pressione dell'acqua u_w ; la differenza di pressione ($u_a - u_w$) rappresenta, come sappiamo, la suzione di matrice, la quale risulta proprio pari al rapporto appena ricavato:

$$u_a - u_w = \Delta u = \frac{2 T_S}{R_S} \quad [1.8]$$

La eq. [1.8] rappresenta l'*equazione del modello capillare di Kelvin*: all'aumentare della suzione di matrice del terreno, il raggio di curvatura del menisco diminuisce; in particolare, quando la differenza di pressione tra l'aria e l'acqua presenti nei pori tende a

0, il raggio di curvatura tende ad infinito. Pertanto il menisco è di forma piana quando la suzione è nulla.

I.7 FENOMENO DELLA CAVITAZIONE

Young nel 1989 fece per primo notare che l'acqua presente all'interno dei pori del terreno è in grado di sostenere una pressione negativa molto alta (suzione); è possibile stimarne il valore tramite diversi metodi indiretti dovuti a Marinho e Chandler (1995). Tuttavia i tentativi di misurare in maniera diretta valori di suzione maggiori di 1 atm non hanno avuto molto successo fino a pochi anni fa a causa dell'innescarsi di fenomeni di cavitazione all'interno del sistema di misura.

Secondo Young, la cavitazione si definisce come *la formazione di bolle o cavità all'interno di un liquido*; la parola "formazione" si riferisce, in senso generale, sia alla creazione di una nuova cavità sia all'ampliamento di una cavità preesistente, i cui effetti macroscopici possono essere facilmente osservati.

Le bolle possono trovarsi sospese nel liquido o essere intrappolate in piccoli interspazi tra superfici liquide o ancora in particelle solide in sospensione nel liquido; esse possono contenere gas, vapore o una miscela dei due, e la loro espansione può essere bloccata riducendo la pressione dell'ambiente esterno con mezzi statici o dinamici. Se le bolle contengono gas, la loro espansione avviene per diffusione dei gas disciolti nel liquido, per diminuzione di pressione o per aumento della temperatura; al contrario, se le bolle contengono principalmente vapore la riduzione della pressione dell'ambiente a temperatura costante provoca una vaporizzazione esplosiva che genera il classico *effetto cavitazionale*, mentre un aumento di temperatura provoca il fenomeno dell'*ebollizione*.

La Tab. 1.2 riassume i quattro fenomeni di formazione e crescita delle bolle all'interno di un liquido:

Tipologia di fenomeno	Contenuto delle bolle	Modalità di crescita
CAVITAZIONE GASSOSA	Gas	Riduzione di pressione o Aumento di temperatura
CAVITAZIONE VAPOROSA	Vapore	Riduzione di pressione a Temperatura costante
DEGASAGGIO	Gas	Diffusione
EBOLLIZIONE	Vapore	Aumento di temperatura a Pressione costante

Tabella 1.2 - Fenomeni di formazione e crescita delle bolle all'interno di un liquido

La situazione è in genere più complessa di quelle illustrate, in quanto la bolla può contenere miscele di gas e vapore.

Pearsall nel 1972 osservò che in teoria un liquido vaporizza quando la sua pressione si riduce fino a raggiungere la tensione di vapore. Di conseguenza, la pressione di inizio della cavitazione è fortemente dipendente dallo stato fisico del liquido: se esso contiene grandi quantità di aria disciolta, una minima riduzione della pressione provoca l'uscita di aria dalla soluzione e la formazione di cavità nelle quali la pressione risulta essere maggiore della tensione di vapore del liquido.

Microscopicamente la cavitazione è causata dalla presenza di nuclei, elementi di dimensioni submicroscopiche in grado di evolversi in bolle a pressioni superiori della tensione di vapore. In assenza teorica di nuclei, l'acqua potrebbe resistere a pressioni dell'ordine di decine di migliaia di atmosfere (10000 atm secondo Harvey, 1947, e 15000 atm secondo Plesset, 1969), ma la probabilità che ciò avvenga è bassa a meno che le bolle non siano di dimensioni molecolari. La presenza di nuclei della dimensione di 10^{-8} cm fa sì che l'acqua sia in grado di resistere al massimo a pressioni dell'ordine delle decine di atmosfere; conseguentemente essa dovrebbe poter essere sollevata sottovuoto

ad un' altezza superiore a quella corrispondente alla pressione atmosferica tramite una pre-pessurizzazione del liquido (Hayward, 1970).

Marinho e Chandler nel 1995 osservarono che, al fine di misurare il valore di suzione di un terreno utilizzando un tensiometro, l'acqua all'interno dello strumento di misura doveva trovarsi allo stesso valore di pressione presente nei pori del terreno; ciò potrebbe dar luogo al fenomeno della cavitazione, che rende impossibile misurare valori di suzione maggiori di 1 atm.

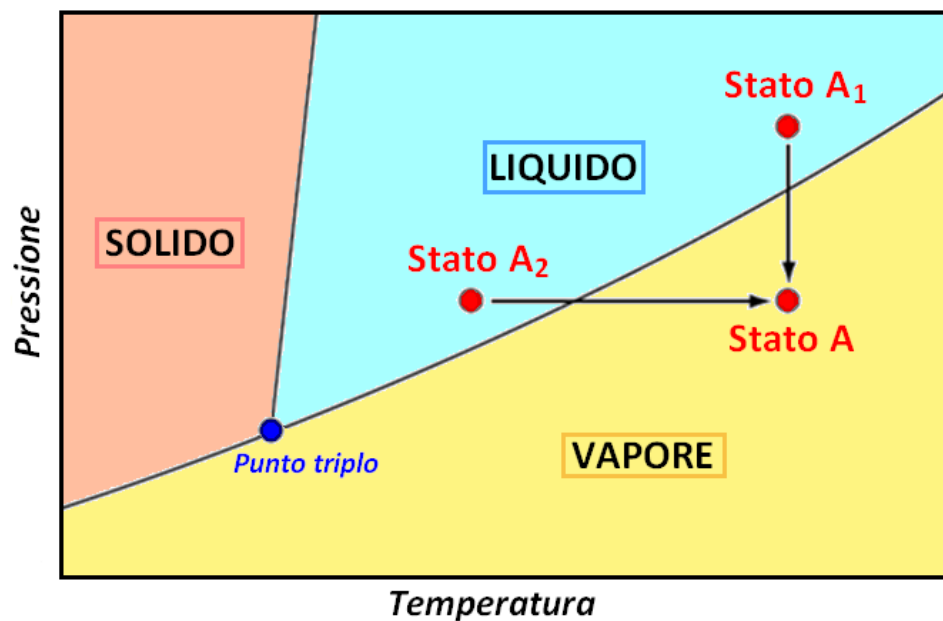


Figura 1.11 - Diagramma di fase per una sostanza semplice (Marinho e Chandler, 1995)

In Fig. 1.11 è illustrato il diagramma di fase di una sostanza semplice, il quale individua gli insiemi di coppie temperatura-pressione comuni ad uno stesso stato; in particolari circostanze, però, è possibile raggiungere lo stato A a partire dagli stati A₁ e A₂ senza che avvenga il passaggio di fase da liquido a vapore. Quando ciò accade, il sistema si dice *metastabile* (Apfel, 1970); la metastabilità del sistema si abbate se si verifica il fenomeno della *nucleazione*, cioè la *formazione di cavità di vapore all'interno del liquido stesso o presso i suoi confini* (Trevena, 1987).

È possibile per vie sperimentali evitare il fenomeno della cavitazione, e quindi misurare valori di tensione superiori ad 1 atm, procedendo alla stabilizzazione delle bolle d'aria (nuclei di cavitazione) intrappolate nelle pareti dello strumento solido. Poiché il fenomeno non è ancora totalmente chiaro, esso non può essere controllato con precisione.

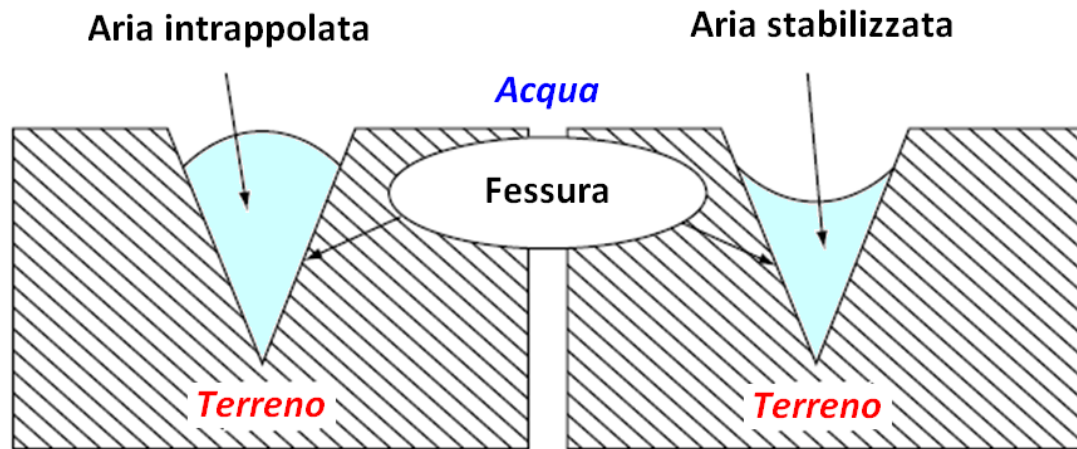


Figura 1.12 - Nuclei di cavitazione (Marinho e de Sousa Pinto, 1997)

I.8 FENOMENO DELLA CAPILLARITA'

In un classico sistema formato da terreno (particelle granulari), aria e acqua, all'interfaccia tra la fase liquida e la fase gassosa si forma un menisco tra le particelle adiacenti, analogamente a quanto accade in un tubo capillare.

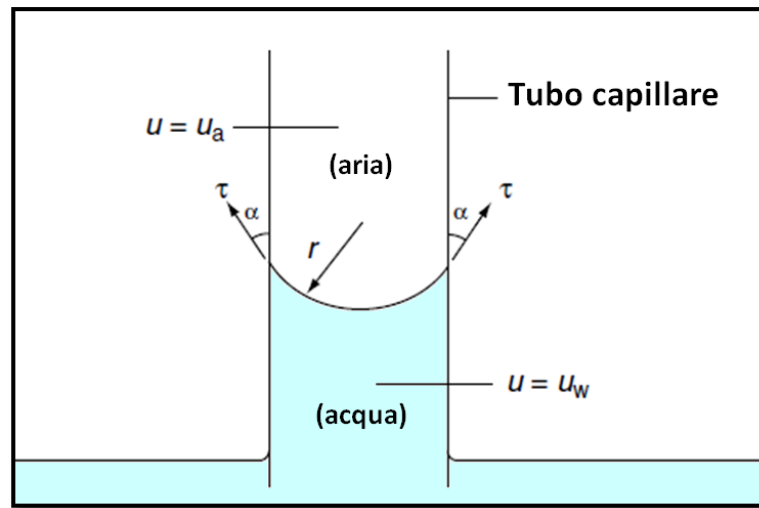


Figura 1.13 - Suzione capillare (Ridley e Wray, 1995)

Per l'equilibrio all'interfaccia aria-acqua del tubo capillare mostrato in Fig. 1.13, la forza verso il basso esercitata dall'aria deve essere uguale alla forza verso l'alto esercitata dall'acqua. La forma curva dell'interfaccia è il risultato della distribuzione di tensioni superficiali lungo la superficie bagnata del tubo; tale forza sostiene la colonna d'acqua al di sopra del livello idrico al di fuori del tubo.

Consideriamo l'equilibrio che esiste all'interfaccia aria-acqua tra le molecole d'acqua liquida e le molecole di vapore acqueo: per sfuggire dalla superficie del liquido, una molecola d'acqua deve essere dotata di un'energia maggiore o uguale al calore latente di evaporazione dell'acqua. Se lo spazio al di sopra dell'interfaccia aria-acqua è un sistema chiuso, l'equilibrio verrà raggiunto quando esso diventa saturo di molecole di vapore acqueo; se l'acqua è pura e la sua superficie è piana, la pressione parziale del vapore all'equilibrio è uguale alla pressione di vapore saturo del liquido alla temperatura del sistema. Tuttavia, la forza supplementare causata dalla tensione superficiale del menisco curvo riduce la pressione di vapore raggiunta nel sistema chiuso in equilibrio (ricordando che la tensione posseduta da una molecola d'acqua nel menisco, e cioè la

suzione, è poi direttamente connessa con l'umidità relativa RH dello spazio circostante il terreno come si evince dall'equazione [1.1]).

Per l'equilibrio alla traslazione verticale, la risultante verticale della tensione superficiale ($2 \pi r T_S \cos \alpha$) è capace di sostenere il peso della colonna d'acqua fino alla nota altezza h_c :

$$2 \pi r T_S \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho_w g \quad [1.11]$$

Dove T_S è la tensione superficiale, α è l'angolo che T_S forma con la verticale, h_c è l'altezza capillare e g è l'accelerazione di gravità. L'equazione suddetta può essere riorganizzata al fine di esprimere la massima altezza capillare h_c all'interno del tubo:

$$h_c = \frac{2 T_S \cos \alpha}{\rho_w g r} \quad [1.12]$$

Se l'angolo di contatto tra la membrana ed il tubo, nel caso in cui quest'ultimo sia pulito e l'acqua sia pura, è zero, l'altezza capillare assumerà la seguente espressione:

$$h_c = \frac{2 T_S}{\rho_w g r} \quad [1.13]$$

Il diametro del tubo rappresenta, per via teorica, la dimensione del diametro medio dei pori all'interno del terreno; dall'equazione precedente si osserva dunque che quanto più ridotti sono i pori nel terreno (procedendo dai terreni a grana grossa a quelli a grana fine), tanto maggiore sarà l'altezza di risalita capillare, come mostrato in Fig. 1.14.

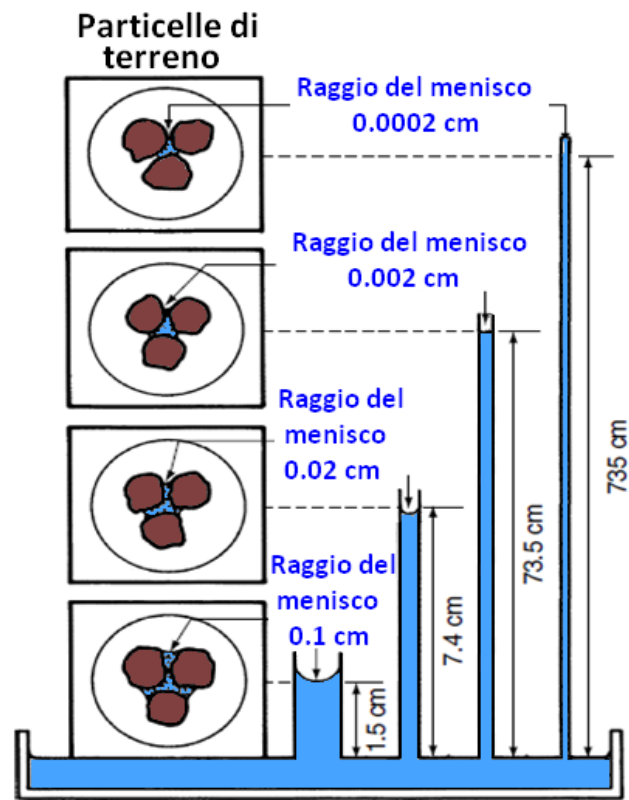


Figura 1.14 - Tubi capillari con menischi aventi differenti raggi di curvatura
(Janssen e Dempsey, 1980; Fredlund e Rahardjo, 1993)

CAPITOLO II

MISURA E CONTROLLO DELLA SUZIONE: **METODI E APPLICAZIONI**

II.1 CONTROLLO DELLA SUZIONE E TECNICHE DI MISURAZIONE IN LABORATORIO ED IN SITO

Gli studi di laboratorio sui terreni parzialmente saturi si soffermano inoltre su una questione molto importante, che riguarda il controllo e la misurazione della suzione di specifici campioni. In generale, la suzione totale può essere controllata adottando la *tecnica di controllo dell'umidità* (Esteban e Saez, 1988), la suzione matriciale utilizzando la *tecnica di traslazione degli assi* e la suzione osmotica sfruttando diverse soluzioni fluide, come fluidi di porosità, o cambiando le concentrazioni di soluto delle medesime nel terreno. Quest'ultima metodologia non viene generalmente adottata in quanto, nella maggior parte delle applicazioni di Ingegneria Geotecnica, gli intervalli di variazione delle concentrazioni sono ristretti e, di conseguenza, non si ottengono risultati significativi. Dunque, il controllo viene generalmente effettuato per suzione totale e suzione matriciale, e la tecnica maggiormente adoperata è la *tecnica di traslazione degli assi*.

II.1.1 Suzione matriciale - Tecnica di traslazione degli assi

Come sottolineato sinora, la suzione matriciale può essere considerata come una variabile importante per definire lo stato tensionale in un terreno parzialmente saturo. L'acqua è dotata di una scarsa resistenza a trazione e subisce il fenomeno della cavitazione già per valori di pressione dell'ordine di -1 atm; non appena ciò si verifica,

la fase acquosa diventa discontinua e le misure diventano inaffidabili. Poiché è necessario controllare la suzione per valori maggiori di 1 atm per numerose tipologie di terreni, Hilf nel 1956 ha introdotto la tecnica di traslazione degli assi, la quale consta nell'applicare una pressione maggiore all'aria in modo che quest'ultima accresca la pressione interstiziale dell'acqua fino a valori positivi, impedendo che la cavitazione abbia inizio.

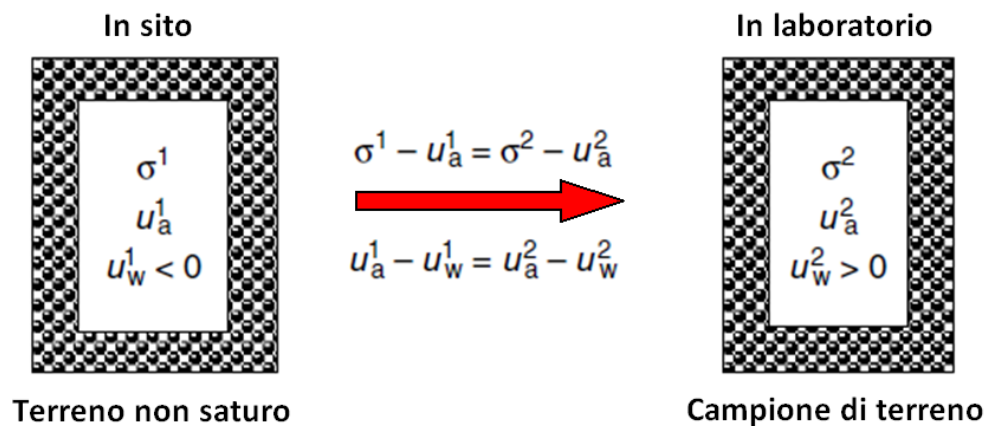


Figura 2.1 - Diagramma schematico che illustra il principio della tecnica "axis-translation" (Ng e Chen, 2005)

La tensione totale σ cresce allo stesso modo della pressione dell'aria e, di conseguenza, la tensione netta ($\sigma - u_a$) rimane inalterata. Come mostrato nella Fig. 2.1, lo stato tensionale in sito è caratterizzato da una tensione totale σ^1 , da una pressione dell'aria u_a^1 (generalmente pari a quella atmosferica) e dalla pressione dell'acqua interstiziale u_w^1 (generalmente negativa); applicando la *tecnica di traslazione degli assi*, lo sforzo totale aumenta da σ^1 a σ^2 , la pressione dell'aria nei pori da u_a^1 a u_a^2 , e la pressione dell'acqua da u_w^1 a u_w^2 (generalmente positiva). La tensione netta ($\sigma - u_a$) e la suzione matriciale ($u_a - u_w$) rimangono, al contrario, invariate. Tutto ciò consente di poter controllare la

variabile suzione, in linea di principio, in un range di gran lunga superiore al limite per un'acqua con pressione nei pori negativa.

II.1.1.1 Caratterizzazione Idraulica - Individuazione delle Curve Caratteristiche Acqua- Terreno

La tecnica descritta sinora è stata applicata con successo da numerosi ricercatori per valutare le proprietà dei terreni parzialmente saturi, nonché per misurarne le variazioni di volume e la resistenza al taglio (Fredlund e Rahardjo, 1993; Gan et al, 1988; Ng e Chiu, 2001 e 2003; Zhan, 2003; Ng e Zhou, 2005).

La *curva caratteristica terreno-acqua* (SWCC), altrimenti detta *curva di ritenzione*, rappresenta il legame tra la suzione e il contenuto d'acqua o il grado di saturazione del terreno in esame; poiché, come sottolineeremo meglio in seguito, il comportamento di un terreno parzialmente saturo è regolato dalle due variabili di stato indipendenti, tensione netta e suzione matriciale, è necessario considerare l'influenza della tensione netta sulla curva caratteristica.

La SWCC di un terreno si ottiene convenzionalmente tramite un estrattore di volume a suzione controllata. Ng e Pang nel 2000 all'Università di Scienza e Tecnologia di Hong Kong hanno messo in opera un estrattore di volume, basato sulla tecnica di traslazione degli assi, mostrato in Fig. 2.2.

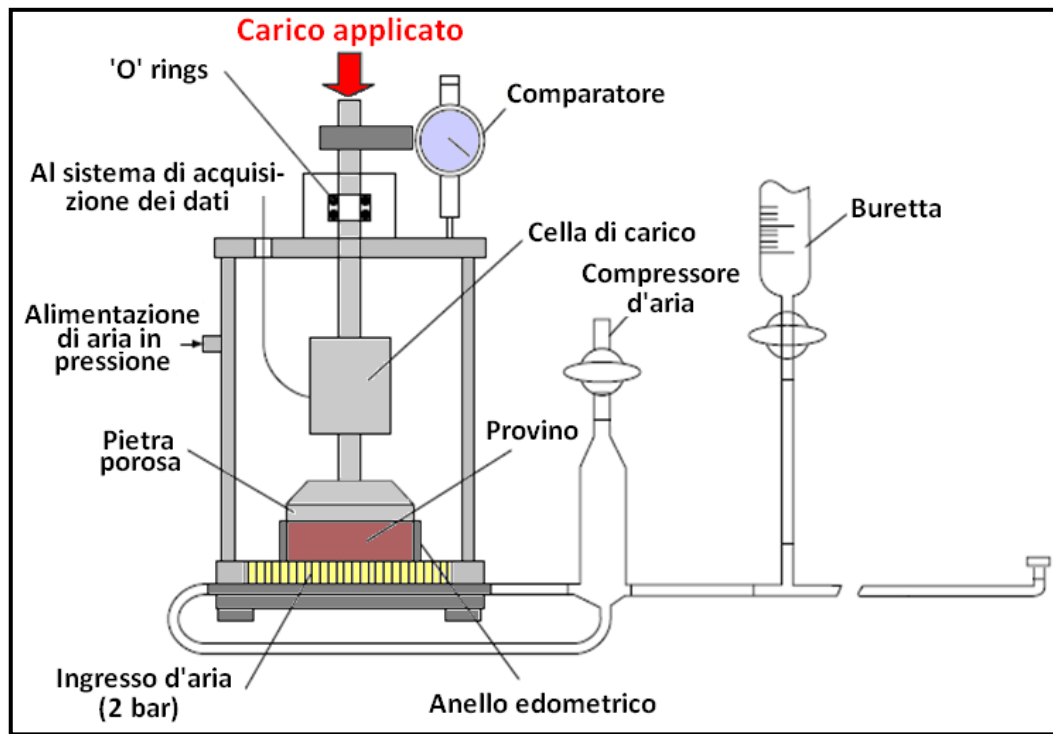


Figura 2.2 - Estrattore di volume (Università di Hong Kong, Ng e Pang nel 2000)

Questo apparecchio può essere utilizzato per ottenere la curva caratteristica sotto varie sollecitazioni verticali, nella condizione edometrica K_0 ; all'interno di una camera stagna è posto un anello edometrico, poggiato su una pietra porosa dotata di un elevato valore di ingresso d'aria. Attraverso una piastra di carico, vengono applicate delle sollecitazioni verticali al campione di terreno posto all'interno dell'anello edometrico. Al fine di eliminare gli errori causati dall'attrito, lateralmente al pistone è presente una cella di carico che, nella camera stagna, misura il carico verticale effettivo applicato al provino di terreno. Poiché in condizioni edometriche la deformazione radiale è nulla, la variazione di volume totale del campione si valuta misurandone lo spostamento verticale δ tramite un comparatore (strumento utilizzato per misure di spostamenti lineari). Con tale apparecchiatura è possibile ricavare inoltre le curve caratteristiche in funzione delle condizioni di stato del campione (SDSWCC).

La Fig. 2.3 (a) mostra una tipica curva caratteristica; il valore di suzione corrispondente al punto B si definisce *valore di ingresso d'aria*, e rappresenta il valore di suzione superato il quale il grado di saturazione del campione diminuisce rispetto al valore iniziale unitario. Al di sotto di esso il Principio delle Tensioni Efficaci di Terzaghi è da considerarsi ancora valido. L'andamento presenta una evidente *isteresi idraulica*, in quanto il percorso di umidificazione C – D – A, o wetting, ottenuto per aumento del grado di saturazione e diminuzione della suzione, non coincide con quello di essiccamento A – B – C, o drying; è possibile inoltre osservare che il grado di saturazione può restare sensibilmente inferiore all'unità anche per valori nulli di suzione. Questa isteresi idraulica, evidente nella curva caratteristica, influenza il comportamento meccanico del terreno non saturo in quanto varia l'effetto della suzione sullo scheletro solido.

La Fig. 2.3 (b) mostra l'influenza dello stato tensionale applicato sulle caratteristiche idrauliche di un campione di terreno di natura vulcanica (CDV). Le tre curve sono infatti riferite a tre differenti valori di carico (0 kPa, 40 kPa e 80 kPa), rispetto ai quali non variano significativamente le dimensioni dei cicli di isteresi. Le curve percorse in essiccamento (cioè per aumento di suzione) ed in umidificazione (cioè per diminuzione di suzione) risultano in genere distinte poiché, a parità di suzione, il contenuto d'acqua raggiunto nel secondo tipo di percorso risulta inferiore. Tale fenomeno è analogo al precedente (*isteresi idraulica*): in particolare, la relazione ottenuta per de-saturazione a partire da $S_r=1$ viene detta *curva principale di drying*, mentre quella ottenuta per umidificazione a partire da materiale secco viene definita *curva principale di wetting*.

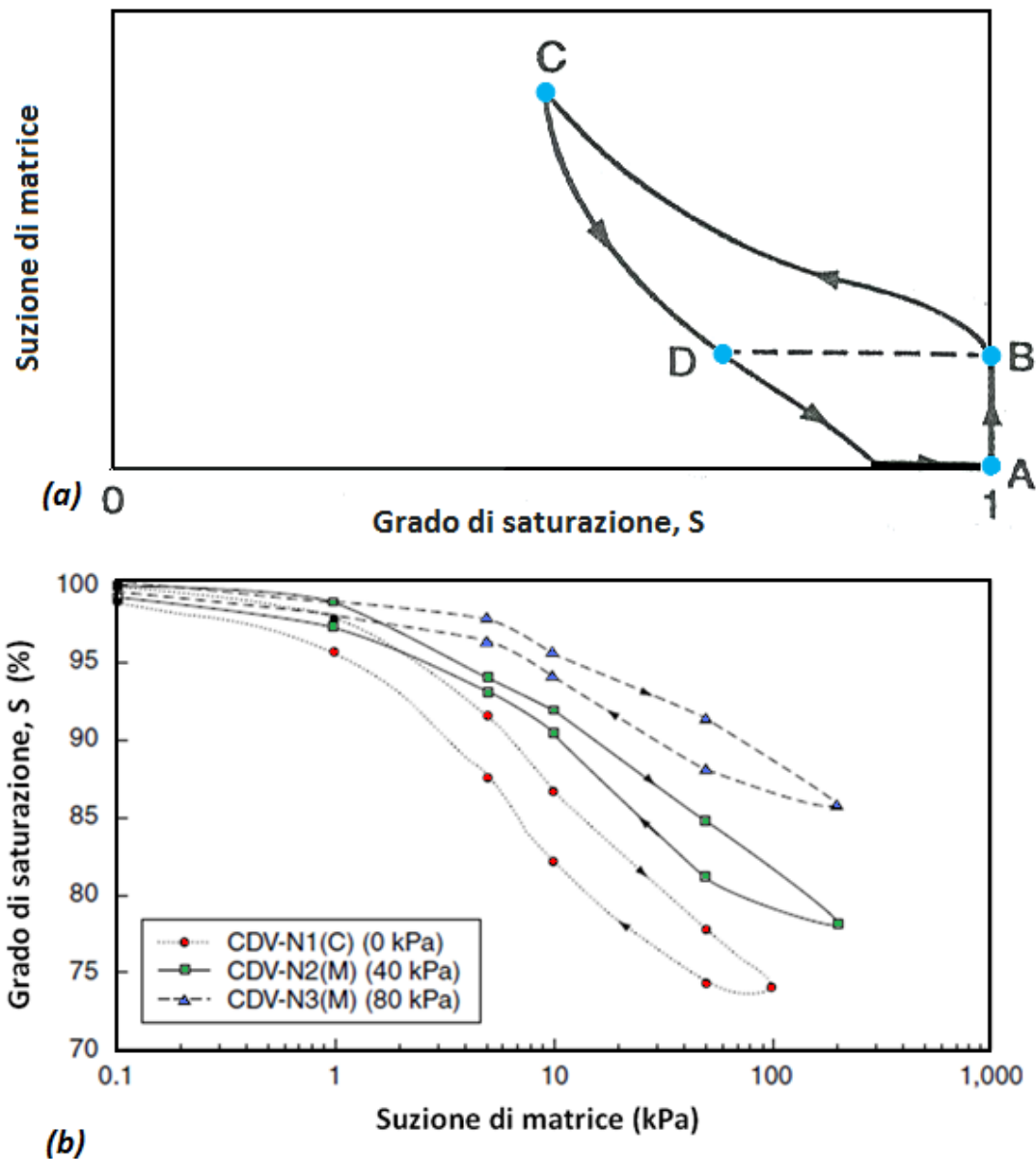


Figura 2.3 – (a) Influenza dell'isteresi idraulica in un ciclo di drying-wetting condotto a tensione costante (Wheeler e Karube, 1996; (b) Influenza dello stato tensionale sulle caratteristiche di un campione di CDV (Ng e Pang, 2000; Ng e Chen, 2005)

I campioni soggetti ad una tensione applicata maggiore posseggono un valore d'ingresso d'aria leggermente più alto e tassi di essiccamento e umidificazione più bassi, a causa della più evidente riduzione del volume dei pori.

II.1.1.2 Caratterizzazione Meccanica – Cella Triassiale a “Stress-Path” controllato

La prova triassiale e la prova di taglio diretto costituiscono le prove più comunemente utilizzate per stimare la resistenza a taglio.

La Fig. 2.4 illustra una cella triassiale basata sulla tecnica di traslazione degli assi per terreni parzialmente saturi.

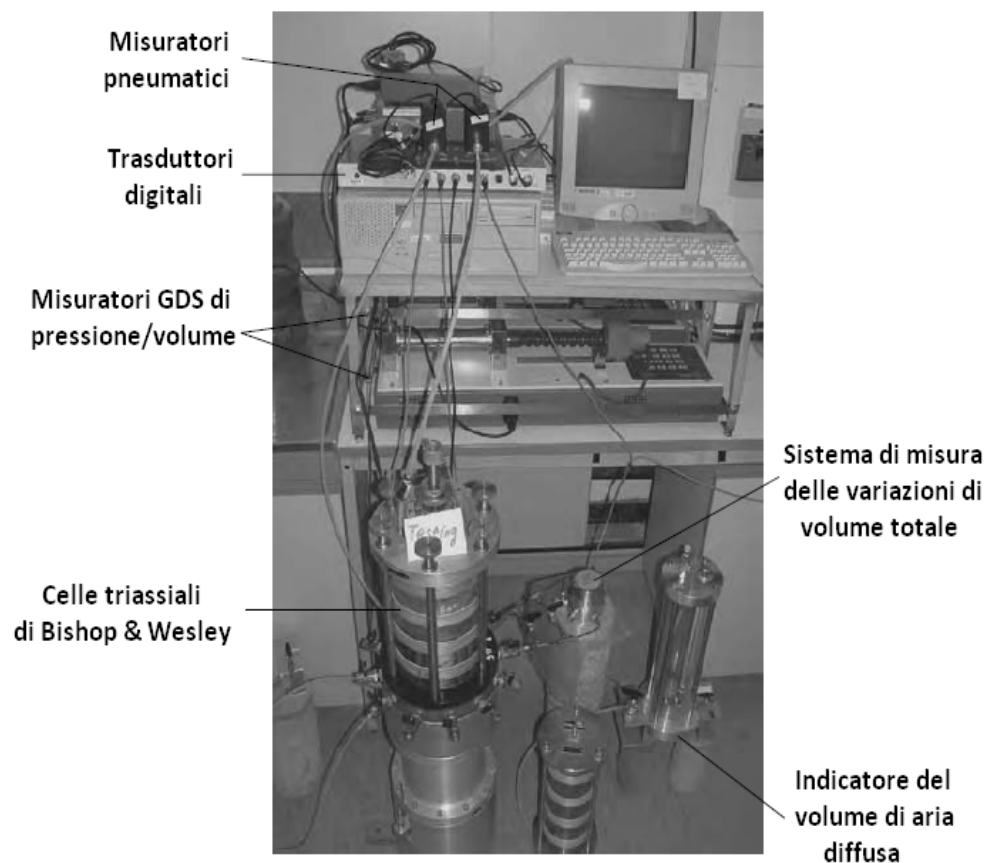


Figura 2.4 - Sistema computerizzato triassiale per terreni parzialmente saturi, basato sul principio dell' “axis- translation” (Università di Hong Kong)

Lo strumento è composto da una cella triassiale a “stress-path” controllato (tipo Bishop e Wesley) per provini fino a 100 mm di diametro, da quattro misuratori di pressione GDS, da sei trasduttori di pressione, da un trasduttore differenziale (DTI) e un computer, da un nuovo sistema di misurazione delle variazioni di volume totale e da un indicatore del

volume di aria diffusa (DAVI). Dei quattro GDS, due sono misuratori pneumatici per il controllo automatico della tensione di cella e della pressione dell'aria nei pori, mentre gli altri due sono misuratori digitali di pressione (o volume) per la misurazione della back pressure (necessaria a saturare il provino) e della tensione assiale. L'utilizzo di quattro misuratori GDS consente di stimare indipendentemente la tensione di cella, la tensione assiale, la pressione dell'aria nei pori e la pressione dell'acqua nei pori. I sei trasduttori sono dotati di una cella di carico interna per la misura della forza assiale, di un trasformatore lineare (LVDT), utile alla valutazione dello spostamento assiale, di un trasduttore di pressione differenziale (DPT), componente del sistema di misurazione della variazione di volume totale, e di tre trasduttori, dotati di una cella di monitoraggio della pressione dell'aria e dell'acqua nei pori. Tutti i trasduttori sono collegati al DTI per l'acquisizione dei dati in tempo reale il quale, a sua volta, insieme ai due misuratori pneumatici di pressione, è collegato al computer attraverso un multiplexer. Tutti questi elementi costituiscono un circuito chiuso di controllo e feedback del sistema in grado di eseguire prove di stress-path e prove a deformazione controllata all'interno della cella triassiale.

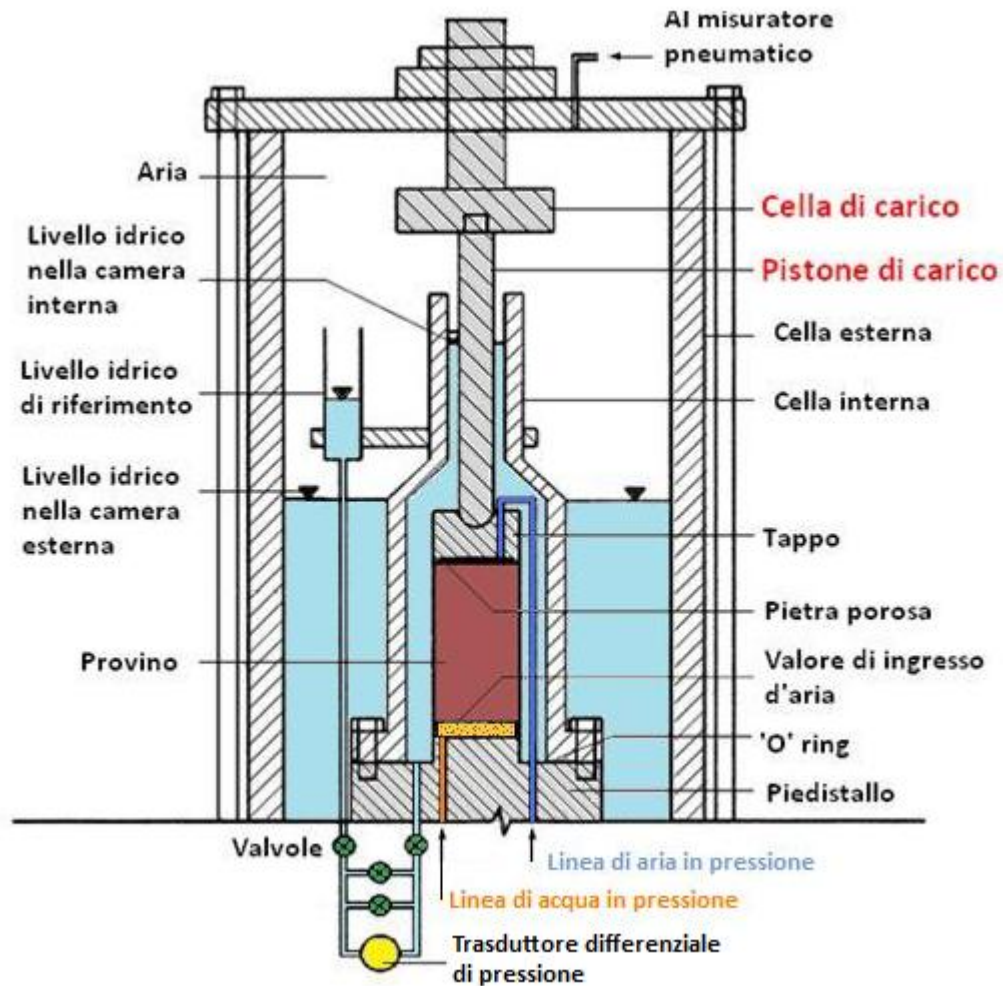


Figura 2.5 - Sistema di misura delle variazioni di volume a doppia cella per terreni insaturi

Come mostrato in Fig. 2.5, sul piedistallo inferiore posto alla base della cella triassiale è posizionata una piastra porosa ad elevato valore di ingresso d'aria, sigillata con una resina epossidica, ed è presente una scanalatura a spirale che costituisce sia un canale preferenziale per la raccolta delle bolle d'aria provenienti dal sistema di diffusione, sia un vano di raccolta dell'acqua. La suzione matriciale viene applicata al provino tramite un misuratore di pressione dell'acqua e un regolatore di pressione dell'aria, utilizzando il principio di traslazione degli assi; la pressione dell'acqua nei pori è applicata alla base

del campione attraverso la pietra porosa, mentre la pressione dell'aria nei pori è indotta sulla parte superiore del provino attraverso un filtro di rame sinterizzato.

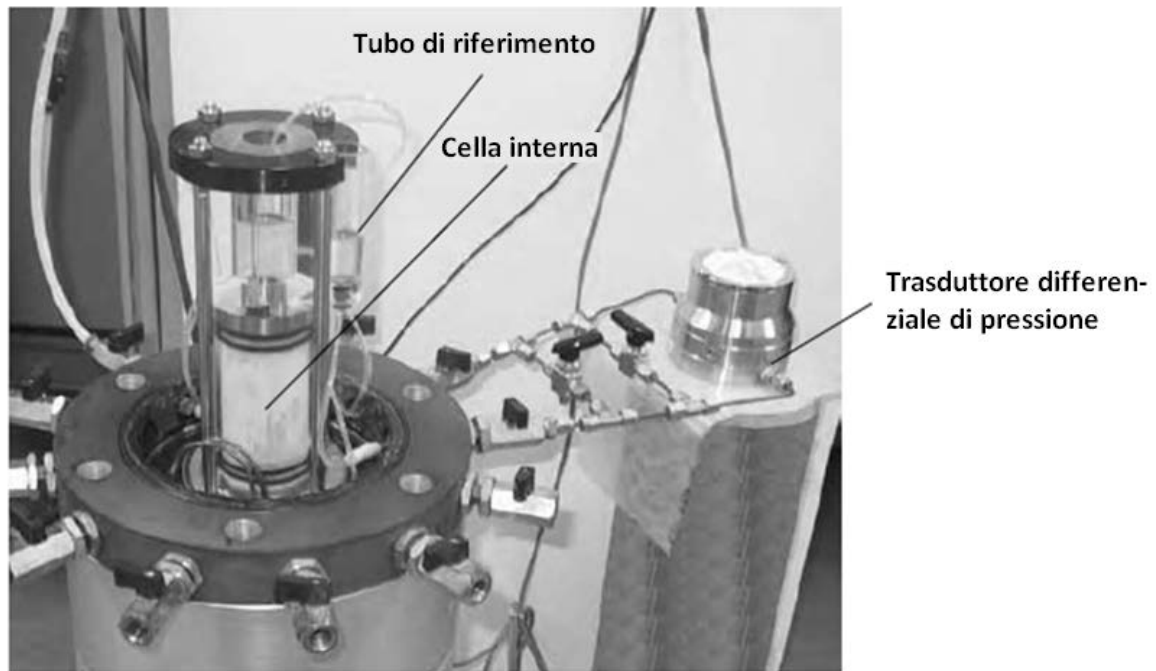


Figura 2.6 - Sistema di misura delle variazioni di volume a doppia cella per terreni insaturi (Università di Hong Kong)

In Fig. 2.6, è illustrata la configurazione del sistema di misurazione delle variazioni di volume totale; esso si basa sul principio che la variazione di volume complessiva in un campione saturo (o non) può essere misurata registrando la differenza tra la pressione dell'acqua nella cella interna, sigillata sul piedistallo della cella esterna dell'apparato triassiale, e di quella in un tubo di riferimento, tramite un DPT ad alta precisione.

Sulla base del principio di traslazione degli assi, Ng e Chiu hanno condotto alcune prove triassiali a tensione deviatorica costante su campioni poco compatti di CDV, i cui risultati sono mostrati in Fig. 2.7.

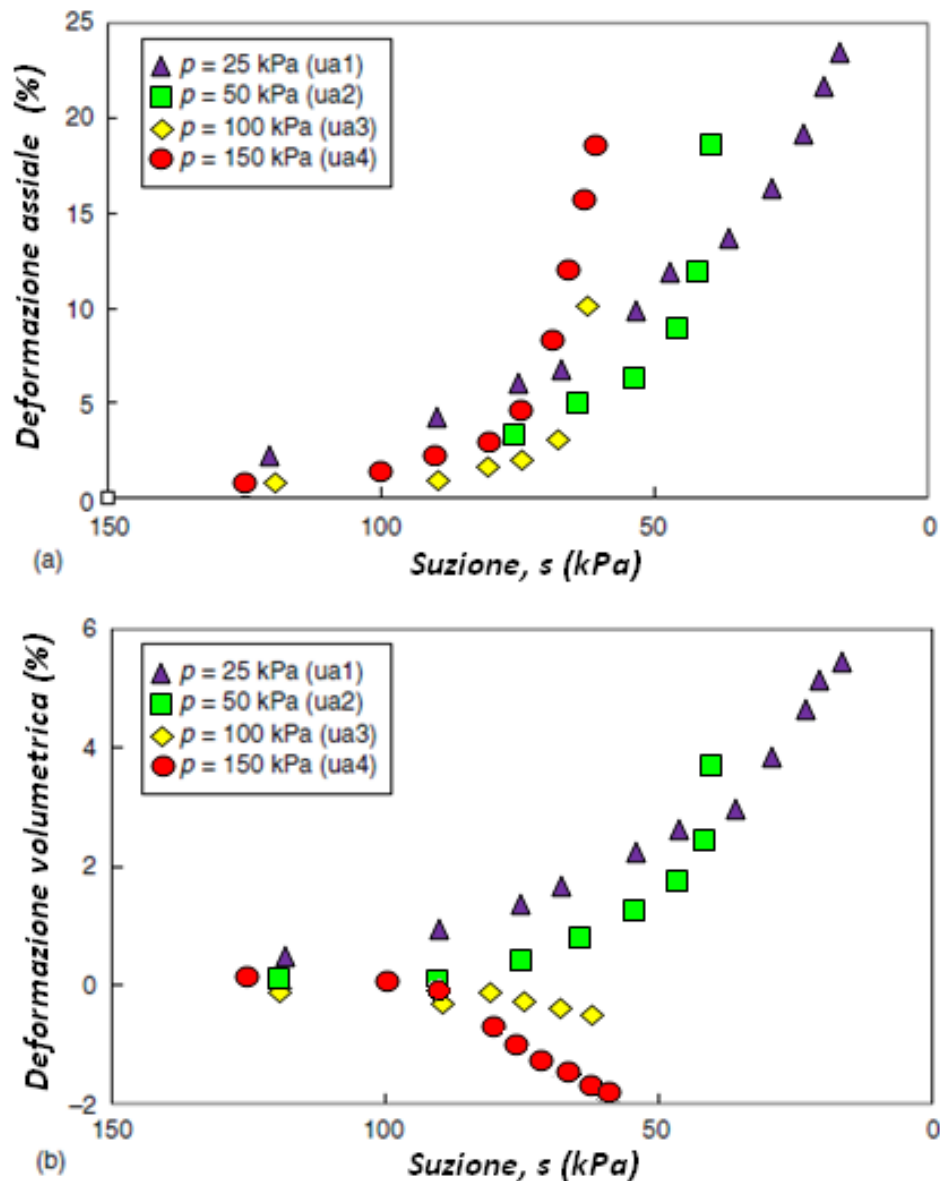


Figura 2.7 - Prove triassiali di “stress-path” su campioni non saturi di CVD che mostrano la relazione tra (a) deformazione assiale e suzione, (b) deformazione volumetrica e suzione (Ng e Chiu, 2001)

Come mostrato in Fig. 2.7 (a), al diminuire della suzione rispetto al suo valore iniziale di 150 kPa, la deformazione assiale che si mobilita è inizialmente molto ridotta, fino ad un valore limite dal quale il tasso di incremento della deformazione assiale cresce

progressivamente fino al termine della prova. Inoltre, il valore di suzione limite cresce all'aumentare della tensione netta applicata.

La Fig. 2.7 (b) mostra la variazione di deformazione volumetrica in funzione della suzione: così come accade per la deformazione assiale, esiste anche in questo caso un valore soglia di suzione oltre il quale la deformazione volumetrica mobilitata cresce; infatti, non appena la suzione scende al di sotto del valore limite, si osserva per i due campioni u_{a1} e u_{a2} un comportamento contraente (deformazione volumetrica positiva), mentre per i campioni u_{a3} e u_{a4} , caratterizzati da una tensione di confinamento superiore a 100 kPa, il comportamento è dilatante (deformazione volumetrica negativa).

II.1.1.3 Caratterizzazione Meccanica – Prova di Taglio Diretto

Rispetto alla prova triassiale, la prova di taglio diretto è più semplice da eseguire e richiede una durata inferiore a causa dei più brevi percorsi di drenaggio.

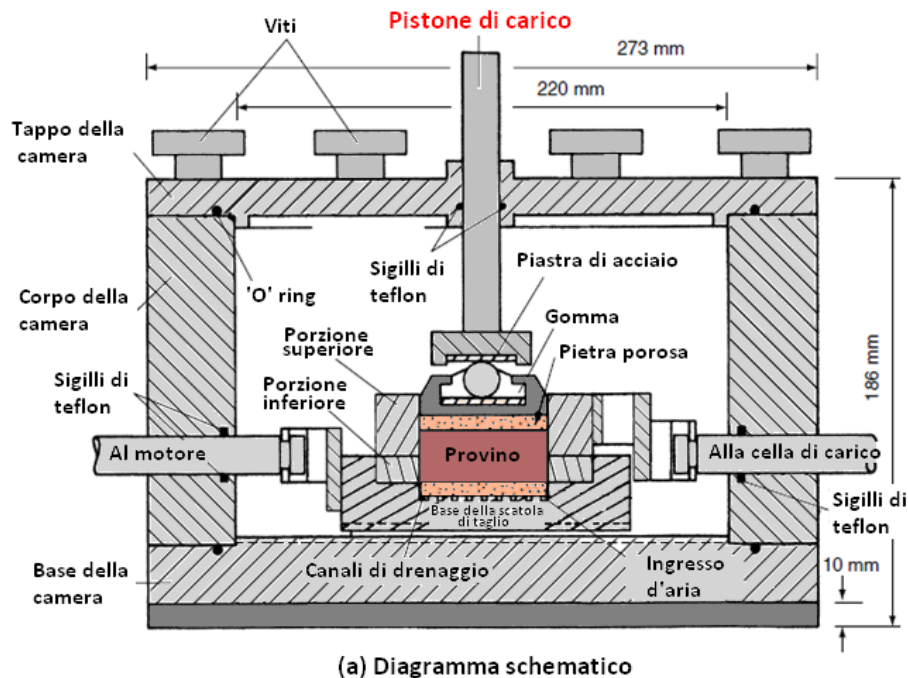
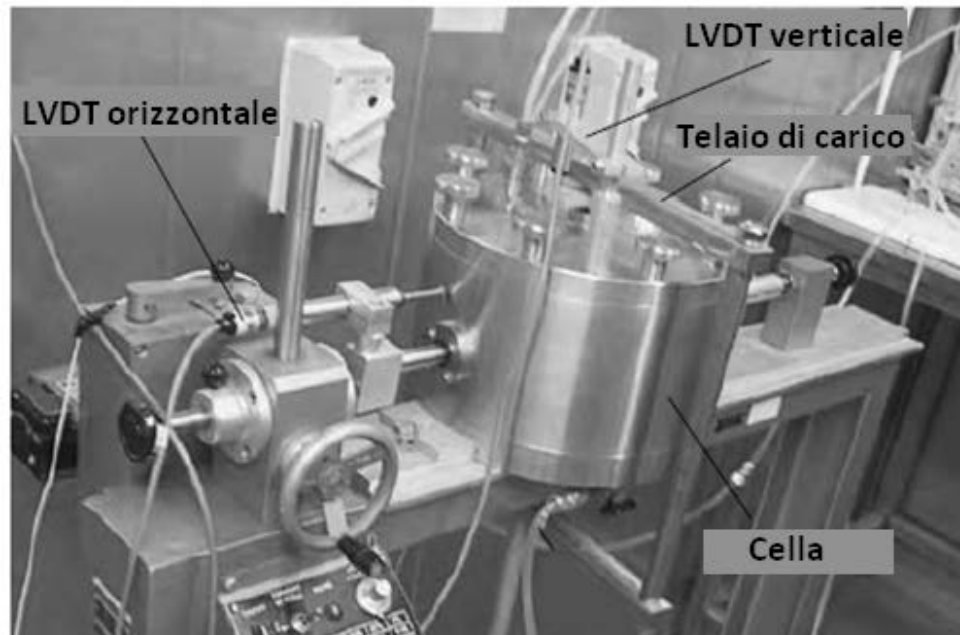


Figura 2.8 (a) - Diagramma schematico di un apparecchio id Taglio Diretto per campioni di terreno parzialmente saturi



(b) Fotografia

Figura 2.8 (b) - Fotografia di un apparecchio di Taglio Diretto per campioni di terreno parzialmente saturi (Università di Hong Kong)

In Figura 2.8 (a) e (b) è rappresentata una scatola di taglio diretto per terreni parzialmente saturi che sfrutta il principio di traslazione degli assi; essa è leggermente differente dalla scatola di taglio adottata per terreni saturi: la camera a pressione cilindrica è fabbricata in acciaio inox ed è stata progettata per resistere a pressioni fino a 1000 kPa. L'apparecchio è dotato di tre fori realizzati per fornire l'alloggiamento necessario ad un pistone di carico verticale e a due orizzontali, la cui tenuta è garantita da appositi anelli in teflon. Nella parte inferiore della scatola di taglio è installata una pietra porosa ad elevato valore di ingresso d'aria al di sotto della quale è allocato un volume d'acqua che funge anche da canale di scarico per l'aria, simile al piedistallo degli apparecchi utilizzati nelle prove triassiali. La suzione di matrice viene applicata al provino di terreno imponendo un determinato valore di pressione dell'aria all'interno della camera (il quale può rimanere costante o diventare una variabile), in modo che

l'acqua al di sotto della pietra porosa subisca lo stesso incremento di pressione, nel rispetto del principio di traslazione degli assi; l'effetto di tale aumento di pressione si trasferisce ad entrambi i fluidi di porosità del provino: la pressione dell'aria nei pori e la pressione dell'acqua interstiziale presenti nel terreno entrano quindi in equilibrio con le pressioni applicate.

L'apparecchio di taglio diretto è dotato di cinque dispositivi di misurazione:

- Due misuratori lineari LVDT, necessari per valutare gli spostamenti orizzontali e verticali;
- Una cella di carico, per misurare la forza di taglio;
- Un trasduttore di pressione per stimare la pressione dell'acqua;
- Un misuratore di variazione di volume di acqua del campione in seguito all'assorbimento o all'espulsione di acqua.

Le Figure 2.9 e 2.10 evidenziano i risultati di alcune prove di taglio diretto effettuate su campioni di granito completamente ridotto in polvere (CDG).

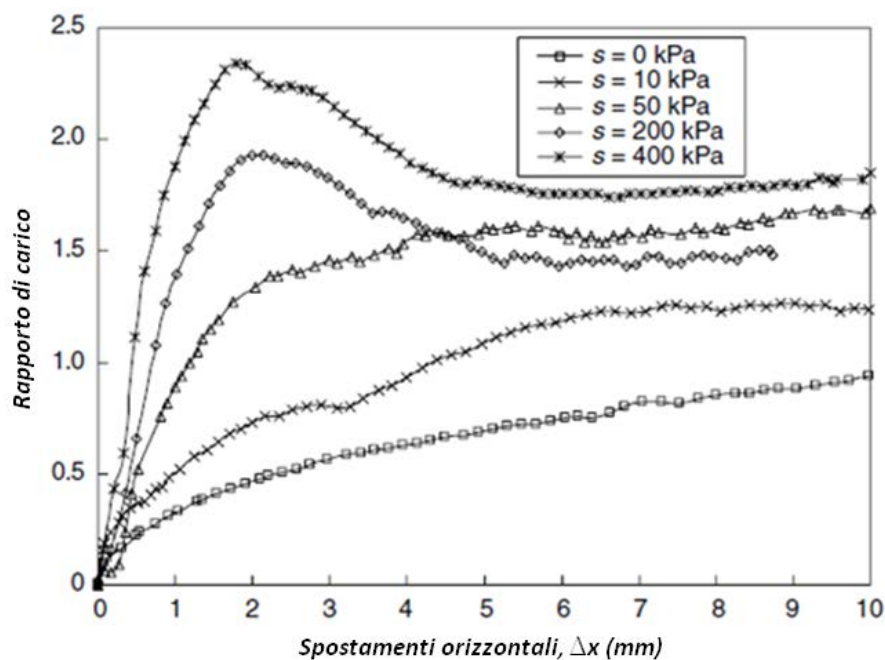


Figura 2.9 – Andamento del rapporto di carico di CDG sottoposti a Prove di Taglio Diretto per diversi valori di suzione

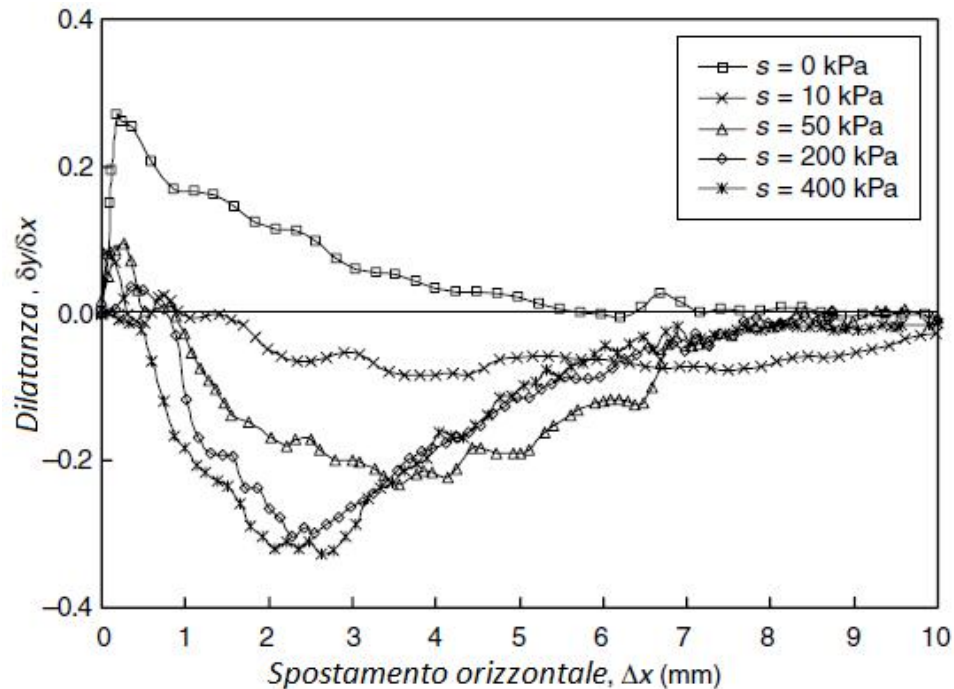


Figura 2.10 – Andamento della dilatanza di CDG sottoposti a Prove di Taglio Diretto per diversi valori di suzione

Il *rapporto di carico* (riportato in ordinata nella Fig. 2.9) si definisce come il rapporto tra lo sforzo di taglio τ e la tensione verticale netta ($\sigma_v - u_a$), mentre si intende per *dilatanza* il rapporto tra la variazione infinitesimale di spostamento verticale, δy , e la variazione infinitesimale di spostamento orizzontale, δx . Quando il rapporto $\delta y / \delta x$ è negativo, il

comportamento è da considerarsi dilatante, viceversa contraente.

Come mostrato in Figura 2.9, per valori di suzione pari a 0 kPa, 10 kPa e 50 kPa le curve presentano un comportamento incrudente; all'aumentare della suzione (200 kPa e 400 kPa) si osserva invece che l'andamento raggiunge valori maggiori di rapporto di carico rispetto ai provini precedenti, ma, successivamente all'attingimento del valore di picco, esso è caratterizzato da una fase di softening. In generale, al crescere della suzione applicata, i valori del rapporto di carico successivi al picco crescono, ad eccezione del provino soggetto a 200 kPa.

In Fig. 2.10 si osservano invece gli effetti della suzione sulla deformazione volumetrica dei campioni di CDG nelle prove di taglio diretto; in condizioni sature (a suzione applicata nulla), il provino mostra un comportamento esclusivamente contraente (valore positivo di dilatanza), mentre in condizioni di parziale saturazione tutti i provini mostrano un comportamento inizialmente contraente, ed in seguito dilatante, man mano che gli spostamenti orizzontali Δx aumentano. Il massimo valore di dilatanza si attinge per il campione soggetto al massimo valore di suzione, ed il Δx corrispondente non coincide con quello relativo al picco del rapporto di carico.

II.1.2 Suzione osmotica - Tecnica osmotica

La *tecnica osmotica* rappresenta un metodo alternativo per il controllo e la misura della suzione di matrice e della suzione osmotica nei terreni parzialmente saturi. Secondo Delage (1988), questa tecnica è stata inizialmente sviluppata da biologi (Lagerwerff, 1961), e solo in seguito adottata da scienziati e ricercatori nel campo della geotecnica (Kassif e Ben Shalom, 1971; Komornik, 1980; Delage, 1998; Ng, 2007).

La Fig. 2.11 illustra il principio di funzionamento della tecnica osmotica per il controllo della suzione:

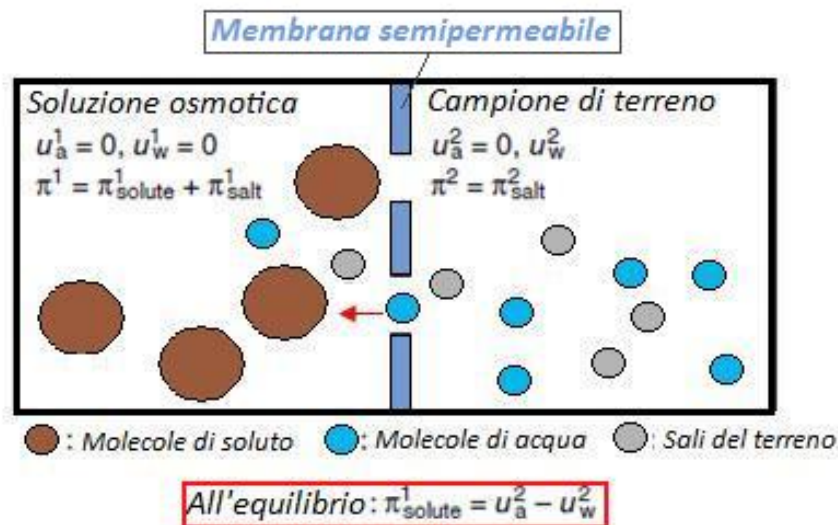


Figura 2.11 – Schema di funzionamento della Tecnica Osmotica

Il campione di terreno e la soluzione osmotica sono separati da una membrana permeabile all'acqua e agli ioni presenti nel terreno, ma impermeabile alle grandi molecole di soluto e alle particelle di terreno; di conseguenza, all'equilibrio, la suzione osmotica relativa ai sali nel terreno è la stessa da entrambi i lati della membrana ($\pi_{\text{sali}}^1 = \pi_{\text{sali}}^2$), mentre la suzione osmotica relativa al soluto è pari a 0 nel terreno ($\pi_{\text{soluto}}^2 = 0$).

Zur, nel 1966, ha mostrato i principi energetici della tecnica osmotica; quando lo scambio d'acqua attraverso la membrana è in equilibrio, il potenziale energetico nella miscela acqua-terreno è uguale a quello della soluzione acquosa, ovvero la suzione totale nel terreno è uguale a quella nella soluzione.

$$\psi^1 = s^1 + \pi^1 = \psi^2 = s^2 + \pi^2 \quad [2.1]$$

Pertanto, la differenza di suzione osmotica è uguale alla differenza di suzione matriciale da entrambi i lati della membrana:

$$\pi^1 - \pi^2 = s^2 - s^1 \quad [2.2]$$

Poiché la suzione di matrice nella soluzione è nulla ($s^1 = u_a^1 - u_w^1 = 0$), la suzione di matrice nel terreno ($s^2 = u_a^2 - u_w^2$) è pari alla differenza di suzione osmotica da entrambi i lati della membrana, cioè pari alla componente di suzione osmotica relativa al soluto (π_{soluto}^1):

$$\pi^1 - \pi^2 = s^2 \quad [2.3]$$

II.1.2.1 Applicazioni della Tecnica Osmotica

La tecnica osmotica è stata applicata con successo in un edometro (Dineen e Burland, 1995; Kassif e Ben Shalom, 1971), in un apparecchio triassiale a cilindro cavo (Komornik, 1980) e in una versione modificata dell'apparecchio triassiale (Cui e Delage, 1996; Ng, 2007).

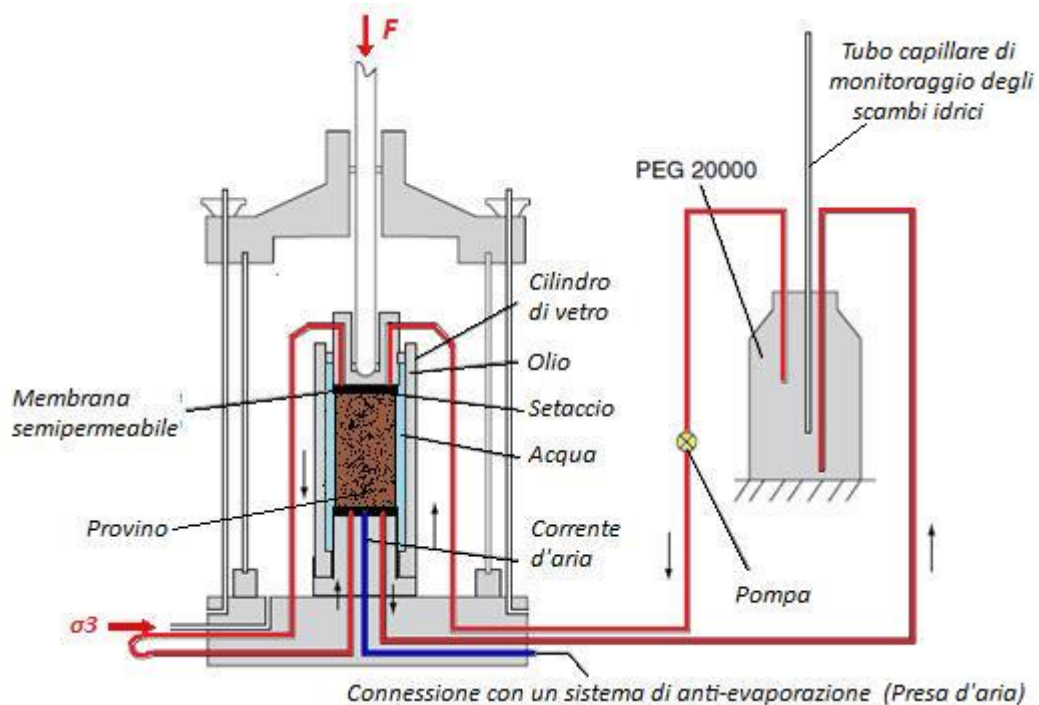


Figura 2.12 – Cella di prova Triassiale per Tecnica Osmotica

La Figura 2.12 mostra un'apparecchiatura triassiale modificata che applica la tecnica osmotica: un campione di terreno viene messo in contatto, sulla sua superficie superiore ed inferiore, con due membrane semipermeabili, e poggiate su un piedistallo a scanalature concentriche che garantiscono la circolazione della soluzione osmotica PEG20000 dalla porzione superiore del provino, in cui è allocato un tappo, a quella inferiore. Tra le membrane e le scanalature del piedistallo è posta una maglia adesiva tramite una resina epossidica. Il tappo superiore è collegato alla base della cella da due

tubi flessibili e la soluzione di PEG è contenuta in un circuito chiuso che consta di un collegamento alla base della cella, di un tappo superiore, di un serbatoio e di una pompa. Il serbatoio è abbastanza grande da assicurare una concentrazione relativamente costante a dispetto degli scambi idrici che si verificano attraverso le membrane poste tra il provino e la soluzione; esso è chiuso da un tappo di gomma forata da tre tubi di vetro, due dei quali sono atti all'afflusso e al deflusso della soluzione nella cella triassiale, mentre il terzo è collegato ad un tubo capillare graduato di monitoraggio degli scambi di acqua. La stabilizzazione del livello della soluzione all'interno del tubo capillare è indice del raggiungimento di una suzione di equilibrio all'interno del campione. Inoltre, sulla base della cella, è presente una presa d'aria che assicura una pressione dell'aria nei pori costante all'interno del campione e pari alla pressione atmosferica.

In confronto alla tecnica di traslazione degli assi, il vantaggio principale della tecnica osmotica è che la pressione dell'acqua all'interno dei pori del terreno viene mantenuta negativa e possono essere misurati alti di valori di suzione senza l'utilizzo di pressioni molto alte all'interno della cella.

Una limitazione, invece, è stata osservata da Tarantino e Mongiovì nel 2000: tutte le membrane subiscono un fenomeno di collasso superato un valore soglia (caratteristico della tipologia di membrana in esame) della pressione osmotica nella soluzione di PEG, oltre il quale le molecole di soluto non vengono più trattenute e si trasferiscono nel campione di terreno, con una conseguente riduzione del gradiente di concentrazione e della suzione nel terreno.

II.1.3 Confronti sperimentali tra Tecnica di traslazione degli assi e Tecnica Osmotica

Dal momento che le due tecniche di traslazione degli assi e Osmotica sono entrambe utilizzate per il controllo e la misura della suzione, i risultati ottenuti dalle due prove,

riferiti alle medesime sollecitazioni applicate, dovrebbero essere gli stessi. Tuttavia pochi risultati sperimentali confermano questa tesi; nella pratica, soprattutto in terreni argillosi, all'equilibrio il contenuto d'acqua ottenuto applicando la tecnica di traslazione degli assi risulta maggiore rispetto a quello ottenuto utilizzando la tecnica osmotica, a parità di suzione applicata. Nel 1966, Zur attribuì questa differenza alla durata della prova, sostenendo che 2 giorni non sono sufficienti al raggiungimento dell'equilibrio nella tecnica di traslazione degli assi; egli suggerì pertanto di estendere la durata della prova a 3 giorni, ottenendo risultati simili a quelli osservati utilizzando la tecnica osmotica. Tuttavia, Williams e Shaykewich nel 1969 scoprirono che estendendo la durata del test di traslazione degli assi a più di 10 giorni, il contenuto d'acqua gravimetrico ottenuto all'equilibrio risultava fino al 10 % più alto di quello ottenuto tramite tecnica osmotica. Studi successivi hanno dimostrato inoltre che prove di taglio triassiale effettuate con l'ausilio delle due differenti tecniche, eseguite su campioni di argilla espansa ricompattata, forniscono gli stessi valori di angolo di attrito associato alla tensione netta (ϕ'), mentre i valori dell'angolo di attrito relativo alla suzione (ϕ^b) risultano sensibilmente differenti.

II.1.4 Suzione Totale – Tecniche di Controllo dell'Umidità

Come si evince dall'equazione [1.1], la suzione totale può essere valutata su un campione di terreno parzialmente saturo attraverso il controllo dell'umidità relativa RH, tramite soluzioni acquose (Esteban e Saez, 1988; Oteo-Mazo, 1995; De lage, 1998; Al-Mukhtar, 1999) o mescolando vapore saturo con gas secco (Kunhel e Van der Gaast, 1993). La prima tecnica è stata generalmente utilizzata per studiare l'effetto combinato della suzione sulle proprietà meccaniche di vari terreni.

La Fig. 2.13 mostra un diagramma schematico che illustra il principio di lavoro della *tecnica di controllo dell'umidità* tramite l'utilizzo di soluzioni:

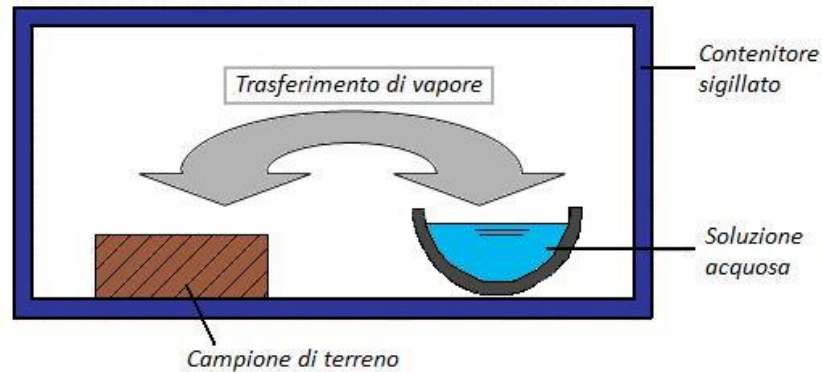


Figura 2.13 – Schema del Principio di Controllo dell'Umidità con l'ausilio di una soluzione

Un campione di terreno è allocato in un ambiente chiuso contenente una soluzione acquosa di un dato composto chimico; a seconda delle proprietà fisico-chimiche del composto, si instaura all'interno dell'ambiente sigillato un certo valore di RH: si assiste dunque a scambi idrici sottoforma di vapore tra la soluzione ed il campione. Quando il vapore raggiunge una condizione di equilibrio (assenza di scambio) si instaura nel provino un certo valore di suzione.

II.1.4.1 Applicazioni delle Tecniche di Controllo dell'Umidità

Nella tecnica di controllo dell'umidità con l'ausilio di soluzioni, gli scambi di vapore sono piuttosto lenti, pertanto essa richiede molto tempo. Si adottano spesso edometri:

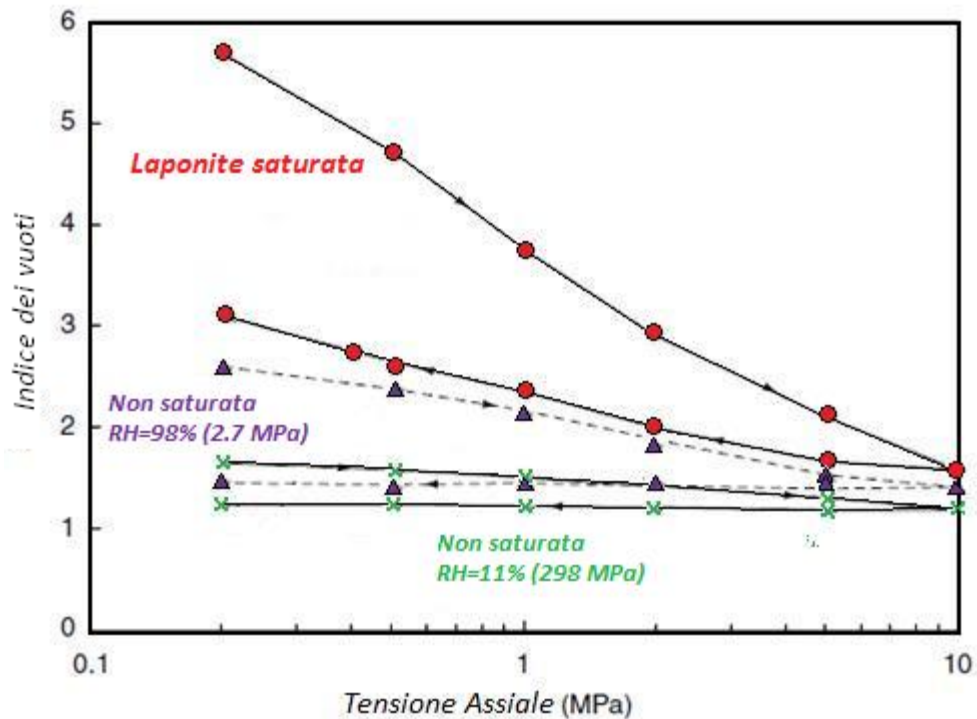


Figura 2.14 – Risultati sperimentali di un edometro ad umidità controllata su un campione di Na-Laponite

La Fig. 2.14 mostra i risultati sperimentali di una serie di prove effettuate su una smectite altamente compattata (Na-Laponite); la suzione totale massima applicata è di 298 MPa, mentre la massima tensione verticale è di 10 MPa. I risultati mostrano che:

- L'indice dei vuoti cresce al diminuire della suzione e all'aumentare dell'umidità relativa RH;
- L'aumento della tensione assiale provoca una riduzione della differenza dell'indice dei vuoti dei vari campioni esaminati;
- La pendenza della curva di compressione diminuisce all'aumentare della suzione; ciò indica che la suzione irrigidisce il terreno.

In genere, le applicazioni dei sistemi a feedback per il controllo dell'umidità sono poche.

Anche in questo caso, la pressione dell'acqua all'interno dei pori del terreno viene mantenuta negativa, e gli alti valori di suzione possono essere raggiunti senza l'utilizzo di pressioni molto alte all'interno della cella.

In conclusione, non importa quale metodo viene utilizzato per il controllo della suzione; una questione di vitale importanza nella sperimentazione sui terreni parzialmente saturi è il pareggiamento dei valori di suzione, al fine di studiarne la successiva influenza sulla resistenza a taglio.

II.2 STRUMENTI DI MISURA DELLA SUZIONE

Come sappiamo, esistono due livelli distinti di suzione misurabili: suzione di matrice e suzione totale. Al contrario, l'unico metodo soddisfacente per stimare la suzione osmotica è indiretto: se la tensione di vapore di un campione all'interfaccia terreno-acqua è nota, ricavando la suzione totale dalla eq. [1.1], la suzione osmotica sarà pari alla differenza tra la suzione totale e la suzione di matrice del terreno.

Come suggerito da Ridley e Wray nel 1995, in assenza di una vera e propria membrana semipermeabile, la presenza di sali disciolti nell'acqua all'interno dei pori non dovrebbe tradursi in un suo movimento apprezzabile; pertanto, i sali disciolti non provocano un cambiamento dell'energia necessaria per spostare una molecola d'acqua all'interno della matrice di terreno, ovvero la suzione di matrice è indipendente dalla suzione osmotica.

Per valutare se uno strumento è idoneo alla misurazione della suzione totale o della suzione matriciale, è necessario constatare se esso viene a trovarsi in contatto diretto col fluido di porosità. In assenza di contatto tra il terreno e lo strumento di misura, i sali disciolti non sono in grado di trasferirsi dal fluido di porosità all'apparecchio, mentre se lo strumento interagisce fisicamente con l'acqua presente nei pori, i sali disciolti saranno liberi di muoversi tra i due. In genere, però, a meno che non sia certo che la concentrazione di sali disciolti è ovunque la stessa, il loro effetto sulla misura della suzione non è quantificabile in maniera precisa: nella pratica, tale imprecisione viene

trascurata e si adotta comunque, per la suzione di matrice, il metodo di misura predetto. Bisogna tener conto, inoltre, del fatto che elevati valori di suzione possono far retrocedere il menisco, impedendone il contatto diretto con lo strumento: ciò significa che un apparecchio a contatto col terreno non è necessariamente a contatto con il menisco, e ciò non garantisce una misura corretta della suzione di matrice.

Generalmente, i dispositivi di misurazione della suzione si dividono in due categorie a seconda che la misura sia diretta o indiretta. Una *misura diretta* riguarda quantità ottenute leggendo direttamente la grandezza di interesse sullo strumento (quali l'energia dell'acqua presente nei pori); una *misura indiretta* consiste nel rilevare un altro parametro (ad esempio RH, resistività, conducibilità o contenuto d'acqua) e nel relazionarlo alla suzione attraverso un'operazione di calibrazione.

II.2.1 Psicrometri

Tra gli strumenti di misurazione indiretta annoveriamo gli *psicrometri*. Essi rappresentano degli strumenti che misurano l'umidità e che possono quindi essere adoperati per la valutazione della suzione totale, adottando la [1.1]. Nella loro forma più semplice, essi sono costituiti da un termometro dotato di un bulbo bagnato, avvolto in una garza di cotone imbevuta d'acqua, interessato da fenomeni di evaporazione che ne riducono la temperatura rispetto a quella dell'ambiente esterno; una volta cessata l'evaporazione e raggiunto l'equilibrio con la pressione dell'ambiente esterno, tale valore di temperatura viene confrontato con quello di un termometro a bulbo secco posto nello stesso ambiente: la differenza tra le temperature è legata all'umidità relativa, e può essere calibrata utilizzando soluzioni a concentrazioni saline note.

I dispositivi psicrometrici più comuni attualmente esistenti misurano il calore generato da una giunzione elettrica quando l'acqua evapora o condensa su di essa. Essi possono essere suddivisi in due gruppi:

- Psicrometri THEMISTOR/TRANSITOR;

- Psicrometri TERMOCOPPIA.

Uno psicrometro Thermistor, mostrato in Fig. 2.15, è un resistore sensibile alle variazioni di temperatura, dotato di due termistori identici, utilizzati per convertire la temperatura in valori di corrente elettrica; sul primo è posta una goccia d'acqua (termistore a bulbo bagnato), mentre l'altro è lasciato a secco (termistore a bulbo secco). Se entrambi i termistori sono posti in un ambiente chiuso, l'evaporazione o la condensazione che interessano il termistore bagnato si traducono in una forza elettromotrice che può essere correlata all'umidità relativa dell'ambiente.

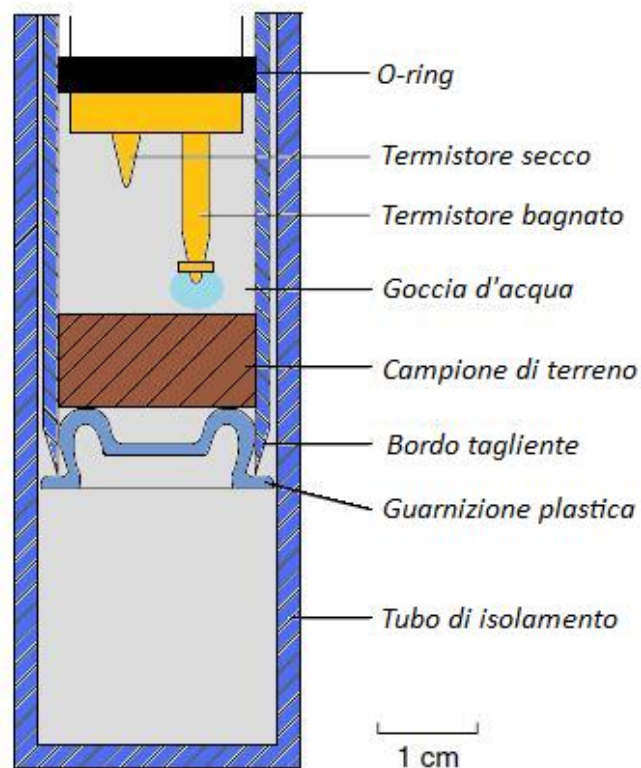


Figura 2.15 - Psicrometro Thermistor

L'introduzione dello psicrometro Termocoppia è attribuita invece a Spanner nel 1951. Nel 1834, Peltier scoprì che il segno della variazione di temperatura nell'"effetto Peltier" dipende dalla direzione del flusso di corrente: se la giunzione elettrica è collocata in un ambiente umido e il passaggio di corrente avviene in una direzione che provoca un raffreddamento della giunzione sufficiente ad innescare una condensazione d'acqua su di essa, la giunzione diventa essenzialmente un termometro a bulbo umido. Quando il circuito si interrompe, l'acqua evapora e il cambiamento di temperatura della giunzione umida genera una forza elettromotrice (effetto Seebeck), misurabile con un galvanometro, tra la giunzione stessa e una giunzione di riferimento che si trova a temperatura ambiente, cioè un bulbo secco.

Gli psicrometri termocoppia sono estremamente sensibili alle fluttuazioni di temperatura: quando il giunto di misura si raffredda si genera calore nel giunto di riferimento e ciò è negativo in quanto, per la corretta misurazione dell'umidità relativa, è necessario che il giunto di riferimento si trovi a temperatura ambiente.

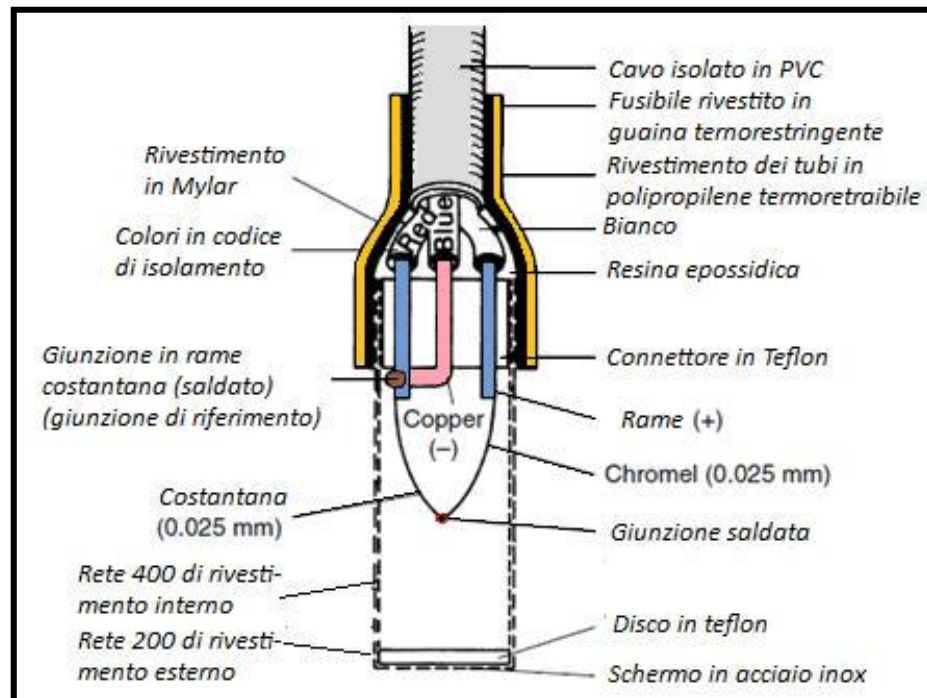


Figura 2.16 - Psicrometro Termocoppia a singola giunzione Peltier

(Brown e Collins, 1980)

II.2.2 Metodo della carta da filtro

Il metodo della carta da filtro è classificato come metodo indiretto per la misurazione della suzione nel terreno e si basa sul presupposto che il flusso di umidità di un filtro di carta, utilizzato come sensore, può entrare in equilibrio con quello di un terreno, caratterizzato da un determinato valore di suzione. L'equilibrio può essere raggiunto per scambi di vapore o di liquido tra il terreno e il filtro; quando un filtro asciutto viene messo in contatto diretto con un campione di terreno, si presume che l'acqua scorra dal terreno al filtro fino al raggiungimento dell'equilibrio. Se, invece, il filtro secco è sospeso al di sopra del campione senza entrare in contatto diretto con esso, si genera un flusso di vapore acqueo dal terreno al filtro fino al raggiungimento dell'equilibrio. Quando ciò accade, è possibile procedere alla misurazione del contenuto d'acqua della carta da filtro e, successivamente, della suzione del terreno, a partire da una curva di calibrazione, come mostrato in Fig. 2.17.

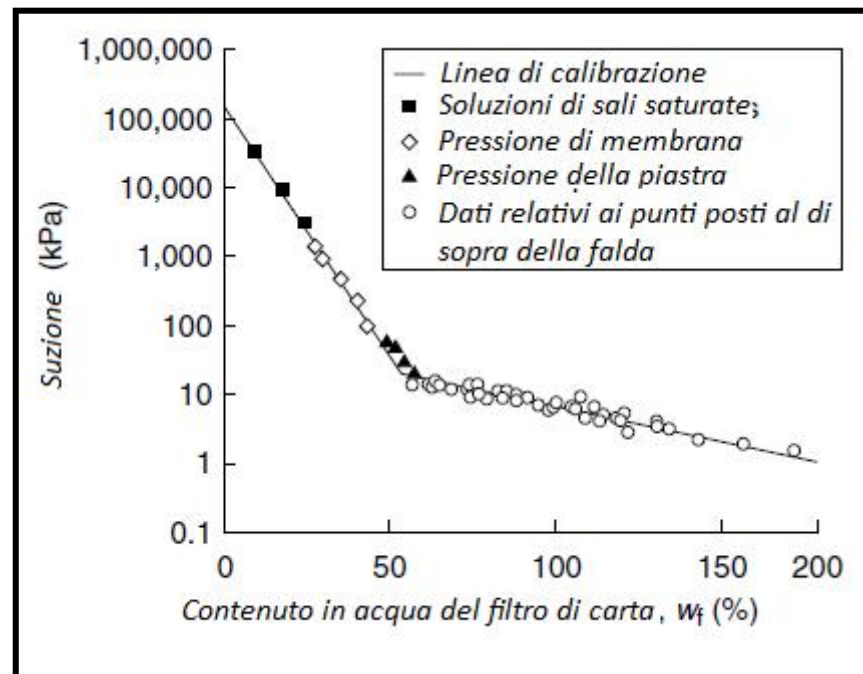


Figura 2.17 - Metodo della carta da filtro (con o senza contatto) per la misurazione della suzione di matrice e della suzione totale (Al-Khafaf e Hanks, 1974)

La calibrazione di una carta da filtro, intesa come la correlazione sperimentale tra il contenuto d'acqua della carta da filtro e la suzione di matrice del terreno, si può ottenere mediante due approcci: il primo consiste nell'equilibrare il filtro su una piastra a suzione nota, mentre il secondo inserendolo in un contenitore sigillato contenente una soluzione salina a tensione di vapore nota. Nella pratica, il primo approccio comporta un contatto diretto col terreno ed è stato utilizzato per valori di suzione fino a 1500 kPa, mentre il secondo non necessita di contatto ed è adottato per valori di suzione al di sopra dei 1500 kPa.

Le due calibrazioni appena descritte sono illustrate in Fig. 2.18 per due tipologie di materiali costituenti la carta da filtro (Whatman n°42 e Schleicher e Schuell n°589).

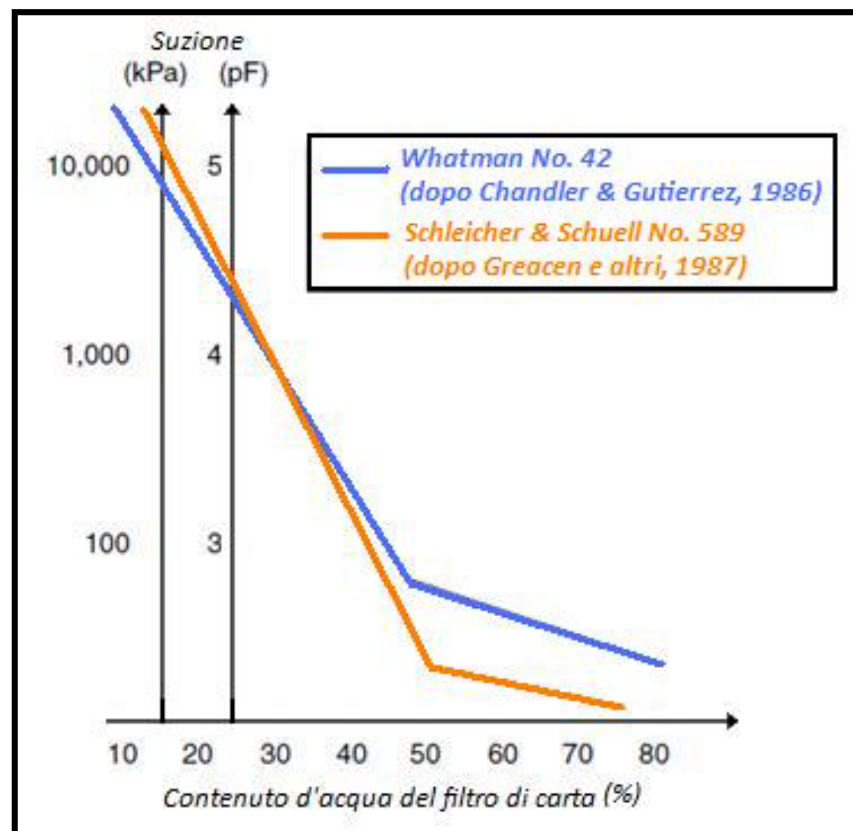


Figura 2.18 – Calibrazione di una carta da filtro posta a contatto col terreno
(Ridley e Wray, 1995)

In Tabella 2.1 sono inoltre riportate le tipologie di materiali costituenti i filtri in funzione del range di valori misurabili di suzione.

Range di misura della suzione	Appropriata tipologia di carta
Oltre i 30 kPa	Whatman n°42
Da 30 kPa a 300 kPa	Millipore 0.025
Da 300 kPa a 1000kPa	Millipore 0.05
Da 1000 kPa a 10 MPa	Washed dialysis tubing
Da 10 MPa a 100 MPa	Unwashed dialysis tubing

Tabella 2.1 – Appropriati materiali da filtro (Ridley and Wray, 1995)

Va sottolineato, infine, che la tecnica con carta da filtro è altamente influenzata dal grado di precisione della misura del contenuto d'acqua, il quale deve essere misurato con grande cura.

II.2.3 Metodo dei Blocchi Porosi

Il principio del metodo del blocco poroso per la misurazione della suzione di matrice di un terreno è che la resistenza elettrica di un materiale assorbente varia con il suo contenuto di umidità. Il blocco, collocato all'interno del campione di terreno, è costituito da due elettrodi concentrici sepolti all'interno di un materiale poroso, come mostrato in Fig. 2.19.

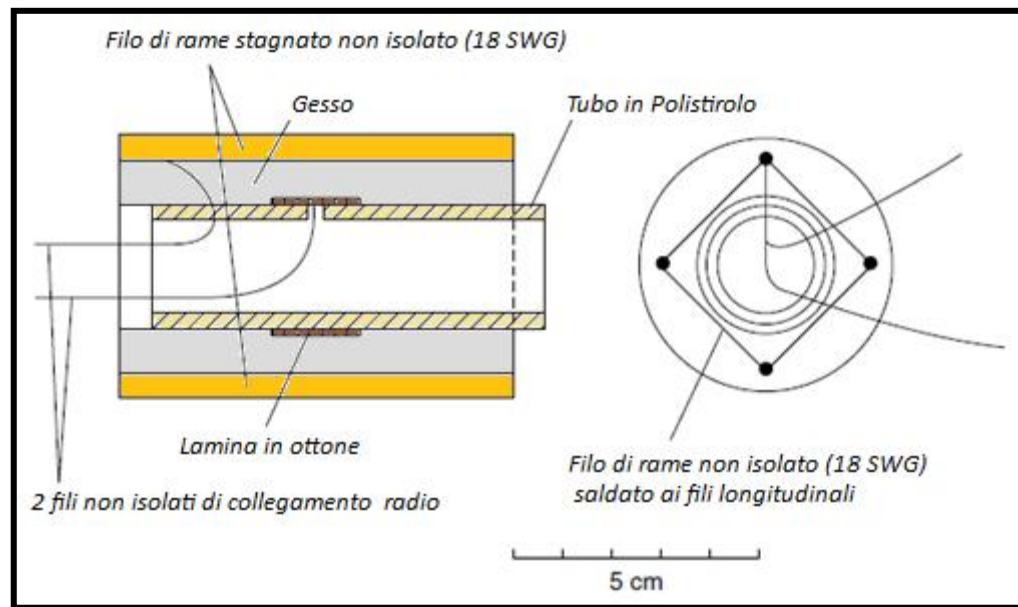


Figura 2.19 – Tipico blocco di gesso (Ridley e Wray, 1995)

Se la suzione del terreno è maggiore della suzione all'interno del blocco, quest'ultimo cede umidità al terreno fino a quando il terreno ed il blocco posseggono la stessa suzione di matrice; al contrario, se il blocco è inizialmente secco assorbirà umidità dal terreno fino al raggiungimento della condizione di equilibrio.

È possibile effettuare una calibrazione, intesa come correlazione tra la resistenza elettrica del blocco e la suzione, inserendo ogni blocco all'interno di un campione di terreno e sottoponendo quest'ultimo a suzioni note all'interno di una piastra a pressione. Il blocco di gesso, economico e facile da gestire ed installare, è risultato essere il mezzo più adatto per la misurazione della resistenza elettrica, in quanto satura più velocemente e possiede proprietà elettriche estremamente stabili (sebbene rammollisce lievemente a fine saturazione). Tuttavia, i blocchi di gesso sono suscettibili ad isteresi e la loro risposta ad un cambiamento di suzione può essere lenta (2-3 settimane), il che esclude la possibilità di ottenere valori precisi di suzione in ambienti soggetti a repentini cambiamenti di umidità, insieme alla ristretta applicabilità in terreni troppo salini.

II.2.4 Sensori di conducibilità termica

Un sensore di conducibilità termica per la misurazione della suzione del terreno è costituito da una estremità cilindrica porosa contenente un minuscolo impianto di riscaldamento ed un elemento sensibile alla temperatura. La Fig. 2.20 mostra la struttura di un sensore di conducibilità termica sviluppato presso l'Università di Saskatchewan (Shuai, 1998).

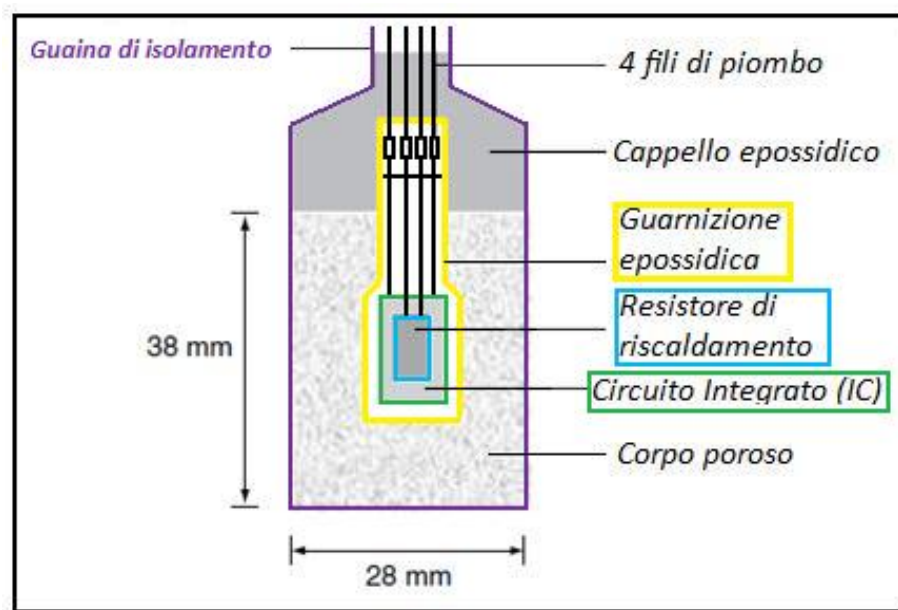


Figura 2.20 – Schema della sezione trasversale di un sensore di conducibilità termica di ultima generazione

L'estremità porosa è un manufatto in ceramica appositamente progettato e realizzato con pori di dimensioni appropriate in funzione del range di suzioni da misurare; l'impianto di riscaldamento converte energia elettrica in energia termica: una parte è dissipata all'interno dell'elemento in ceramica, mentre la restante energia termica non dissipata si traduce in un aumento della temperatura al centro dell'elemento. Il sensore di

temperatura rappresentato in figura (Circuito Integrato, IC) misura l'aumento di temperatura nel tempo. Poiché l'acqua ha una conducibilità termica maggiore rispetto all'aria, il tasso di dissipazione dell'energia termica all'interno dell'elemento in ceramica ne fa aumentare il contenuto d'acqua e quest'ultimo, quando è molto elevato, produce un minore aumento di temperatura al centro della ceramica (cioè un dato in uscita dal sensore in termini di voltaggio più basso). Poiché la suzione nel sensore è uguale alla suzione nel terreno circostante, il dato di temperatura in uscita può essere calibrato in funzione della suzione di matrice del terreno.

La calibrazione è il primo passo verso l'uso dei sensori di conducibilità termica per la misura dei valori di suzione; presumibilmente, essa deve riprodurre, quanto più possibile, le reali condizioni in sito: la metodologia convenzionale di calibrazione si ottiene a seguito di un processo di essiccazione. La curva di calibrazione rappresenta la relazione tra il valore in uscita dal sensore e la suzione di matrice applicata nel processo di essiccazione, tenendo conto, tuttavia, che il rapporto tra il contenuto d'acqua e la suzione di matrice di un materiale poroso è soggetto a fenomeni di isteresi (Fredlund, 1994).

Nelle Figg. 2.21, 2.22 e 2.23 sono rappresentate due cicli di curve relativi a tre sensori.

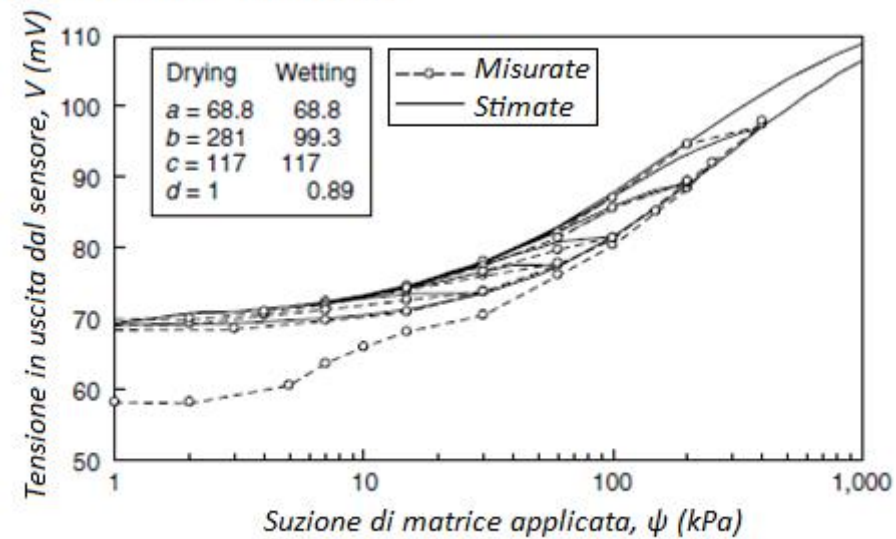
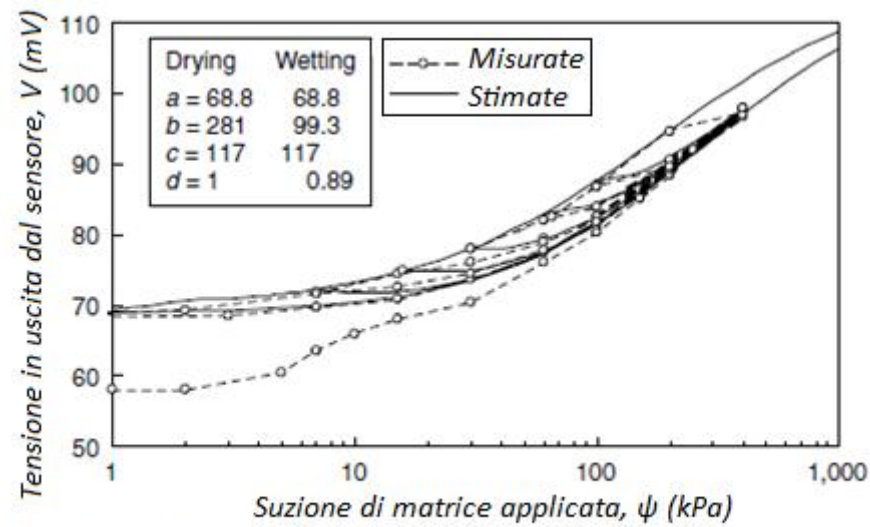


Figura 2.21 – Curve principali misurate e stimate per il sensore 1
(Feng e Fredlund, 2003)

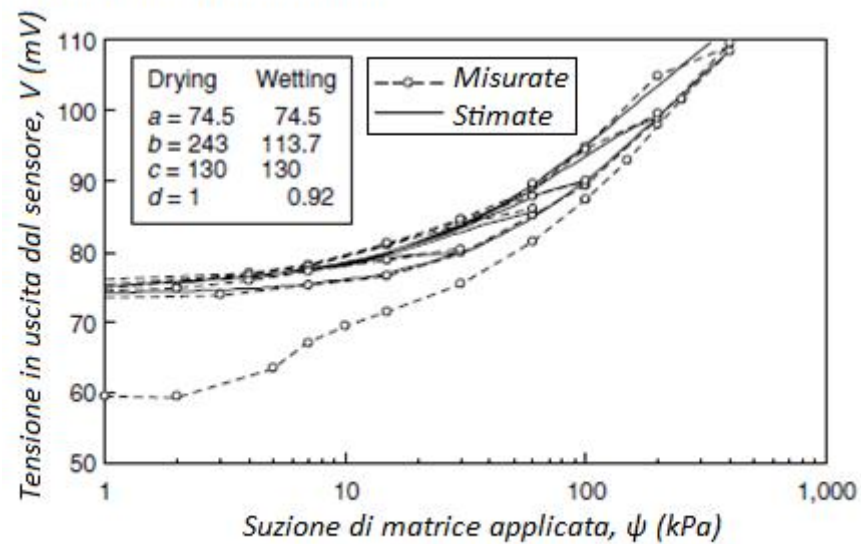
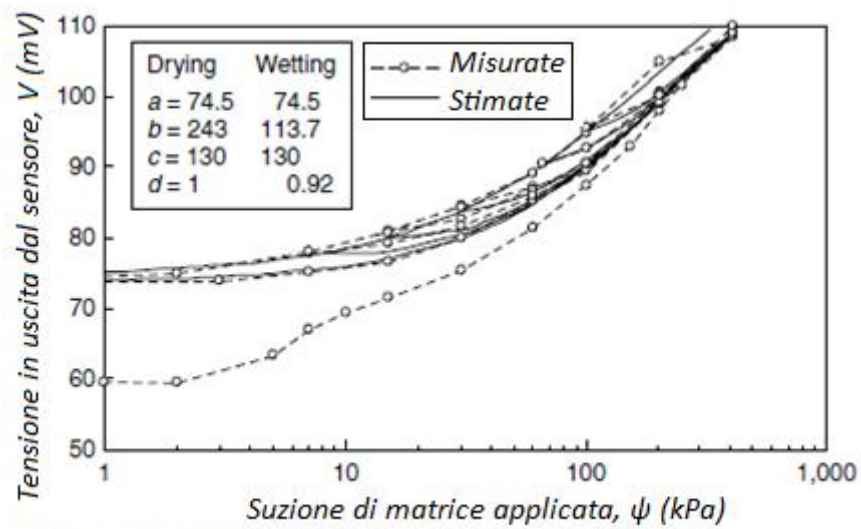


Figura 2.22 – Curve principali misurate e stimate per il sensore 2
(Feng e Fredlund, 2003)

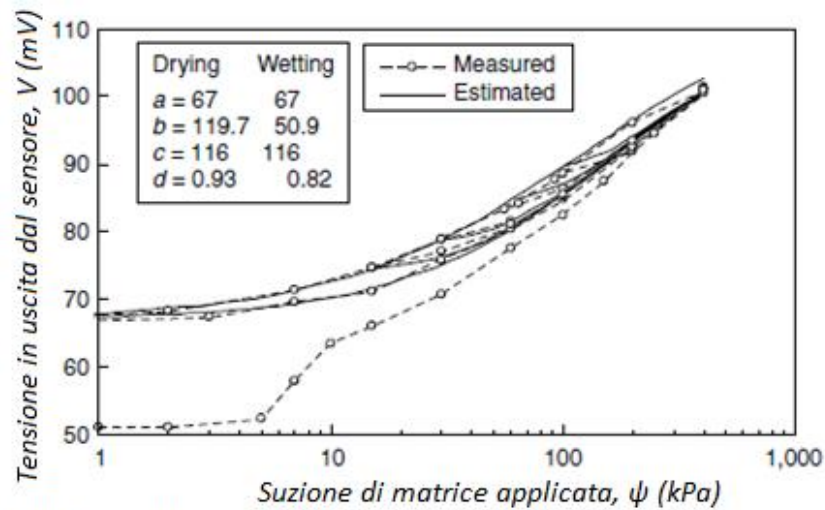
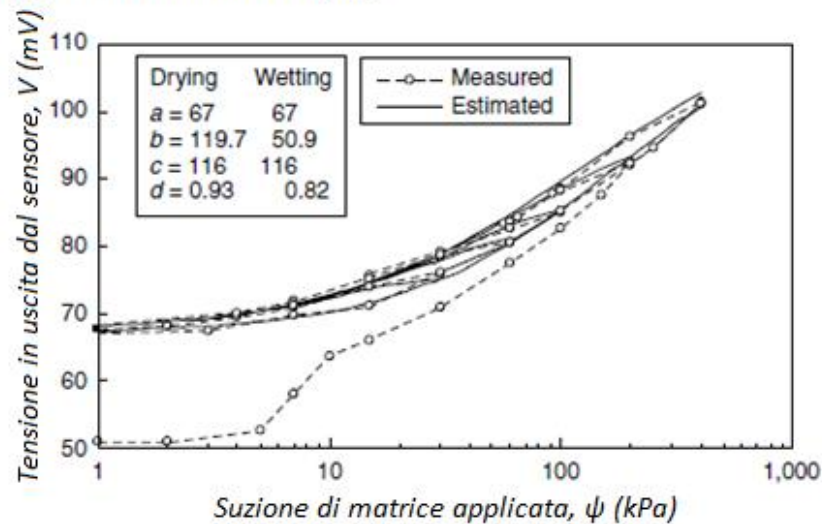
(a) *Curva Primaria di Drying*(b) *Curva Primaria di Wetting*

Figura 2.23 – Curve principali misurate e stimate per il sensore 3
(Feng e Fredlund, 2003)

Questi diagrammi mostrano come le curve ottenute per misurazione e per stima dei valori di interesse sono quasi coincidenti, con un errore inferiore al 5 %.

Feng e Fredlund nel 2003 hanno riportato la seguente procedura per la calibrazione dei sensori di conducibilità termica:

- Saturare l'estremità del sensore ceramico immergendola in acqua per 2 giorni o più;
- Una volta raggiunto l'equilibrio, ridurre a 0 la suzione applicata (fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio);
- Aumentare gradualmente la suzione applicata seguendo la procedura di calibrazione convenzionale per misurare la curva principale di Drying.
- Riessiccare il sensore ceramico per ottenere due punti sulla curva principale di Wetting.

II.2.5 Piastre di suzione e Piastre di pressione

Una piastra di suzione è costituita da un filtro poroso saturo in ceramica, interposto tra un campione di terreno e un contenitore d'acqua, e da un manometro a mercurio. Il terreno, in virtù della propria suzione, è povero d'acqua e tende quindi ad assorbirla grazie alla presenza del disco poroso, causando un calo di pressione all'interno del contenitore di acqua, misurato da un manometro. Conseguentemente al trasferimento d'acqua, la suzione misurata risulterà molto probabilmente inferiore alla suzione effettiva vigente nel terreno prima della prova.

Il limite principale della piastra di suzione è costituito dallo scarso range di applicabilità (non è in grado di misurare suzioni superiori ad 1 atm).

Una piastra di pressione è costituita anch'essa da un filtro poroso in ceramica, il cui valore d'ingresso d'aria dovrebbe essere superiore al valore massimo di suzione da misurare (generalmente 500 kPa). Al di sotto del filtro, un contenitore d'acqua è collegato ad un dispositivo di misurazione della pressione e ad un sistema di drenaggio; al di sopra, invece, è presente una camera stagna in cui è convogliata aria compressa.

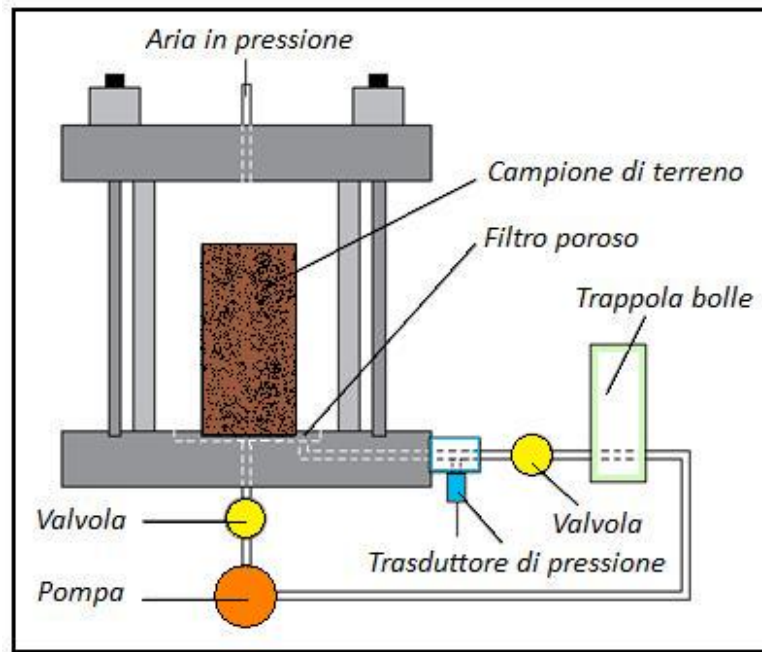


Figura 2.24 – Tipico piatto di pressione

Quando un campione di terreno è posto sul filtro ceramico e la pressione dell'aria all'interno della camera cresce, la pressione dell'acqua nel provino cresce proporzionalmente alla differenza tra la pressione dell'aria nella camera e la pressione atmosferica; pertanto, se tale differenza è superiore al valore di suzione del terreno, la pressione finale dell'acqua nel campione risulterà essere positiva e potrà essere misurata utilizzando le comuni apparecchiature di misurazione della pressione nei pori.

II.2.6 Tensiometri

Un tensiometro convenzionale misura la pressione assoluta negativa dell'acqua interstiziale, così come la piastra di suzione, ed è generalmente utilizzato in sito, sebbene abbia trovato alcune applicazioni anche in laboratorio (Tadapalli e Fredlund, 1991; Chiu, 1998). Lo strumento, formato da un tubo con una punta porosa in ceramica, viene riempito d'acqua da un serbatoio e infilato nel terreno, fino a che la pressione dell'acqua nel tensiometro è pari alla pressione dell'acqua nel terreno, cioè alla suzione.

All'equilibrio, si verifica l'interruzione del trasferimento d'acqua tra il terreno e il tensiometro e la suzione si traduce all'interno del serbatoio in uno sforzo di trazione, e può essere misurata con qualsiasi strumento che valuta la tensione. Se il terreno è saturo, l'acqua all'interno non scenderà e lo strumento misurerà il valore "zero"; se il terreno è non saturo l'acqua inizierà a permeare verso il terreno permettendo così allo strumento di misurare la pressione interstiziale. Quindi a seconda della pressione misurata si deduce il carico di suzione, e in base all'altezza in cui lo strumento misura "zero" si comprende il livello al quale il terreno risulta essere saturo.

Per una buona ed efficace prova è necessario utilizzare più tensiometri per diverse profondità (solitamente: 15-30-40 cm).

In conclusione, la Tabella 2.2 mostra i range di suzione sperimentalmente ottenuti per le diverse tipologie di dispositivi fin ora analizzati:

Dispositivo	Suzione misurata	Range di valori [kPa]	Tempi di raggiungimento dell'equilibrio
Psicrometro Termocoppia	totale	100 - 7500	minuti
Psicrometro Thermisor/ Transitor	totale	100 - 71000	minuti
Carta da Filtro con contatto	matriciale	30 - 30000	7 giorni
Carta da Filtro senza contatto	totale	400 - 30000	7-14 giorni
Blocco poroso	matriciale	30 - 3000	settimane
Sensori di conducibilità termica	matriciale	0 - 300	settimane
Piatto di pressione	matriciale	0 - 1500	ore
Tensiometro standard	matriciale	0 - (-100)	minuti
Sensore tensiometrico di suzione	matriciale	0 - (-1800)	minuti

Tabella 2.2 – Metodi di misurazione della suzione (Ridley e Wray, 1995)

II.2.7 Minitensiometro ad alta capacità

Il minitensiometro ad alta capacità (HCT) costituisce uno strumento di nuova generazione sviluppato negli ultimi anni a partire da un precedente prototipo, progettato e realizzato da alcuni ricercatori dell'allora Dipartimento di Ingegneria Geotecnica (oggi Dipartimento di Ingegneria Geotecnica, Idraulica e Ambientale, DIGA) e Dipartimento di Scienze fisiche dell'Università Federico II di Napoli.

Il primo prototipo di minitensiometro, derivato dallo strumento progettato da Ridley e Burland (1993), era composto da diverse parti, come mostrato in Fig. 2.25:

- Un filtro poroso ceramico intercambiabile dello spessore di 6 mm inserito in un corpo di acciaio inossidabile, la cui conformazione permetteva di eseguire diverse misurazioni;
- Un sensore di misura, collocato all'interno di un secondo corpo d'acciaio alle spalle del diaframma, in modo da garantire un adeguato isolamento del sensore rispetto all'ambiente esterno;
- Un "tappo" di protezione dei collegamenti elettrici.

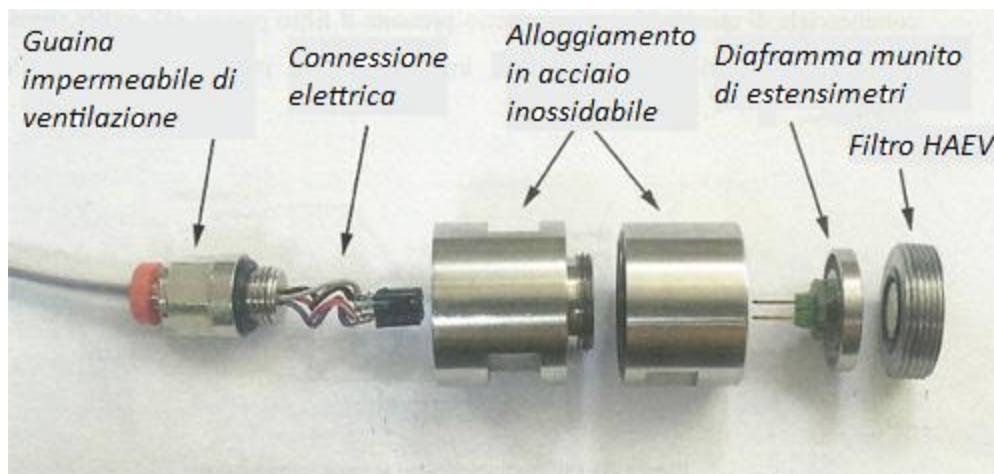


Figura 2.25 – Primo prototipo di minitensiometro

Presso il DIGA era stato realizzato un sistema per il condizionamento del minitensiometro, che permetteva l'esecuzione di una successione di fasi di essiccamento e saturazione senza soluzione di continuità. Il sistema ideato, rappresentato in Fig. 2.26, consente l'applicazione combinata di elevate temperature e pressioni di vuoto, in modo da migliorare l'efficacia della fase di essiccamento della pietra porosa e della camera di misura.

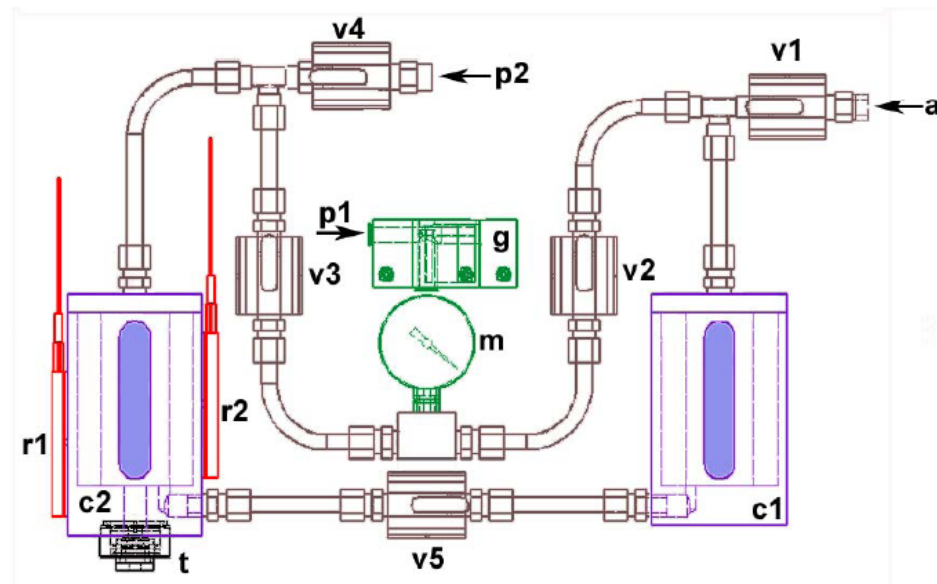


Figura 2.26 – Primo dispositivo di saturazione

Il solo ciclo iniziale di preconditionamento era insufficiente però ad ottenere un grado di saturazione dello strumento tale da raggiungere il valore limite di misura della suzione; pertanto, per cercare di raggiungere questo limite, si eseguiva una serie di cicli di pressurizzazione che permettevano di incrementare progressivamente il grado di saturazione della pietra porosa e, conseguentemente, il massimo valore di suzione misurabile. Infine, veniva eseguita la taratura dello strumento, incrementando progressivamente la pressione dell'acqua che lo saturava. A questo punto, lo strumento era pronto e venivano eseguite ulteriori verifiche sulla sua prontezza e capacità (analoghe al nuovo prototipo).

Successivamente, è stato possibile apportare alcune modifiche meccaniche ed elettriche al primo prototipo di minitensiometro rendendo più rapido e funzionale l'assemblaggio dei vari componenti.

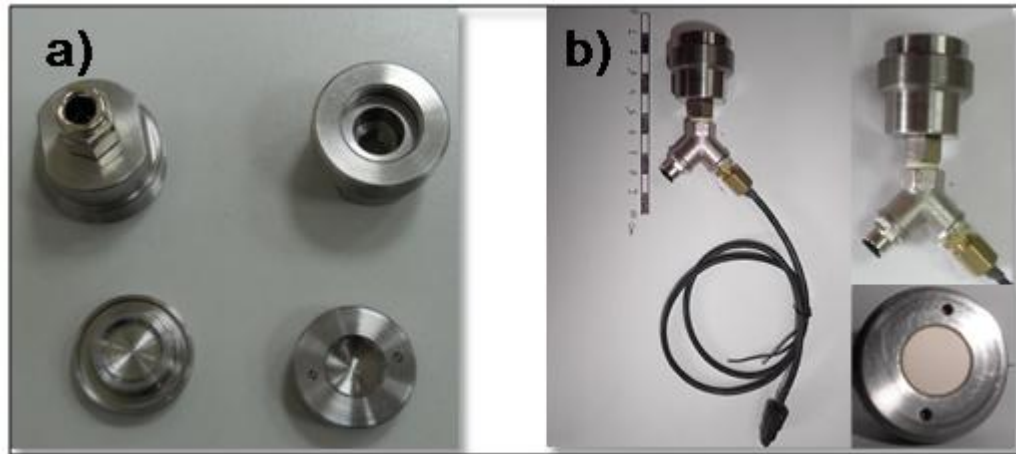


Figura 2.27 – (a) Componenti del nuovo minitensiometro, (b) Minitensiometro assemblato

Rispetto al primo prototipo, come mostrato in Fig. 2.27, si notano esteriormente delle correzioni significative: oltre alle modifiche meccaniche ed elettriche, sono stati modificati anche il sistema di saturazione e la procedura di condizionamento. In particolare, è stato realizzato un dispositivo di saturazione, mostrato in Fig. 2.28 (a), di dimensioni molto più ridotte che, garantendo le stesse funzionalità del precedente, consente di raggiungere valori di pressione decisamente più elevati in fase di condizionamento.

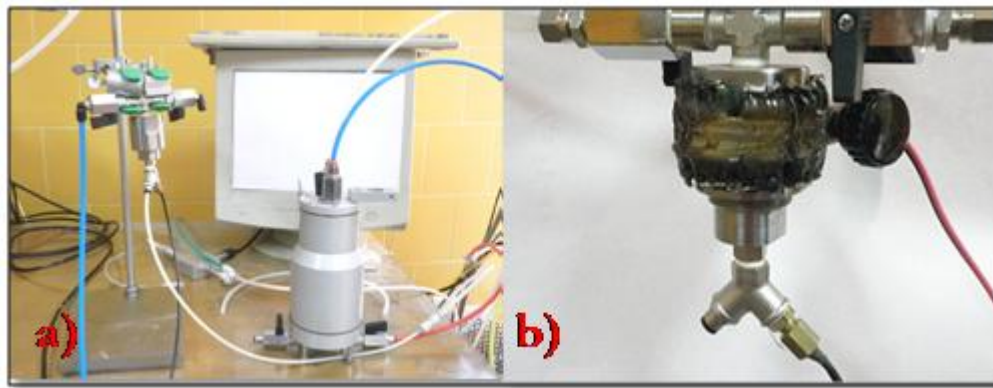


Figura 2.28 – (a) Nuovo sistema di saturazione, (b) Sistema di riscaldamento circolare

Questo dispositivo è inoltre di semplice ed economica realizzazione ed i risultati della fase di messa a punto e della sperimentazione preliminare indicano prestazioni soddisfacenti sia in termini di prontezza che di stabilità della misura, risultando estremamente promettenti in vista del futuro impiego dello strumento nell'ambito di sperimentazioni sia di laboratorio sia in sito.

CAPITOLO 3

VARIABILI TENSIONALI PER TERRENI

PARZIALMENTE SATURI

III.1 VARIABILI TENSIONALI NEI TERRENI PARZIALMENTE SATURI

III.1.1 Variabili tensionali di stato secondo Bishop (1959)

La pressione dell'aria e dell'acqua nei pori di un terreno parzialmente saturo hanno un impatto diretto sullo stato tensionale agente nei contatti particella-particella e, di conseguenza, sul comportamento meccanico del terreno, in termini, ad esempio, di resistenza a taglio e variazioni di volume. La comprensione di tale influenza è di fondamentale importanza per la progettazione delle opere di Ingegneria Civile e Geotecnica.

Numerose sono state le espressioni della tensione efficace per un terreno parzialmente saturo, ottenute modificando opportunamente il Principio delle Tensioni Efficaci di Terzaghi, al fine di tener conto delle pressioni interstiziali negative; Bishop, ad esempio, propose nel 1959 la seguente equazione:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w) \quad [3.1]$$

Dove σ' è la *tensione efficace*, σ è la *tensione totale*, u_a è la pressione dell'aria, u_w è la pressione dell'acqua, $(u_a - u_w)$ è la *suzione di matrice*, $(\sigma - u_a)$ rappresenta la *tensione netta* e χ è una proprietà del materiale che dipende dal grado di saturazione, e può assumere valori compresi tra 0 (per $S_r = 0$) ed 1 (per $S_r = 1$); infatti, l'espressione proposta da Bishop si riduce a quella di Terzaghi nel caso di terreno saturo. Il prodotto

$\chi (u_a - u_w)$ esprime la tensione interparticellare dovuta alla suzione, altrimenti detta *tensione di suzione*.

L'approccio di Bishop è un'interpretazione macroscopica che tenta di descrivere il contributo microscopico dei menischi allo stato tensionale interparticellare, e continua ad essere, ancora oggi, argomento di dibattito. Oltre ai dubbi di natura teorica, infatti, vi sono le difficoltà di ordine pratico legate alla determinazione sperimentale del parametro χ . Inoltre, nel 1962, Jennings e Burland esplorarono i limiti di applicabilità di tale principio, osservando che esso non era in grado di descrivere il collasso del materiale provocato dalla riduzione di suzione.

III.1.2 Variabili tensionali di stato – Successivi sviluppi

Come accennato in precedenza, attraverso la tensione efficace definita da Bishop si possono cogliere solo alcuni aspetti del comportamento meccanico dei terreni parzialmente saturi, come quelli legati alla resistenza di stato critico, ma non altri, come quelli relazionati a resistenza di picco, compressibilità e deformabilità. Ciò accade soprattutto poiché il comportamento tensio-deformativo del terreno parzialmente saturo, nel campo di suzione in cui si sono instaurati i menischi, che costituiscono una sorta di legame interparticellare in grado di modificare la microstruttura del terreno, è particolarmente complesso. Infatti, numerosi altri sono stati i tentativi al fine di estendere le variabili tensionali valide per i terreni saturi anche ai terreni non saturi. La Tabella 3.1 contiene una sintesi di alcune forme comuni di equazioni proposte nel tempo per i terreni parzialmente saturi:

$\sigma' = \sigma - \beta' \times u_w$	β' =fattore che tiene conto del numero di menischi in corrispondenza dei contatti tra le particelle, efficaci nel contribuire alla resistenza.	Croney, Coleman e Black (1958)
$\sigma = \bar{\sigma} \times a_m + u_a \times a_a + u_w \times a_w + R - A$	a_a =frazione di area in contatto con l'aria; $\bar{\sigma}$ =tensione minerale interparticellare; a_m =area di contatto tra le particelle minerali; a_w =area di contatto con la fase acquosa; R =tensione di repulsione del fluido di porosità dovuta a fattori chimici; A = tensione di attrazione del fluido di porosità dovuta a fattori chimici.	Lambe (1960)
$\sigma' = \sigma + \psi \times p''$	ψ =rapporto tra le aree delle porzioni di sezione occupate dall'acqua e dall'aria, compreso tra 0 e 1; p'' =depressione dell'acqua rispetto alla pressione atmosferica	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta \times p''$	β =fattore statistico misurato sperimentalmente in funzione dell'area di contatto.	Jennings (1960)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m - u_a) + \chi_s (h_s - u_a)$	χ_m =parametro di tensione effettiva per la suzione di matrice; h_m =suzione di matrice; h_s =suzione del soluto; χ_s = parametro di tensione effettiva per la suzione del soluto.	Richards (1966)

*Tabella 3.1 - Espressioni della tensione efficace per i terreni parzialmente saturi
(Fredlund, 1987)*

Tali relazioni sono complesse sia dal punto di vista concettuale che dal punto di vista pratico, e la loro adozione comporta una deviazione dalla meccanica classica dei mezzi continui.

Secondo Fredlund (1987), per i terreni non saturi è necessario utilizzare due variabili tensionali indipendenti: la scelta più comune è quella di usare come variabili indipendenti la tensione netta ($\sigma - u_a$) e la suzione di matrice ($u_a - u_w$). Questo

approccio, che per primo è stato usato da Coleman (1962), ha costituito la base principale per lo sviluppo dei modelli costitutivi dei terreni non saturi.

Nonostante infatti nel 1963 Bishop e Blight fornirono ulteriori giustificazioni sulla validità della relazione di Bishop, Burland nel 1964 e 1965 addusse contro quest'ultima alcune argomentazioni basate sull'esame di risultati sperimentali sulla compressibilità dei terreni non saturi. In definitiva, quest'ultimo concluse che il Principio delle Tensioni Efficaci non poteva essere formulato nel caso dei terreni non saturi, e che pertanto il comportamento meccanico di questi andava descritto impiegando le due variabili tensionali indipendenti precedentemente enunciate. Alle stesse conclusioni giunse in seguito anche Aitchinson, nel 1967.

Per rinforzare tale tesi e screditare l'efficacia della relazione di Bishop, Morgenstern, nel 1979, dimostrò che non soltanto il valore del parametro χ variava a seconda che esso fosse stato valutato per variazioni di volume o per resistenza a taglio, ma che inoltre non era effettivamente legato al grado di saturazione, in quanto il suo valore non risultava sempre compreso tra 0 e 1.

Quindi, in termini generali, l'utilizzo di un'unica variabile non è in grado di descrivere in maniera completa il fitto schema di interazioni che hanno luogo in un terreno parzialmente saturo; è vero però che tutte le relazioni riportate in Tabella 1.1 sono in grado di rappresentare le caratteristiche fondamentali del comportamento di questi terreni, come ad esempio il fenomeno di dilatanza e contraenza.

Anche studi recenti hanno dimostrato quanto appena enunciato.

III.2 TENSORI DI TENSIONE

Come precedentemente affermato, la scelta più comune per descrivere lo stato tensionale di un terreno parzialmente saturo è quella di usare come variabili indipendenti la tensione netta ($\sigma - u_a$) e la suzione di matrice ($u_a - u_w$).

Seguendo la metodologia della meccanica dei mezzi continui, entrambe le variabili tensionali indipendenti possono essere rappresentate in uno spazio tridimensionale da un tensore; il *tensore della tensione normale netta* in un sistema di coordinate cartesiane è:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} \quad [3.2]$$

Il *tensore della suzione matriciale* è invece:

$$\begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix} \quad [3.3]$$

In Fig. 3.1 (a) è illustrato un elemento cubico di terreno soggetto contemporaneamente alla tensione normale netta e alla suzione di matrice.

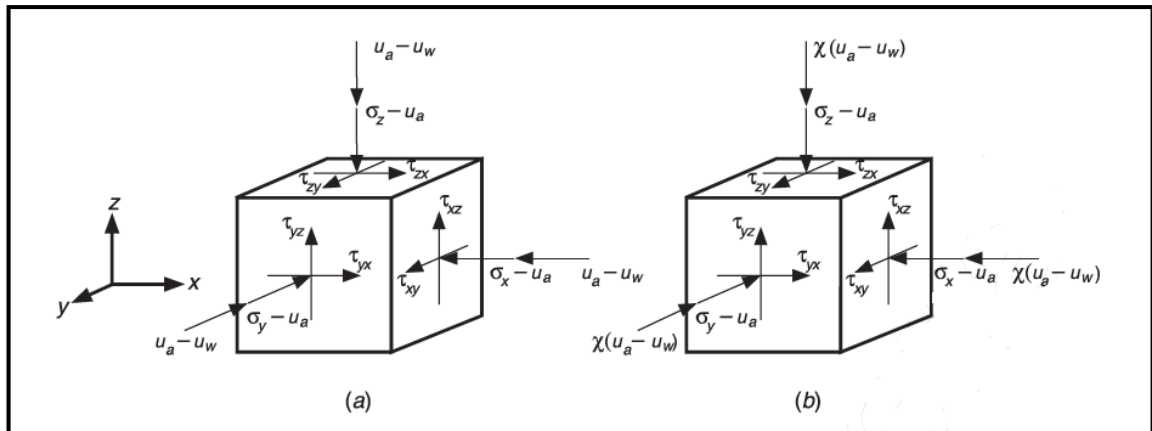


Figura 3.1 – Tensioni normali e tangenziali su un cubo elementare di terreno parzialmente saturo.

In seguito alla formulazione di Bishop, come mostrato in Fig. 3.1 (b), è stato possibile considerare la *tensione di suzione* come un tensore di tensione isotropo, che agisce contemporaneamente alla tensione normale netta:

$$\begin{bmatrix} \chi(u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & \chi(u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & \chi(u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad [3.4]$$

In realtà, secondo alcuni autori, la tensione di suzione in un terreno parzialmente saturo non è la stessa in tutte le direzioni, per cui può essere considerata come un tensore di tensioni anisotropo:

$$\begin{bmatrix} \chi_x(u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & \chi_y(u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & \chi_z(u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad [3.5]$$

Considerare la suzione come tensione anisotropa rispetta completamente la natura tensionale dei terreni parzialmente saturi.

In condizioni di equilibrio, le tensioni totali agenti in un terreno non saturo superano il valore della pressione dell'aria nei pori, la quale è a sua volta maggiore della pressione dell'acqua:

$$\sigma > u_a > u_w \quad [3.5]$$

Se questa condizione è verificata, i valori lungo la diagonale principale del tensore delle tensioni sono positivi, come generalmente accade in sito, e la suzione di matrice è positiva; ciò implica che, ponendo per convenzione la pressione atmosferica come origine del sistema di riferimento ($u_a = 0$), la pressione dell'acqua nei pori è negativa.

III.3 INFLUENZA DELLA SUZIONE SULLA RESISTENZA A TAGLIO

In funzione di quanto detto fino ad ora, risulta chiaro che, in un terreno non saturo, la presenza dei menischi capillari in corrispondenza dei punti di contatto tra le particelle genera come effetto quello di incrementare gli sforzi normali che si esercitano tra queste ultime. Ciò produce un incremento della resistenza allo scorrimento tra le particelle e, dunque, della resistenza al taglio. Questo incremento non cresce indefinitamente, ma raggiunge un valore asintotico, ed è evidentemente funzione della suzione. Pertanto in un terreno non saturo la resistenza al taglio è funzione della suzione.

Esistono differenti approcci per stimare la resistenza al taglio di un terreno non saturo.

Il primo utilizza la definizione di tensione efficace per terreni non saturi originariamente proposta da Bishop (1959), riportata in equazione [3.1]. Se si considera infatti la possibilità di riferirsi ad un'unica variabile tensionale, è immediato estendere il criterio di resistenza di Mohr Coulomb dei terreni saturi ai terreni non saturi: basta sostituire alla tensione efficace l'espressione della tensione efficace di Bishop; la resistenza al taglio di terreni non saturi può quindi essere determinata sulla base di due parametri di resistenza al taglio efficace, c' e φ' , e di una unica variabile di tensione, σ' , nel modo seguente:

$$\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi (u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad [3.6]$$

Alcuni dei restanti approcci a due variabili sono di seguito riportati in Tabella 3.2:

$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi''$	$\varphi'' =$ l'angolo di attrito che rappresenta l'incremento di resistenza prodotto da un incremento di $(\sigma - u_w)$ quando $(u_a - u_w)$ viene tenuto costante.	Fredlund (1978)
$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi'_b$	$\varphi'_b =$ l'angolo di attrito che descrive il contributo di resistenza a taglio dovuto alla suzione, per $(\sigma - u_a)$ costante.	Fredlund (1978)
$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + f \times (u_a - u_w)$	$f =$ funzione non lineare della suzione.	Wheeler (1997)
$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \theta_w \tan \varphi'$	$\theta_w =$ contenuto d'acqua volumetrico che decresce al crescere della suzione ed è una funzione non lineare della stessa.	Lamborn (1986)
$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi' \times S_r$	$S_r =$ grado di saturazione.	Oberg e Sallfors (1997)

Tabella 3.2 – Espressioni della resistenza al taglio di un terreno non saturo

L'approccio teorico utilizzato dai vari autori per analizzare l'effetto della suzione sulla resistenza a taglio dei terreni non saturi (Wheeler, Karube, 1996; Gili, 1989) risulta in accordo con le seguenti evidenze sperimentali:

- Per bassi valori della suzione, l'acqua del terreno riempie tutti i pori e quindi la variazione di suzione va considerata come una semplice variazione di pressione neutra in un terreno saturo, nel campo di validità del Principio delle Tensioni Efficaci di Terzaghi;
- Al crescere della suzione, l'acqua abbandona progressivamente i pori, e resta all'interno di sacche delimitate dai menischi, in corrispondenza dei punti di contatto con le particelle. Quindi la resistenza a taglio continua a crescere con la suzione a causa dell'incremento degli sforzi normali tra le particelle, ma con incrementi progressivamente minori.

Infine, dal momento che i terreni parzialmente saturi possono esibire isteresi nel piano contenuto d'acqua/suzione, come mostrato in Fig. 2.3 (a), la resistenza a taglio cambia se ci si trova su percorsi di essiccamento o umidificazione (Melinda et al, 2004): in particolare, a parità di tensione di confinamento e di suzione, la resistenza a taglio è maggiore se ci si trova su percorsi di essiccamento piuttosto che su quelli di umidificazione.

CONCLUSIONI

L'indagine bibliografica ha condotto ad uno studio attento della suzione e della sua misura, necessaria per descrivere il comportamento dei terreni parzialmente saturi, i quali costituiscono la principale categoria di terreni presenti in sito.

Il panorama dei modelli teorici attualmente a disposizione appare estremamente ridotto rispetto a quello riguardante i terreni asciutti o saturi, e sta subendo una notevole diffusione negli ambiti intellettuali e di studio ingegneristico solo negli ultimi anni, soprattutto allo scopo di valutare gli effetti che la suzione ha sul comportamento dei terreni non saturi. Quest'ultima, infatti, appare da un lato benefica poiché incrementa la resistenza a taglio di questi terreni, ma dall'altro, quando tende ad annullarsi, rappresenta una spia di allarme. Quest'ultimo caso, di non raro accadimento, ha luogo quando condizioni meteoriche, idrogeologiche o di altra natura inducono un progressivo incremento del grado di saturazione, che corrisponde ad un altrettanto continuo ridursi del valore di suzione e, quindi, del suo effetto benefico. Lo studio affrontato ha dunque messo in luce questa duplice e fondamentale caratteristica che riguarda lo studio dei terreni parzialmente saturi, a cui ingegneristicamente approccia ormai la stragrande maggioranza della platea intellettuale.

Bibliografia

- Feng, M. and Fredlund, D.G. (2003). Calibration of thermal conductivity sensors with consideration of hysteresis. *Can. Geotech. J.*, 40, 1048–1055.
- Fredlund D.G. 2006. Unsaturated soil Mechanics in engineering practice. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol 132, N. 3, 286-321.
- Fredlund D.G., Xing A., Fredlund M.D., Barbour S.L., 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* 33, 440-448.
- Fredlund, D.G. (1996). *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley, New York, 517 pp.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 517.
- Harrison, B.A. and Blight, G.E. (2000). A comparison of in situ soil suction measurements. *Proc. Conf. on Unsaturated Soils for Asia*, Singapore, Rahardjo, Toll and Leong eds, Balkema, Rotterdam, pp. 281–284.
- Houlby, G.T. (1997). The work input to an unsaturated granular material.
- Lourenço, S.D.N., Gallipoli, D., Toll, D.G., Evans, F.D. (2006), Development of a commercial tensiometer for triaxial testing of unsaturated soils, *Atti del 4th Int. Conference on Unsaturated Soils*, 2-6 aprile 2006 Phoenix, vol. 2, pp. 1875-1886.
- Marinho, F.A.M. & Chandler R.J. (1994). A new instrument for the

measurement of soil moisture suction: discussion. *Geotechnique* 44(3): 551-556.

- Marinho, F.A.M. & Pinto, C.d.S. (1997). Soil suction measurement using a tensiometer. In Almeida (ed). *Recent developments in Soil and Pavement Mechanics* 1: 249-254. Rotterdam: Balkema.
- Marinho, F.A.M. (1995). Cavitation and the direct measurement of soil suction. *Proc. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, E.E. Alonso and P. Delage, eds., Balkema, Rotterdam, pp. 623–630.
- Marinho, F.A.M. and de Sousa Pinto, C. (1997). Soil suction measurement using a tensiometer. *Proc. Conf. on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, Almeida, ed., pp. 249–254.4
- Ng, C.W.W. and Chen, R. (2005). Advanced suction control techniques for testing unsaturated soils (in Chinese). Keynote lecture, *2nd Nat. Conf. on Unsat. Soils*, Hangzhou, China, Zhejiang University Press, 144–167.
- Ng, C.W.W. and Chen, R. (2006). Advanced suction control techniques for testing unsaturated soils (in Chinese). *Chinese J. of Geotech. Eng.*, Vol. 28, No. 2, 123–128.
- Ng, C.W.W. and Pang, Y.W. (2000a). Experimental investigation of soil–water characteristics of a volcanic soil. *Can. Geotech. J.*, 37(6), 1252–1264.
- Ng, C.W.W., Cui, Y.J., Chen, R. and Delage, P. (2007). The axistranslation and osmotic techniques in shear testing of unsaturated soils: a comparison. *Soils and Foundations*. Vol. 47, No. 4, 675–684.

- Oberg A., Sallfors G., 1997. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve, *geotechnical Testing Journal*, GTJODJ,20(1): 40-48.
- Oliveira O.M. & Marinho, F.A.M. (2008). Suction equilibration time for a high capacity tensiometer. *Geotechnical Testing Journal*, vol31, n.1: 1-5.
- Pearsall, I.S. (1972). *Cavitation*. Mills and Boon, London.
- Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique* 43: 321-324.
- Ridley, A.M. and Burland, J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2), 321–324.
- Ridley, A.M. and Wray, W.K. (1995). Suction measurement: a review of current theory and practices. *Proc. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, Alonso and Delage eds, Balkema, Rotterdam, pp. 1293–1322.
- Rojas, J.C., Pagano, L., Zingariello, M.C., Mancuso, C., Giordano G., Passeggio, G. (2006). Un minitensiometro ad alta capacità: primi risultati. Incontro annuale ricercatori geotecnica, IARG 2006, 24-28 giugno 2006, Pisa.
- Rojas, J.C., Pagano, L., Zingariello, M.C., Mancuso, C., Giordano G., Passeggio, G. (2008). A new high capacity tensiometer: first results. First European Conference on Unsaturated Soils, 2-4 july 2008, Durham.
- Take, W.A., Bolton, M.D. (2003), Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction, *Geotechnique* 53, No.2, 159-172.

- Tarantino, A. & Mongiovì, L. (2001). Experimental procedures and cavitation mechanisms in tensiometer measurements. *Geotechnical and Geological Engineering* 19: 189-210.
- Tarantino, A. & Mongiovì, L. (2002). Design and construction of a tensiometer for direct measurement of matric suction. In Jucà, de Campos & Marinho (eds). *Unsaturated Soils: Proc. 3rd inter. Conf. Recife, 10-13 March 2002*. vol 1: 319-324. Lisse: Balkema.
- Tarantino, A. & Mongiovì, L. (2003). Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction. *Geotechnique* 53 (1): 137-141.
- The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, Texas, A&M University Press, 39 pp.
- Wheeler S.J., Karube D., 1996. State of the art report. Constitutive modelling. *Proc. I Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris*, 3:1323-1356.
- Wheeler S.J., Sharma R.S., Buisson M.S.R., 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Geotechnique* 53, N. 1, 41-54.
- Wheeler S.J., Sivakumar V., 1995. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Geotechnique* 45, N. 1, 35-53.
- Wheeler S.J., Sivakumar V., 2000. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part. 2: Shearing and constitutive modelling. *Geotechnique* 50, N. 4, 369-376.
- Young, R.F. (1989). *Cavitation*. McGraw-Hill, London.

RINGRAZIAMENTI

Con questo lavoro di tesi si conclude il primo triennio di studio qui alla Facoltà di Ingegneria. La strada è ancora lunga, ma per noi questo è un traguardo importante!

Vogliamo ringraziare con infinita stima e ammirazione il nostro relatore, il Prof. Gianfranco Urciuoli, il quale non solo con la sua dedizione ci ha fatto appassionare ad una materia interessante come la Geotecnica, ma rappresenta per noi un modello di persona e di insegnate da ricordare per sempre.

Ringraziamo allo stesso modo l'Ingegnere Papa che con simpatia e pazienza ci ha fornito la possibilità di concludere al meglio questo piccolo lavoro. Speriamo di rincontrarlo nel corso dei nostri prossimi studi!

Ringraziamo, in fine, ma non per ultimi, le nostre famiglie ed i nostri affetti più cari per esserci state accanto ed averci sostenuto durante questo percorso... Sappiamo di aver spesso esagerato... ma almeno vi abbiamo dimostrato di avercela fatta!

Questo traguardo lo dedichiamo soprattutto a voi.