

CAPITOLO III

ATTREZZATURE E PROCEDURE SPERIMENTALI

III.1 Introduzione

Come chiarito nel capitolo I, in meccanica dei terreni non saturi è necessario un approccio a due variabili tensionali (e.g. tensioni nette e suzione) e due di stato volumetrico (come ad esempio volume specifico, v , e volume specifico d'acqua, v_w , cfr. § I.5)¹.

Dal punto di vista della sperimentazione, ciò si traduce nella necessità di apparecchiature specifiche per studiare in laboratorio il comportamento tensio-deformativo dei terreni non saturi. Si richiede, infatti, di poter controllare le tensioni totali nonché quelle agenti in ciascuno dei fluidi di porosità e misurare separatamente le variazioni di dimensioni e di peso.

Molti dei lavori sperimentali finora realizzati hanno avuto come obiettivo principale quello di identificare le regole generali che governano il comportamento dei terreni non saturi. In questo senso, numerosi studi sono stati dedicati alla ricerca di modelli in grado di riprodurre risultati ottenuti nel campo delle medie e grandi deformazioni (e.g. Alonso et al., 1990; Alonso et al., 1992; Wheeler e Sivakumar, 1995; Cui e Delage, 1996; Rampino, 1997; Geiser, 2000; Romero, 1999; Barrera, 2002).

Nonostante sia chiara la necessità di analizzare il comportamento dei terreni non saturi anche nel campo delle piccole deformazioni (Wu et al., 1984; Quian et al., 1991), risultano tuttora pochi i lavori di letteratura dedicati a questo aspetto, ed ancora più rari gli esempi di apparecchiature effettivamente idonee allo scopo.

Nell'ambito di questa tesi sono stati intrapresi entrambi i tipi di sperimentazione, sul limo argilloso del Po, usando la cella triassiale a suzione controllata messa a punto da Rampino (1997) per la caratterizzazione del comportamento alle medie e grandi deformazioni ed una cella di colonna risonante e taglio torsionale (Resonant Column Torsional Shear, RCTS) che

¹ Facendo riferimento a condizioni di fase aria continua (cfr. § I.2), data la presenza di un fluido compressibile nei pori la tensione netta $[\sigma]-u_a$ agisce sul solo scheletro solido come succede per la tensione totale $[\sigma]$ nel caso dei terreni saturi in condizioni drenate. La suzione, ossia la differenza tra le pressioni dell'aria, u_a , e dell'acqua, u_w , nei pori, condiziona lo stato tensionale dello scheletro solido attraverso acqua di volume e di menisco (cfr. § I.4). Inoltre, sempre a causa della compressibilità dell'aria di porosità, le variazioni di volume non sono deducibili da quelle di contenuto d'acqua.

permette di eseguire prove a suzione controllata su terreni non saturi, contributo innovativo al tema di ricerca del comportamento a piccole deformazioni.

In questo capitolo, dopo l'analisi delle principali caratteristiche che distinguono le apparecchiature dedicate alla sperimentazione su terreni non saturi da quelle "classiche" per terreni saturi e delle soluzioni recentemente adoperate in tale settore, si passa alla descrizione delle attrezzature e delle procedure utilizzate nel presente lavoro sperimentale, dando particolare rilievo alla nuova cella RCTS a suzione controllata.

III.2 Il controllo della suzione

In natura la pressione dell'aria all'interno dei pori di un terreno non saturo è tipicamente atmosferica. Valori non nulli di suzione comportano quindi valori negativi della pressione dell'acqua di porosità. Tale condizione non è sempre verificata nelle prove di laboratorio: le diverse tecniche ad oggi sviluppate per controllare la suzione consentono di imporre la quantità ($u_a - u_w$) al contorno del provino, evitando di avere pressioni negative all'interno dei circuiti della u_w e di drenaggio allo scopo di impedire la cavitazione nei casi in cui questi risultano saturi d'acqua. Le metodologie esistenti si distinguono a seconda di come viene comunicata la suzione (Gens e Romero, 2000): tramite acqua allo stato liquido (tecnica della traslazione degli assi e tecnica osmotica) oppure tramite vapore (tecnica del controllo dell'umidità ambientale).

III.2.1 La tecnica di traslazione degli assi

La tecnica di traslazione degli assi è senz'altro il metodo più diffuso per controllare la suzione di matrice di un provino non saturo. Consiste nell'imporre il livello desiderato di tensione media netta $[\sigma] - u_a$ e suzione ($u_a - u_w$), agendo sui valori delle pressioni totali, $[\sigma]$, dell'aria di porosità, u_a , e dell'acqua di porosità, u_w , ed utilizzando valori positivi per quest'ultima. In tal modo, si scongiura il rischio di cavitazione all'interno delle linee di drenaggio ed è possibile misurare la pressione neutra tramite trasduttori convenzionali. Interponendo tra il provino ed i circuiti di applicazione della u_w un elemento poroso ad alto valore di ingresso d'aria (high air entry value, haev), in grado di mantenere il suo grado di saturazione unitario fino

all'applicazione di valori elevati di suzione, si impedisce il passaggio dell'aria nei circuiti di drenaggio garantendone la saturazione a breve termine².

La metodologia fu introdotta da Hilf (1956) per misurare la suzione: il provino di terreno non saturo veniva inserito in una camera a tenuta all'interno della quale la pressione dell'aria veniva incrementata fino a traslare la pressione dell'acqua nel campo positivo. Un sensore di pressione standard, messo in collegamento con l'acqua di porosità del provino attraverso un elemento poroso ad alto valore d'ingresso d'aria, consentiva di ottenere la suzione come differenza tra le pressioni u_a ed u_w . L'osservazione sperimentale che giustifica suddetta tecnica è che ad un incremento di pressione dell'aria corrisponde un uguale incremento di pressione dell'acqua (Hilf, 1956; Olson e Langfelder, 1965). Nel caso di fase aria continua all'interno del provino ciò è qualitativamente riconducibile a quanto detto nel § I.4: data l'incompressibilità delle particelle solide e dell'acqua di porosità, un aumento di u_a in condizioni non drenate non fa variare la configurazione dei menischi capillari e quindi non modifica la suzione, producendo perciò un ugual aumento di u_w .

La tecnica, intesa come metodo di applicazione della suzione, trova spiegazione negli stessi lavori sperimentali finalizzati a dimostrare la validità di tensione media netta e suzione quali variabili indipendenti (Bishop e Donald, 1961; Fredlund, 1973; Tarantino et al., 2000). In particolare, i null tests di Fredlund e Morgenstern (1977) ne verificano l'efficacia per gradi di saturazione compresi tra 76 e 95%. Tarantino et al. (2000), con riferimento a gradi di saturazione compresi 56 e 77% e misurando pressioni dell'acqua di porosità negative con il tensiometro Imperial College (Ridley e Burland, 1993), mostrano che un incremento di pressione dell'aria non produce apprezzabili variazioni di suzione in condizioni di volume e contenuto d'acqua costante. Anche se non esistono riprove sperimentali conclusive della non applicabilità della traslazione degli assi in condizioni di fase aria discontinua ($S_r > 85\%$), in questo caso alcuni autori ne sconsigliano l'uso (Olson e Langfelder, 1965; Bocking e Fredlund, 1980). In realtà, la maggior parte delle critiche rivolte a tale metodologia riguarda i suoi limiti come tecnica per la misura (e non per il controllo) della suzione. Bocking e Fredlund (1980) dimostrano tramite un modello numerico che la suzione può essere

² Nel corso delle prove sperimentali su terreni non saturi, in genere di lunga durata, l'aria penetra per diffusione attraverso l'elemento h_{ev} , richiedendo l'adozione di dispositivi particolari per allontanare le bolle accumulate nei circuiti di drenaggio (cfr. III.4).

sovrastimata significativamente quando la fase aria è discontinua: l'incremento della pressione dell'aria al contorno del provino produce, in condizioni non drenate, una modifica della configurazione dei menischi capillari, per effetto della compressione delle bolle presenti nel fluido di porosità, e quindi dà luogo ad una variazione della suzione. Viceversa, quando la suzione viene applicata tramite la tecnica della traslazione, le pressioni dell'aria e dell'acqua vengono entrambe controllate al contorno del provino. Il conseguimento di condizioni macroscopiche di equilibrio garantisce che l'aria occlusa abbia raggiunto la pressione applicata dall'esterno, per effetto della diffusione attraverso l'acqua. Tale criterio è più o meno esplicitamente condiviso nei numerosi lavori sperimentali che, anche recentemente, fanno uso della traslazione degli assi in prossimità della saturazione (e.g. Sharma, 1998; Romero, 1999).

Al principio della traslazione degli assi sono riconducibili numerose apparecchiature sperimentali: dispositivi per determinare la curva caratteristica (Richards, 1941; 1948), permeametri (Klute, 1965; Fleureau e Taibi, 1995), edometri (Aitchinson e Woodburn, 1969; Barden et al., 1969; Fredlund e Morgenstern, 1976; Lloret e Alonso, 1985; Balmaceda, 1991; Romero, 1999), apparecchi di taglio diretto (Escario e Saez, 1986; Gan et al., 1988; De Campos e Carrillo, 1995), celle triassiali (Bishop e Donald, 1961; Matyas e Radhakrishna, 1968; Fredlund e Morgenstern, 1976; Josa et al., 1987; Maatouk, 1993; Sivakumar, 1993; Rampino et al., 1999a; Sharma, 1998; Carvalho, 2001; Barrera, 2002).

Tipicamente, l'elemento poroso che inibisce il passaggio dell'aria all'interno dei circuiti di drenaggio è una piastra ad alto valore d'ingresso d'aria, ossia un elemento ceramico con pori di dimensioni ridotte, che una volta saturato risulta permeabile all'acqua ma non all'aria. In commercio sono disponibili piastre haev in grado di sostenere suzioni fino a 1.5 MPa. In alternativa, è possibile utilizzare membrane di acetato di cellulosa, che presentano valori d'ingresso d'aria più elevati (fino a 7 MPa) ma risultano più compressibili, vanno incontro a degradazione chimica e biologica e fanno diffondere l'aria più rapidamente. Per questo motivo, le membrane sono adatte essenzialmente a percorsi di diminuzione di suzione (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lagny, 1996).

A titolo d'esempio, le figure III.1, III.2 e III.3 riportano rispettivamente lo schema di un edometro (Balmaceda, 1991), di una scatola di taglio (De Campos e Carrillo, 1995) e di una

cella triassiale (Carvalho, 2001). In tutti e tre i casi, la pressione dell'acqua di porosità viene applicata dal basso, attraverso una piastra ad alto valore di ingresso d'aria, e la pressione dell'aria viene imposta alla base superiore del provino, mediante una piastra porosa tradizionale, di permeabilità più elevata. Nell'edometro di figura III.1 la pressione verticale è applicata tramite aria mediante una membrana che ricopre la testa di carico. Attraverso quest'ultima si comunica al provino la pressione dell'aria di porosità. Analogamente, nella cella triassiale di figura III.3, la pressione di confinamento è applicata tramite aria ed il circuito della pressione dell'aria nei pori attraversa la testa di carico. Nel caso della scatola di taglio in figura III.2, invece, la u_a viene applicata all'interno della camera di confinamento ed il carico verticale dall'esterno.

Schemi alternativi a quelli di figura III.3 sono stati proposti in letteratura per ridurre i percorsi di drenaggio e quindi i tempi di equalizzazione. Maatouk (1993) applica la pressione dell'aria a metà altezza del provino, attraverso un foro realizzato nella membrana in lattice ed un diffusore appositamente ideato (v. figura III.4). Sharma (1988), Romero (1999) e Barrera (2002) hanno messo a punto celle triassiali in cui è possibile controllare le pressioni dell'acqua e dell'aria applicandole ad entrambi gli estremi del provino (v. figura III.5). Nel piedistallo e nella testa di carico sono alloggiare due piastre porose: una anulare più permeabile connessa alla u_a ed una ad alto valore d'ingresso d'aria per applicare la u_w (v. dettaglio in figura III.6). Sono previsti un ingresso ed un'uscita per l'acqua, in modo da consentire operazioni di spurgo dei circuiti di drenaggio (cfr. § III.4). Le variazioni di contenuto d'acqua si deducono dalle letture a due burette in continuità idraulica con le piastre haev. Barrera (2002) segnala la possibilità di intrappolamento di bolle d'aria quando si impone una riduzione di suzione e perciò due fronti di umidificazione avanzano simultaneamente verso il centro del provino.

La tecnica della traslazione è concettualmente molto semplice, può essere realizzata con attrezzature "standard" e permette di variare la suzione in modo continuo. I suoi limiti principali risiedono nell'impossibilità di applicare valori elevati di suzione, nella necessità di apparecchiature che lavorino a forti pressioni, quando si vogliono raggiungere contemporaneamente valori considerevoli di $[\sigma]-u_a$ ed (u_a-u_w) , e nel fatto che la cavitazione viene impedita, oltre che nei circuiti di drenaggio, anche nel terreno, mentre essa può teoricamente verificarsi in natura.

III.2.2 La tecnica osmotica

La tecnica osmotica prevede il contatto del provino con una soluzione salina attraverso l'interposizione di una membrana impermeabile al soluto e permeabile al solvente (acqua). Il soluto tipicamente utilizzato è il glicole polietilenico (PEG), ad elevata massa molecolare. Ciò consente di scegliere membrane che trattengano le molecole di PEG e che lascino passare i sali dell'acqua di porosità del terreno. In queste condizioni, all'equilibrio, la suzione all'interno del provino è teoricamente uguale, in valore assoluto, alla pressione osmotica della soluzione. Pertanto, è possibile ottenere effettivamente pressioni neutre negative nel provino, mantenendo a pressione atmosferica sia l'aria di porosità sia la soluzione di PEG ed i circuiti di drenaggio.

La metodologia, inizialmente utilizzata in agronomia per la determinazione della curva caratteristica, è stata poi adattata ad apparecchiature a suzione controllata quali edometri (Kassif e Ben Shalom, 1971; Delage et al., 1993; Dineen e Burland, 1995; Tarantino e Mongiovì, 2000) e celle triassiali (Komornik et al., 1980; Delage et al., 1987).

Le membrane semipermeabili possono essere di due tipi: asimmetriche, in polietersulfona, con una parte più spessa a contatto con il terreno ed una base più porosa a contatto con la soluzione, o simmetriche, con porosità omogenea, di acetato di cellulosa. Attualmente si preferiscono le prime, a causa di una maggiore stabilità nel tempo ed una migliore efficienza nell'impedire il passaggio del soluto (Slatter et al., 2000).

La relazione tra concentrazione di PEG e suzione applicata al provino dipende fortemente dal metodo di misura della suzione utilizzato (si veda a tal proposito la figura III.7). Dineen e Burland (1995) constatano che, infatti, esiste una forte differenza tra la curva di calibrazione ottenuta misurando direttamente la pressione osmotica di una soluzione di PEG mediante psicrometro (misurando cioè l'umidità relativa dell'aria al di sopra della soluzione) e quella che si ottiene interponendo la membrana semi-permeabile tra uno strumento di misura della pressione neutra e la soluzione. Il metodo di calibrazione ha un effetto significativo sui risultati perché evidentemente la stessa presenza del complesso di misura (tensiometro, membrana) modifica il valore della pressione neutra applicata. Utilizzando il tensiometro Imperial College (Ridley e Burland, 1993), gli stessi autori trovano invece un ottimo accordo tra misure di pressione neutra effettuate, all'equilibrio, sul provino al quale si applica la

suzione e direttamente sulla membrana. Di conseguenza, ritengono essenziale adoperare curve di calibrazione ottenute con la configurazione sperimentale che si intende utilizzare.

La figura III.8 mostra a titolo d'esempio una cella triassiale (Delage et al., 1987) che consente il controllo della suzione tramite tecnica osmotica. La soluzione di PEG è messa a contatto con il provino attraverso entrambe le basi, in modo da ridurre il percorso di drenaggio, e si muove lentamente all'interno di un circuito chiuso che comprende (in serie) la testa di carico, la base inferiore ed un serbatoio che contiene una quantità di soluzione sufficiente a rendere trascurabili le variazioni di concentrazione dovute agli scambi d'acqua con il provino. Il liquido lambisce le membrane permeabili superiore ed inferiore (comuni membrane da dialisi) attraverso gli spazi di una rete metallica di supporto e gli incavi circolari concentrici ricavati su piedistallo e testa di carico. Un condotto ricavato nella base inferiore collega l'aria di porosità con l'atmosfera. Le variazioni di contenuto d'acqua del provino vengono dedotte misurando il livello all'interno del serbatoio contenente la soluzione tramite un tubo capillare graduato. La concentrazione di PEG viene scelta sulla base della suzione di matrice desiderata, assunta pari alla suzione osmotica che possiede la stessa soluzione in un recipiente isolato, e viene controllata durante le prove mediante un rifrattometro.

Dineen e Burland (1995) e Dineen (1997) hanno messo a punto l'edometro rappresentato in figura III.9, nel quale la suzione è controllata con la tecnica osmotica. La soluzione di PEG viene fatta circolare al di sotto della base inferiore del provino attraverso la griglia che sostiene la membrana semipermeabile. Il serbatoio è sistemato sopra una bilancia elettronica in modo che le variazioni di contenuto d'acqua siano deducibili per pesata ed acquisite in automatico. La caratteristica particolarmente originale dell'apparecchiatura consiste nel tensiometro Imperial College (Burland e Ridley, 1993) incorporato nella testa di carico per misurare la suzione. È possibile estrarre tale sensore per saturarlo quando, in prove di lunga durata, dovesse verificarsi cavitazione.

Al vantaggio di poter operare a pressione dell'aria atmosferica e pressione neutra negativa, riproducendo con maggior fedeltà quanto avviene in natura, si oppongono varie limitazioni, che di fatto giustificano la diffusione finora ridotta della tecnica osmotica. La relazione tra suzione applicata e concentrazione del soluto dipende significativamente dalla temperatura, il che impone di operare in ambienti a temperatura controllata, ed in minor misura dalla massa molecolare del soluto, oltre che, come già illustrato, dalla configurazione strumentale. Il

metodo più idoneo per superare le incertezze sulla suzione di matrice realmente imposta è la sua misura diretta, anche se la necessità di estrarre il sensore di pressione neutra in prove di lunga durata limita tale soluzione al caso edometrico (Dineen e Burland, 1995). Ulteriori inconvenienti sono il passaggio di modeste quantità di PEG attraverso la membrana, che può modificare le proprietà del terreno, ed il progressivo deterioramento della membrana stessa, al contatto con gli acidi ed i batteri eventualmente presenti nell'acqua di porosità. La suzione massima che si può applicare è di 1.5 MPa, poiché valori maggiori comporterebbero viscosità eccessive del PEG e difficoltà nel suo trasporto (Vicol, 1990).

III.2.3 La tecnica di controllo dell'umidità ambientale

La tecnica del controllo dell'umidità ambientale consiste nel condizionare l'umidità relativa all'interno di un sistema isolato termicamente, scambiando esclusivamente vapore con il terreno. Come discusso nel § I.3, a temperatura costante la suzione totale Ψ all'equilibrio è funzione univoca dell'umidità, secondo l'equazione I.1.

L'umidità relativa può essere controllata tramite soluzioni acquose, utilizzando soluti non volatili (soluzioni saline) o volatili (soluzioni di acido). Si impiegano soluzioni saline sia sature di soluto (concentrazione uguale o leggermente superiore alla solubilità) sia parzialmente sature. I valori di umidità relativa in genere non superano il 97% (corrispondente ad una suzione di circa 4 MPa a $t = 20^\circ\text{C}$) per limitare l'indecisione dovuta a variazioni di temperatura. Difatti, in corrispondenza di tale limite, una variazione di temperatura ambientale di $\pm 0.5^\circ\text{C}$ corrisponde ad una variazione di ± 4 MPa di suzione. In tabella III.1 sono indicati i valori di suzione che corrispondono ad alcune soluzioni saline. Si noti come sia possibile raggiungere suzioni molto più elevate di quelle consentite dalle tecniche di traslazione ed osmotica.

Per quanto riguarda le soluzioni di acido, uno dei più utilizzati è l'acido solforico, nell'intervallo di umidità relativa 5%-86% (suzioni totali comprese tra 400 e 20 MPa). La suzione viene imposta scegliendo opportunamente la concentrazione della soluzione; umidità superiori all'86% risultano difficili da ottenere per diluizione, mentre valori inferiori al 5% (i.e. concentrazioni particolarmente elevate) possono modificare la struttura chimica del terreno (Gens e Romero, 2000).

Il trasferimento di vapore può essere realizzato per diffusione, collocando il provino all'interno di un recipiente chiuso, o con un sistema di convezione forzata d'aria, nel quale il flusso di vapore lambisce il contorno del provino o attraversa il provino stesso. Quest'ultimo

metodo ha maggior efficienza, ossia richiede minori tempi di equilibrio, ma è realizzabile solo quando l'aria di porosità è continua, ovvero per gradi di saturazione inferiori all'85-90%.

La tecnica sperimentale descritta è stata spesso utilizzata per la determinazione della curva caratteristica (e.g. Vanapalli et al., 1996; Romero, 1999). Nella figura III.10 è riportata una foto del sistema, estremamente semplice, adottato da Romero (1999). Il provino di terreno viene collocato in un contenitore stagno di vetro di volume ridotto, contenente la soluzione salina e conservato in un ambiente a temperatura controllata. Il periodo di equilibrio è generalmente maggiore di 3 settimane per terreni argillosi e distanze massime di drenaggio di 1 cm (Gens e Romero, 2000).

Più di recente, il metodo di controllo dell'umidità è stato implementato su apparecchiature complesse per studiare il comportamento meccanico dei terreni non saturi. Alonso e Oldecop (2000) presentano un edometro del tipo cella di Rowe di grandi dimensioni (figura III.11), utilizzato per studiare il comportamento di terreni a grana grossa (rockfill). La suzione totale all'interno del provino è controllata facendo circolare il vapore a circuito chiuso: l'aria, spinta da una pompa, passa sotto forma di bolle nella soluzione salina contenuta in un serbatoio e successivamente attraversa il provino in direzione verticale, dalla testa di carico fino alla piastra inferiore. Un igrometro consente di controllare l'umidità relativa.

Simili configurazioni sperimentali sono state adoperate su edometri di dimensioni standard per realizzare prove a suzione elevata su terreni a grana fina, presso il CERMES dell'Ecole Nationale des Pontes et Chaussées di Parigi (Yahia-Aissa, 1999; Yahia-Aissa et al., 2000) e nel laboratorio di meccanica dei terreni dell'UPC di Barcellona (Romero, 2002). Nel caso degli edometri messi a punto presso l'UPC, i circuiti ricavati all'interno della testa di carico e del piedistallo consentono di imporre il passaggio di vapore sia al contorno del provino sia attraverso lo stesso. La quantità d'acqua scambiata con il terreno viene dedotta dalle variazioni di peso dei serbatoi contenenti la soluzione salina. Sempre con riferimento ad un terreno argilloso ed a distanza massima di drenaggio di 1 cm, in questo caso i tempi di equilibrio risultano inferiori a 3 settimane (Gens e Alonso, 2000).

Il principale vantaggio della tecnica di controllo dell'umidità è rappresentato dalle elevate suzioni raggiungibili; di contro, non è possibile applicare suzioni ridotte con sufficiente accuratezza, è necessario un preciso sistema di controllo della temperatura ambientale ed i

tempi di equilibrio, particolarmente lunghi, ne impediscono di fatto l'applicazione alla sperimentazione in condizioni triassiali su terreni a grana fina.

III.3 La misura delle deformazioni volumetriche

Le deformazioni di volume dei terreni non saturi sono causate da variazioni di volume dell'aria e dell'acqua di porosità e pertanto non possono essere misurate come nelle apparecchiature sperimentali convenzionali per terreni saturi. Tipicamente, facendo riferimento al caso più generale di una cella triassiale, si ricorre alla misura separata delle variazioni di dimensioni del provino in direzione assiale e radiale, oppure, equivalentemente, delle deformazioni assiali e di quelle volumetriche. Per le prime vengono di norma adoperati strumenti e tecniche tradizionali. Per le seconde, invece, sono disponibili svariate soluzioni, messe a punto negli ultimi anni, tramite le quali valutare la deformazione radiale in media oppure misurarla localmente:

- sistemi basati su misure di livello;
- sistemi basati sulla misura del volume di liquido in ingresso o in uscita dalla cella;
- sistemi basati sulla misura di aria e di acqua scambiati dal provino;
- sistemi basati sulla misura diretta delle deformazioni.

III.3.1 Sistemi basati su misure di livello

Le deformazioni radiali medie possono essere dedotte dalle variazioni di livello del fluido contenuto in un bicchiere montato attorno al provino, purché la pressione di cella sia comunicata tramite altro fluido, meno pesante. In figura III.12 è riportato uno schema della cella triassiale di Bishop e Donald (1961), storicamente la prima espressamente progettata per realizzare prove a suzione controllata. La cella è a doppia parete: il cilindro interno è riempito di mercurio nella parte inferiore, in corrispondenza del provino, mentre la camera esterna e la parte superiore di quella interna sono riempite d'acqua. A meno dell'effetto del mercurio, la stessa pressione (quella di cella) agisce sulle pareti interna ed esterna del cilindro (forato superiormente), in modo da limitarne le deformazioni radiali dovute a variazioni di pressione di confinamento. Le deformazioni del provino vengono ottenute dalla misura degli spostamenti verticali di una pallina di acciaio che galleggia sul mercurio, mediante un catetometro.

Nelle attrezzature più recenti l'uso di mercurio è stato abbandonato, dato che è tossico ed opaco e poiché, a causa dell'elevato peso specifico, determina sul provino pressioni

orizzontali crescenti con la profondità. Al mercurio ed all'acqua sono stati spesso sostituiti rispettivamente acqua (oppure olio) ed aria. Questo è il caso, ad esempio, della cella triassiale mostrata in figura III.8 (Delage et al., 1987): il provino è immerso in acqua debolmente colorata ed il livello è misurato otticamente mediante un catetometro. Per ridurre entro livelli accettabili l'evaporazione, è frequente l'uso di un velo d'olio al silicone sul pelo libero dell'acqua (Pradhan et al., 1986). Nell'apparecchiatura di figura III.3 (Carvalho, 2001) il bicchiere è riempito d'olio al silicone e le oscillazioni di livello sono monitorate mediante un trasduttore di prossimità. Il target metallico è montato su un galleggiante a forma di anello disposto sul pelo libero.

Una metodologia alternativa è quella di monitorare le variazioni di livello mediante un trasduttore di pressione differenziale (DPT), connesso da un lato alla base della camera di confinamento e dall'altro ad una buretta di riferimento soggetta alla stessa pressione di cella (figura III.13), in modo da compensare gli effetti dell'evaporazione e sfruttare l'intero campo di misura del DPT (Tatsuoka 1988; Rampino, 1997).

III.3.2 Sistemi basati sulla misura del volume di liquido in ingresso o in uscita dalla cella

Utilizzando un fluido di confinamento incompressibile (acqua o altro liquido) è possibile dedurre le variazioni di volume del provino dalla misura dei volumi di fluido scambiati dalla cella. In letteratura è possibile reperire varie metodologie, basate in genere sulla misura ottica delle variazioni di livello dell'interfaccia tra due fluidi immiscibili (Bishop e Donald, 1961; Chan e Duncan, 1967; Davis, 1972). Wheeler (1986) mette a punto una cella triassiale a doppia parete nella quale la camera interna, piena d'acqua, è sigillata alla base inferiore e superiore e soggetta alla stessa pressione all'interno ed all'esterno (v. figura III.14). I volumi d'acqua in ingresso o in uscita possono essere monitorati tramite buretta (come nello schema in figura) oppure mediante volume gauge (Sivakumar, 1993; Sharma, 1998).

Spesso sono stati proposti anche sistemi "a peso", basati sull'utilizzo di bilance elettroniche (e.g Pradhan et al., 1986) o trasduttori di pressione differenziale (e.g. Sivakumar, 1993).

Recentemente Qing e Jiankui (1998) hanno sviluppato un sistema di servo-controllo (fig. III.15) nel quale la camera di misura, piena d'acqua, è connessa a un pistone, i cui spostamenti sono regolati in modo da mantenere costante la pressione agente al suo interno. La misura viene dedotta dal monitoraggio dei movimenti del pistone.

III.3.3 Sistemi basati sulla misura di aria e di acqua scambiati dal provino

Nell'ipotesi di incompressibilità delle particelle solide, le variazioni di volume di un provino di terreno non saturo sono uguali alla somma delle variazioni di volume dell'aria e dell'acqua di porosità. Pertanto, è possibile determinare le variazioni di volume complessive misurando i volumi di acqua e di aria scambiati dal provino. La prima misura può essere effettuata con uno dei sistemi presentati nel § III.4, non dissimili da quelli usualmente impiegati nella sperimentazione sui terreni saturi. La seconda, invece, richiede dispositivi particolari. Bishop ed Henkel (1962) e Matyas (1967) propongono un sistema costituito da due burette (figura III.16), il cui utilizzo è però possibile solo a pressione atmosferica. Adams et al. (1996) presentano un dispositivo più versatile, nel quale la pressione nella camera di misura dei volumi d'aria viene mantenuta costante movimentando automaticamente un pistone idraulico. In tal modo si realizzano condizioni isobare rispetto all'aria di porosità e quindi si possono dedurre i volumi d'aria scambiati dagli spostamenti del pistone. Una versione modificata di suddetto sistema, basato sull'utilizzo simultaneo di due dispositivi per il controllo della pressione e la misura di volumi, è stato messo a punto da Geiser (2000).

Quando si adopera la tecnica della traslazione per il controllo della suzione, la misura dei volumi d'aria scambiati dal provino presenta alcune complicazioni. Difatti, l'aria di porosità tende a diffondere attraverso la piastra porosa h.a.e.v. verso il circuito di drenaggio dell'acqua e ciò evidentemente va tenuto in conto nel bilancio globale delle variazioni di volume. L'aria diffusa può essere eliminata dalla linea di drenaggio e misurata, sebbene ciò sia reso poco agevole dalla differenza esistente tra la pressione all'interno dei pori e quella dell'aria allontanata (cfr. § III.4).

III.3.4 Sistemi basati sulla misura diretta delle deformazioni

Un'alternativa alla valutazione indiretta delle variazioni di volume è rappresentata dalla misura locale delle deformazioni radiali. Negli ultimi anni il settore ha visto notevoli sviluppi, e le molteplici soluzioni proposte in letteratura per materiali saturi sono facilmente adattabili alle apparecchiature specifiche per non saturo (e.g. Clayton et al., 1989; Hird e Young, 1989; Maatouk, 1993; Cuccovillo e Coop, 1997; Carvalho, 2001).

A titolo d'esempio, la figura III.17 mostra il sistema utilizzato da Huang et al. (1998) all'interno di un permeometro-triassiale: sono previsti due trasduttori a induzione all'interno della cella ed i corrispondenti target sono disposti sul provino, a metà altezza. Nella cella triassiale già mostrata in figura III.3 è predisposto un LVDT immergibile in direzione radiale

ed in quella di figura III.4 (Maatouk, 1993) un anello semicircolare attrezzato con strain gauges è montato a metà altezza del provino.

Soluzioni di tipo diverso sono presentate da Baumgartl et al. (1995), che si servono di una coppia di sensori optoelettronici esterni alla cella, e da Macari et al. (1997), che adottano una tecnica fotografica. Romero (1999) e Barrera (2002) fanno uso di un apparecchio triassiale dotato di sensori di spostamento laser (v. fig. III.5). Tramite la scansione periodica del profilo del provino, lungo l'intera altezza, si è in grado di ottenere in maniera accurata il volume corrente e di identificare eventuali disuniformità e localizzazioni delle deformazioni radiali.

In tutti i casi in cui la misura è di tipo locale, è necessario fare delle ipotesi sulla geometria del provino deformato per ottenerne le variazioni complessive di volume. Per prove a livelli deformativi elevati, anche allo scopo di determinare correttamente il grado di saturazione, è necessario usare un sistema per valutare globalmente le variazioni di volume, in abbinamento ai dispositivi di misura locale.

III.4 La misura delle variazioni di contenuto d'acqua

Di solito la misura delle variazioni di contenuto d'acqua viene eseguita con le stesse apparecchiature utilizzate nella sperimentazione su terreni saturi: burette (Bishop e Donald, 1961; Maatouk, 1993; Sharma, 1998; Romero, 1999), sistemi a peso (Delage, 1987; Dineen, 1997; Yahia-Aissa, 1999), volume gauges (Sivakumar, 1993; Sharma, 1998).

Tuttavia, nel caso dei terreni non saturi, l'aria di porosità può passare all'interno del circuito di drenaggio e pregiudicarne la saturazione, rendendo erronea la misura. Per questo, è necessario adottare appositi accorgimenti per garantire l'assenza di aria nel circuito durante le prove, spesso di lunga durata. Il problema è rilevante in particolar modo quando la suzione è applicata con la tecnica della traslazione degli assi (cfr. § III.2.1): a causa del gradiente tra la pressione dell'aria nel terreno e di quella nel sistema di drenaggio (disciolta o in forma di bolle) la fase gassosa tende a passare attraverso la piastra haev, per diffusione ed in minor parte per filtrazione. Nelle apparecchiature con controllo osmotico della suzione, invece, non ci sono gradienti di pressione e pertanto l'aria può passare nelle linee di drenaggio solo in forma di bolle, trascinata dall'acqua.

Non essendo possibile annullare completamente il flusso d'aria in prove di lunga durata, è necessario allontanare periodicamente le bolle dai circuiti di drenaggio con operazioni di spurgo; eventualmente è possibile misurare i volumi d'aria fluita per correggere le determinazioni delle variazioni di contenuto d'acqua tra due operazioni di spurgo successive.

Un sistema adatto allo scopo è quello utilizzato da Bishop e Donald (1961), riportato in figura III.18. L'aria accumulata al di sotto della piastra haev viene movimentata all'interno di un circuito chiuso e raccolta in una trappola calibrata per la sua misura. Il gradiente idraulico necessario è ottenuto come raffigurato nello schema, capovolgendo il tubo ad U, che contiene mercurio.

Fredlund (1975) propone il sistema di misura di volumi d'aria diffusa rappresentato in figura III.19. Una buretta graduata e parzialmente piena d'acqua, chiusa in sommità, accoglie l'aria allontanata dai circuiti di drenaggio. L'aria determina un abbassamento dell'acqua all'interno della buretta dipendente dal volume filtrato. L'acqua spostata dall'aria passa in una seconda buretta, aperta in sommità ed in collegamento con quella di misura attraverso la base. Lo spurgo avviene aprendo il collegamento con il circuito di drenaggio ed applicando al sistema una contro-pressione leggermente inferiore a quella imposta alla base del provino.

Un sistema analogo è quello adottato da Sivakumar (1993) e Sharma (1988): in questo caso viene fatta circolare acqua attraverso un circuito chiuso che passa al di sotto della piastra haev su cui poggia il provino, fornendo la differenza di pressione necessaria tramite due interfacce aria-acqua. L'aria viene ancora intrappolata in una buretta invertita per misurarne il volume. Configurazioni simili a quest'ultima sono impiegate anche da Maatouk (1993) e da Romero (1999).

La determinazione dei volumi di aria diffusa può essere in realtà affetta da notevoli incertezze, sia a causa della forte dipendenza della misura da pressione e temperatura, sia perché l'ipotesi di flusso d'aria a gradiente costante, tipicamente adoperata, è una semplificazione che non ritrova necessariamente riscontro nella realtà. L'adozione di sistemi di spurgo automatico e quasi in continuo (e.g. Rampino et al., 1999a) consente di prescindere da questa misura.

III.5 Le apparecchiature utilizzate nel presente lavoro sperimentale

Questo lavoro sperimentale si è articolato in varie fasi. Preliminarmente, è stata messa a punto una cella di colonna risonante e taglio ciclico per terreni non saturi. I primi risultati conseguiti con suddetta apparecchiatura riguardano la sabbia limosa del Metramo, costipata in laboratorio, ed affiancano e completano un'ampia caratterizzazione sperimentale intrapresa presso il DIG sullo stesso materiale, a partire dal 1992. Il comportamento della sabbia limosa satura è stato indagato nel campo delle piccole deformazioni (d'Onofrio, 1992; Santucci de

Magistris, 1996) e di quelle medio-elevate (Santucci de Magistris, 1996), mentre la risposta meccanica in condizioni di parziale saturazione, a deformazioni medio-elevate, è stata studiata da Rampino (1997) e Sangiuliano (1999). In seguito, l'attività sperimentale realizzata nell'ambito di questa tesi si è concentrata sulla caratterizzazione del comportamento di un nuovo materiale costipato, il limo argilloso del Po, parzialmente saturo. Ai fini di inquadrarne il comportamento in prove a suzione controllata, sia nel campo delle deformazioni medio-elevate sia in condizioni lontane dalla rottura, sono state utilizzate due apparecchiature: la cella triassiale già impiegata da Rampino (1997) e la nuova cella di colonna risonante e torsione ciclica. Entrambe le apparecchiature consentono di monitorare le variabili di stato volumetrico significative per terreni non saturi (i.e. stato deformativo e grado di saturazione) nel corso delle prove (Vinale et al., 1999).

Nel seguito si richiamano le caratteristiche peculiari della cella triassiale, nonché le relative procedure sperimentali messe a punto da Rampino (1997), evidenziando adattamenti e modifiche apportati per le prove sul limo argilloso del Po. Si procede poi alla descrizione dettagliata dell'apparecchiatura RCTS a suzione controllata e delle procedure seguite durante la sperimentazione su materiale non saturo.

III.5.1 La cella triassiale a suzione controllata

L'apparecchiatura triassiale messa a punto da Rampino (1997) è del tipo Bishop e Wesley (1975) a percorso di sollecitazione controllato ed è frutto di alcune modifiche apportate ad una cella per terreni saturi. Le figure III.20 e III.21 ne rappresentano rispettivamente una sezione schematica ed una vista d'insieme dei circuiti e delle attrezzature accessorie.

La cella opera su provini di diametro 38 mm ed altezza 76 mm e consente il controllo e la misura indipendenti delle pressioni assiale, radiale, dell'aria e dell'acqua di porosità, nonché la misura delle deformazioni assiali, radiali e delle variazioni di contenuto d'acqua.

Una pressione d'aria di 1.1 ± 0.5 MPa, alimentata da un compressore, viene condizionata attraverso quattro convertitori elettro-pneumatici.

Il carico assiale è applicato alla base del provino, il quale fa contrasto superiormente con la cella di carico interna attraverso la testa di carico. La pressione alla base del pistone viene imposta tramite acqua, attraverso un'interfaccia aria-acqua tipo Bellofram per prove a carico controllato e mediante una pompa di Bishop azionata da un motore passo-passo nel caso di prove a deformazione controllata. La cella di carico (Wykeham Farrance 4958) fornisce la misura del deviatore applicato ed ha una capacità di 3.0 kN.

La pressione di cella è applicata direttamente tramite aria e misurata con un trasduttore a membrana Druck PDCR810 con fondoscala 1.0 MPa. Il cilindro di perspex esterno è rinforzato da uno schermo metallico come protezione da eventuali esplosioni.

La suzione è applicata con la tecnica della traslazione degli assi: la pressione dell'acqua viene applicata alla base inferiore del provino, attraverso una piastra porosa ad alto valore d'ingresso d'aria di diametro 36 mm, mentre la pressione dell'aria viene imposta attraverso l'estremità superiore, mediante un circuito ricavato nella testa di carico e tramite una piastra porosa "standard" al carburo. La contro-pressione agente nei circuiti di drenaggio viene comunicata attraverso l'interfaccia libera acqua-aria della buretta di misura delle variazioni di contenuto d'acqua. Anche suddette pressioni sono misurate tramite trasduttori a membrana Druck PDCR810 con fondoscala 1.0 MPa.

Un sistema di servo-controllo automatico consente di imporre percorsi tensionali generici in termini di tensioni totali, di pressioni dell'acqua e dell'aria di porosità applicate al contorno del provino.

Le deformazioni assiali vengono monitorate tramite un LVDT (RDP Electronics, LDC500A) disposto esternamente alla cella, la cui astina, con escursione massima 25 mm, fa contrasto su una barra verticale solidale al pistone.

Le deformazioni radiali vengono dedotte dalle variazioni di livello d'acqua all'interno di un bicchiere di plexiglass che circonda il provino. Il tratto di misura è situato nella parte superiore, compreso tra la superficie interna del bicchiere e la testa di carico. Il monitoraggio del livello liquido avviene tramite un trasduttore di pressione differenziale (DPT) Fuji FHCT11V1-AKBYY connesso da un lato al bicchiere e dall'altro ad una buretta di riferimento, resa solidale al pistone di carico e soggetta alla pressione di cella, in modo da poter sfruttare tutto l'intervallo di misura del DPT.

Le variazioni di contenuto d'acqua vengono valutate tramite una buretta a doppia camera connessa ai circuiti di drenaggio. Il livello è misurato in automatico rispetto a quello di una buretta gemella, di riferimento, mediante un altro DPT Fuji FHCT11V1-AKBYY. Un sistema di spurgo in continuo permette di allontanare le eventuali bolle d'aria accumulate al di sotto della piastra porosa tramite il gradiente fornito da una pompa peristaltica.

Per maggiori dettagli si rimanda a Rampino (1997).

III.5.1.1 Procedure sperimentali

Le operazioni preliminari che precedono il montaggio dei provini sono del tutto analoghe a quelle utilizzate per la cella di colonna risonante e sono pertanto descritte in dettaglio nel § III.5.2.5. Qui si ricorda che consistono nella scrupolosa saturazione di tutti i circuiti ad acqua: i condotti del pistone di carico, i sistemi di misura delle variazioni di volume e di contenuto d'acqua. Si adopera acqua demineralizzata e deaerata con un sistema di vuoto pneumatico.

Il provino di materiale costipato, conservato in camera umida in una fustella sigillata con cellophane e paraffina, viene sfustellato tramite un torchio manuale, pesato con una bilancia elettronica (sensibilità ± 0.01 g) e misurato accuratamente con un calibro digitale (sensibilità ± 0.01 mm).

Successivamente il provino viene sistemato sul piedistallo della cella triassiale, senza carta da filtro (che potrebbe modificarne il contenuto d'acqua), vengono poste in sommità la pietra porosa al carburo e la testa di carico e viene sistemata la membrana in lattice con i relativi O-ring tramite un tendi-membrana. Durante questa fase, e fino all'applicazione di una pressione di confinamento non inferiore a 30 kPa, il provino viene mantenuto in condizioni non drenate sia per la fase aria sia per la fase acqua, operando sui rubinetti dei relativi circuiti.

Sistemato il bicchiere di misura delle deformazioni radiali e riempitolo di acqua deaerata (cfr. Rampino, 1997) si procede a porre uno strato di olio al silicone sulla superficie di tutte le interfacce aria-acqua libere per limitare gli effetti dell'evaporazione (Tatsuoka, 1988). Dopo aver sistemato la suction-cup³ al di sopra della testa di carico la cella viene chiusa, si sistema la buretta di riferimento ad una delle barre orizzontali solidali al pistone e si lasciano equalizzare i livelli all'interno delle burette per la misura delle variazioni di contenuto d'acqua e nel bicchiere e nella buretta per valutare le deformazioni volumetriche. Infine, si richiude il collegamento idraulico tra suddetti recipienti.

In seguito inizia la prova vera e propria: si realizza il contatto tra il sistema provino-testa di carico-suction cup e la cella di carico incrementando gradualmente la pressione al di sotto del pistone ed avendo cura di non superare un deviatore di 10-15 kPa. Si passa poi ad incrementare la pressione di cella, facendola crescere fino a circa 30 kPa ed incrementando in simultaneo la pressione assiale, mantenendo un deviatore di circa 5 kPa per garantire il contatto tra testa e cella di carico. Solo a questo punto viene aperto il rubinetto del circuito

³ Durante la presente sperimentazione si è osservato un rapido deterioramento delle suction cup realizzate in lattice. Ai fini di un corretto funzionamento dell'apparecchiatura è preferibile l'uso di suction cup realizzate in gomma sintetica (Sylgard 170 Dow Corning bi-componente).

della pressione dell'aria di porosità, che viene aumentata fino a circa 20 kPa. A partire da tali condizioni, che corrispondono ad una tensione media netta $(p-u_a) \cong 12$ kPa, si continuano ad incrementare le tre pressioni simultaneamente fino al valore iniziale prescritto. Infine, si apre il rubinetto di drenaggio della fase acqua e si applica il valore di contro-pressione desiderato (50 kPa, nell'ambito di tutte le prove realizzate).

Le prove consistono in genere di tre fasi: equalizzazione, compressione e taglio.

L'equalizzazione consiste nell'applicare la suzione desiderata al contorno del provino, con una pressione di confinamento $(p-u_a) \cong 12$ kPa ed un deviatore $q \cong 5$ kPa e nell'attendere i tempi necessari all'equilibrio, ossia al raggiungimento di una distribuzione omogenea di (u_a-u_w) all'interno del provino, passando dal valore di post-costipamento a quello imposto dall'operatore. Stabilita la contro-pressione di 50 kPa, le pressioni assiale, di cella e dell'aria di porosità da applicare sono determinate di conseguenza. Durante questa fase vengono monitorate le variazioni di volume e di contenuto d'acqua ed il termine del processo viene dedotto dalla loro stabilizzazione. Facendo riferimento alle indicazioni di Sivakumar (1993) e Rampino (1997) si ritengono trascurabili variazioni di contenuto d'acqua inferiori a 0.04 %/giorno.

Durante la successiva fase di compressione, la pressione netta $[\sigma]-u_a$ viene fatta variare mantenendo la suzione costante. Pur essendo possibile realizzare fasi a $\eta=q/(p-u_a)$ costante e diverso da zero, nell'ambito di questa sperimentazione sono state realizzate esclusivamente prove isotrope⁴. La $(p-u_a)$ viene incrementata con velocità sufficientemente bassa a garantire condizioni di drenaggio libero per la fase acqua e quindi suzione costante.

Il problema della determinazione preliminare della velocità di carico è complicato dalla circostanza che la consolidazione dei terreni non saturi è retta da equazioni particolarmente complesse (Fredlund e Rahardjo, 1993) e che chiaramente i criteri utilizzati nella sperimentazione su materiali saturi (e.g. Bishop e Henkel, 1962; AGI, 1994) non risultano validi. Sivakumar (1993) suggerisce di valutare in modo approssimato (per eccesso) le sovrappressioni neutre massime indotte dal processo di carico, Δu , utilizzando la formulazione di Thomas (1987) per terreni saturi:

⁴ Più precisamente, il deviatore di 5 kPa applicato in fase di equalizzazione viene mantenuto costante durante la compressione.

$$\Delta u = \frac{dp' h^2}{dt 2 \cdot C_v} \quad (\text{III.1})$$

in cui h è il massimo percorso di drenaggio, sostituendo a p' la tensione media netta ($p-u_a$) ed utilizzando il coefficiente di consolidazione del materiale non saturo. Essendo sia la permeabilità all'acqua che la compressibilità dipendenti dal grado di saturazione⁵, anche la stima di C_v con i cosiddetti metodi di determinazione indiretta delle proprietà (Mancuso et al., 2000b) richiederebbe in linea di principio almeno il valore saturo e la curva caratteristica. D'altro canto, è opportuno tenere in conto che le formulazioni per terreni saturi proposte in letteratura, come l'eq. III.1, risultano in genere piuttosto cautelative, come constatato da Santucci de Magistris (1996) con riferimento alla sabbia costipata del Metramo tramite prove di compressione isotropa con misura delle pressioni neutre locali a metà altezza del provino. In definitiva, comunque sia stabilita la velocità di carico, è consigliabile verificare la correttezza della scelta controllando che mantenendo le pressioni costanti al termine delle fasi di compressione non si verificano significative variazioni di contenuto d'acqua.

Sulla base di analoghe considerazioni, Rampino (1997) utilizza una velocità di carico di 4 kPa/h per la sabbia limosa del Metramo. Per quanto riguarda il limo argilloso del Po, oggetto di questa sperimentazione, si è adottata ugualmente una velocità di 4 kPa/h, sia in carico che in scarico, come suggerito preliminarmente dai risultati di prove edometriche su materiale saturo⁶ e poi confermato dalle misure eseguite in cella triassiale a fine compressione.

La cella a stress-path e suzione controllati consente di realizzare fasi di taglio secondo varie tipologie di percorso tensionale. In fasi di taglio drenate, la pressione dell'aria u_a e dell'acqua u_w sono mantenute costanti ed, operando sui valori della pressione di cella, è possibile realizzare percorsi variamente inclinati nel piano $(p-u_a):q$, come il tradizionale $\Delta q / \Delta(p - u_a) = 3$, oppure a $(p-u_a)$ costante. Inoltre, è possibile eseguire prove non drenate per la fase acqua, ovvero a w costante. Nel caso del limo argilloso del Po, sono state realizzate esclusivamente fasi di taglio tradizionali drenate. Le prove sono state eseguite a deformazione controllata, in modo da poter cogliere l'eventuale comportamento dilatante del materiale.

⁵ È ben noto che la permeabilità all'acqua può diminuire sensibilmente al ridursi del grado di saturazione (e.g. Leong e Rahardjo, 1997). Diversamente, non è possibile indicare una tendenza univoca per quanto riguarda il modo di variare della compressibilità (cfr. § I.6).

⁶ Dall'andamento delle curve cedimenti-tempo (MagisPo, 2001) si deduce un coefficiente di consolidazione dello stesso ordine di grandezza (10^{-4} cm²/s) della sabbia limosa e argillosa del Metramo (Santucci de Magistris, 1996).

A proposito della scelta della velocità di deformazione, valgono in generale le osservazioni fatte a proposito della velocità di carico in fase di compressione. Esistono in letteratura varie indicazioni a proposito. Sivakumar (1993) propone di estendere ai terreni non saturi la formulazione di Bishop e Henkel (1962) per valutare il tempo t_f necessario alla rottura utilizzando il coefficiente di consolidazione del terreno non saturo:

$$t_f = \frac{20 \cdot h^2}{0.75 \cdot C_v} \quad (III.2)$$

in cui h è il massimo percorso di drenaggio. Una trattazione specifica per il caso dei terreni parzialmente saturi è quella di Ho e Fredlund (1982), che mettono in luce la necessità di tempi di prova più lunghi rispetto ai materiali saturi anche per la presenza della piastra porosa haev, la cui ridotta permeabilità deve essere opportunamente considerata.

Tenuto conto di tali osservazioni, ed ancora in accordo con la scelta operata da Rampino (1997) per la sabbia limosa e argillosa del Metramo, la velocità di deformazione selezionata per le prove sul limo argilloso del Po è di 0.1%/h.

III.5.2 L'apparecchiatura di colonna risonante

La RCTS a suzione controllata sviluppata nell'ambito di questo lavoro è il risultato di una serie di modifiche apportate ad una versione della stessa apparecchiatura per terreni saturi, operativa presso il DIG di Napoli dal 1987. La cella per terreni saturi (Silvestri 1991), a sua volta risultato di modifiche e miglioramenti apportati alla versione progettata presso l'Università del Texas dal prof. Stokoe e dai suoi collaboratori, è stata continuamente utilizzata al DIG per indagare sul comportamento a piccole deformazioni di vari terreni naturali e ricostituiti (Papa et al., 1989; Silvestri, 1991; d'Onofrio, 1996; Olivares, 1996; Santucci de Magistris, 1996). Lo schema meccanico dell'attrezzatura nella versione messa a punto da Silvestri (1991) è rappresentato in figura III.22.

La Figura III.23 riporta uno schema della nuova cella, mostrando le modifiche realizzate per renderla adatta allo studio del comportamento tensio-deformativo dei terreni non saturi. Le principali modifiche riguardano:

- il sistema di controllo delle pressioni, che nella versione corrente permette di applicare stati di confinamento isotropi, controllando separatamente le pressioni dell'acqua di porosità, dell'aria di porosità e di cella;
- il nuovo disegno del piedistallo, reso idoneo al controllo della suzione di matrice;

- i sistemi di misura delle variazioni di volume e di contenuto d'acqua, che sostituiscono il volume gauge utilizzato nella versione per terreni saturi.

Modifiche minori riguardano:

- il bicchiere in alluminio collocato attorno al provino, che oltre a contenere un bagno fluido che inibisce la filtrazione d'aria attraverso la membrana, nella versione corrente serve alla misura delle deformazioni volumetriche;

- la testa di carico, cilindro in alluminio connesso rigidamente al drive plate, allungata rispetto alla versione originale per terreni saturi per consentire la misura delle variazioni di volume.

I provini, di diametro 36mm ed altezza 72mm, vengono posti sul piedistallo, isolati dalla pressione di cella tramite una membrana di lattice e con la testa di carico appoggiata sulla base superiore (il peso della testa di carico, attualmente di circa 220 g, sommato a quello del drive plate, di circa 600 g, induce un deviatore di 8 kPa circa). Entrambe le superfici a contatto con il provino sono rese scabre da una rete di risalti piramidali per impedire lo scorrimento durante le fasi di taglio. Nel caso del piedistallo, i risalti sono situati nella zona perimetrale, lungo una corona circolare larga 6.5 mm, mentre al centro si trova la piastra haev (cfr. III.5.2.1).

Il circuito di drenaggio dell'acqua e quello di controllo della pressione dell'aria sono entrambi ricavati all'interno del piedistallo. Questa caratteristica rende il sistema di applicazione delle suzioni differente da quello utilizzato nelle altre apparecchiature a suzione controllata disponibili presso il DIG (edometro e cella triassiale, cfr. § III.5.1), nei quali la pressione dell'aria viene applicata in testa al provino mentre la pressione dell'acqua viene applicata alla base inferiore. Il complesso disegno del piedistallo, come meglio illustrato in seguito, deriva dalla volontà di mantenere la condizione di vincolo torsionale fisso alla base inferiore – libero alla base superiore (fixed-free) già presente nella versione dell'apparecchiatura per terreni saturi. Altre caratteristiche basilari, come il sistema di controllo dei momenti torcenti, quello di misura delle deformazioni tangenziali, la camera di confinamento ($D = 216$ mm, $H = 457$ mm), i piatti metallici superiore ed inferiore a chiusura della stessa (Silvestri, 1991) non sono stati modificati.

III.5.2.1 Sistemi di controllo delle sollecitazioni

Pressione di cella

L'apparecchiatura di colonna risonante consente di applicare sollecitazioni torsionali a partire da uno stato tensionale isotropo. La pressione di cella è imposta tramite aria, essendo ciò

necessario sia per la presenza di parti non immergibili nel sistema di applicazione dei carichi torsionali sia a causa del metodo scelto per misurare le variazioni di volume. Il sistema di applicazione della pressione di confinamento usato correntemente risulta diverso dalla versione originale, nella quale la regolazione avveniva in maniera manuale. Ciò è richiesto dal fatto che nel caso della sperimentazione su materiali non saturi, in fase di compressione, bisogna evitare brusche variazioni della pressione per garantire condizioni drenate nel corso della prova, per non indurre cambiamenti di suzione non desiderati provocati dalla compressione del fluido (acqua ed aria) di porosità.

Attualmente è possibile variare la pressione sia in maniera incrementale (one-step) che continua, con velocità costante di carico. A tale scopo, la pressione di cella viene applicata tramite un convertitore elettro-pneumatico (Watson-Smith 101XA) tarato nel campo 0-1.0 MPa e misurato con un trasduttore (Druck PDCR 810) con fondo scala 1.0 MPa. Tramite una scheda A/D – D/A (CIL Alpha SuperCard) ed un software di gestione delle prove su PC la pressione viene regolata al valore programmato dall'operatore tramite una procedura di feedback.

Controllo della suzione

La suzione è controllata con il metodo della traslazione degli assi (Hilf, 1956). Come già accennato, sia la pressione dell'aria sia quella dell'acqua di porosità vengono imposte attraverso il piedistallo, che consta di due elementi coassiali, indicati come parte A e B in figura III.24.

La parte A, fotografata in figura III.25, consiste a sua volta di due parti concentriche: in quella centrale si trova l'alloggio per la piastra porosa ad alto valore d'ingresso d'aria (Soilmoisture, $AEV=0.5$ MPa), di diametro 22 mm, incollata lateralmente alle pareti dell'incavo tramite resina epossidica. Un incavo spiroidale ricavato al di sotto della piastra serve alla circolazione di acqua per allontanare l'aria filtrata per diffusione (cfr. § III.5.2.3).

Nella zona anulare esterna, di spessore 6.5 mm, è situato il circuito di controllo dell'aria. Sedici fori connettono la linea di applicazione della pressione dell'aria, che si prolunga in un incavo circolare all'interno del piedistallo, con la base inferiore del provino. La parte A può essere sostituita con componenti analoghe disegnate per provini di diametro differente o dotate di piastra a diverso valore d'ingresso d'aria. È avvitata sulla parte B, un piatto metallico (D=150mm, H=9mm) contenente le connessioni ai circuiti per l'applicazione delle pressioni dell'acqua e dell'aria di porosità e per la misura del livello del bagno liquido che

circonda il provino. Le guarnizioni (O-ring) della parte B sono state disegnate con particolare attenzione a garantire la chiusura ermetica di ciascun circuito e pertanto impedire la connessione (non desiderata) delle varie linee di controllo e misura.

Sia la pressione dell'aria sia quella dell'acqua di porosità sono applicate tramite aria (usando un'interfaccia acqua-aria libera per la seconda⁷) e controllate automaticamente in feedback mediante due regolatori elettro-pneumatici (Watson-Smith 101XA) tarati nel campo 0-1.0 MPa e due trasduttori di pressione (Druck PDCR 810) con fondo scala 0.7 MPa asserviti a personal computer.

Controllo delle sollecitazioni torsionali

Il sistema utilizzato per applicare momenti torcenti in testa al provino non ha subito modifiche rispetto a quanto previsto nella cella per terreni saturi (v. fig. III.22 e foto in fig. III.26). In sintesi (ulteriori dettagli possono essere trovati in Silvestri, 1991), esso consiste in un motore elettro-magnetico con una parte mobile ed una fissa. La parte mobile (drive plate) è un piatto metallico con quattro bracci, ognuno dei quali reca all'estremità un magnete permanente, ed è connesso rigidamente alla testa di carico tramite quattro viti. La parte fissa è formata da quattro coppie di bobine, montate su un supporto metallico, ognuna collocata coassialmente rispetto ad un magnete. La sollecitazione torsionale necessaria viene fornita dall'accoppiamento delle due parti, quando una determinata tensione viene applicata alle bobine. Il sistema ha una risposta lineare, come verificato da Papa e Silvestri (1987), e permette di applicare un momento massimo di 0.43 Nm, a cui corrisponde in prova di torsione ciclica una tensione tangenziale media di circa 38 kPa (cfr. § III.5.2.6).

III.5.2.2 Sistemi di misura delle deformazioni

Volume specifico

Le variazioni di volume specifico dei provini vengono ottenute misurando separatamente le deformazioni assiali e radiali, tramite il sistema di figura III.27.

Le deformazioni assiali vengono misurate tramite un LVDT (Schaevitz 500 HR) interno coassiale al provino, come nella versione per terreni saturi (v. ancora fig. III.22). Il corpo dello strumento, un cilindro cavo, è connesso al telaio metallico che sorregge le 4 coppie di bobine. Il nucleo, connesso alla parte rotante del drive plate, può muoversi all'interno del

⁷ Funge da interfaccia acqua-aria il pelo libero all'interno della buretta di misura delle variazioni di contenuto d'acqua, cfr. § III.5.2.3.

corpo senza entrare in contatto con quest'ultimo e quindi senza indurre attriti. Una guida in teflon garantisce la verticalità del nucleo dell'LVDT durante il corso della prova, anche in questo caso senza che nascano apprezzabili attriti tra le parti a contatto.

Le deformazioni radiali sono ottenute indirettamente, misurando la variazione di livello all'interno di un bagno liquido che circonda il provino⁸. La camera di misura consiste in uno spazio a sezione di corona circolare (spessore 5mm) compreso tra il bicchiere in alluminio montato attorno al provino (diametro interno 46mm) e la testa di carico (v. foto in fig. III.28). Il bicchiere è ermeticamente sigillato al fondo tramite un O-ring che trova sede in un'apposita scanalatura del piedistallo. Come già accennato, un foro all'interno del piedistallo (parte B, v. fig. III.24) mette in collegamento suddetta camera di misura con un circuito idraulico esterno. Un trasduttore di pressione differenziale (DPT, Fuji, FHCT11V1-AKBYY) consente la misura della differenza di livello Δ tra il liquido che circonda il provino e quello all'interno di una buretta di riferimento. Come indicato nello schema di figura III.29, Δ dipende dalle deformazioni radiali ma anche da quelle assiali, quando queste non risultano trascurabili rispetto all'unità. Il DPT è calibrato nel campo compreso tra -0.5 kPa e +0.5 kPa (± 50 mm H₂O) ed è connesso a personal computer per l'acquisizione tramite porta seriale RS232. La sua sensibilità è di 1/500 del fondoscala, a cui corrispondono ϵ_{rad} dell'ordine di $4 \cdot 10^{-2}\%$.

Deformazioni tangenziali

Le deformazioni tangenziali, richieste per l'interpretazione della fasi di taglio, sono misurate come nella versione per terreni saturi. Una descrizione approfondita del sistema di misura è riportata da Silvestri (1991). In questa sede si ricorda che le deformazioni tangenziali vengono dedotte dalle rotazioni della base superiore del provino. Ciò viene realizzato mediante due trasduttori di prossimità (Bently-Nevada 20929-20931) nelle prove quasi-statiche (TS) ed indirettamente, usando un accelerometro piezoelettrico (Columbia Research Laboratory 3030), per le prove dinamiche (RC). È possibile misurare deformazioni tangenziali γ comprese tra $10^{-4}\%$ e $10^{-1}\%$ (d'Onofrio, 1996).

⁸ E' da sottolineare che la presenza del bagno fluido ha anche l'effetto benefico di inibire la filtrazione di aria verso il provino attraverso la membrana. Nella sperimentazione corrente il bicchiere viene riempito con acqua deaerata e viene apposto superiormente uno strato di olio al silicone per rallentare l'evaporazione (Tatsuoka, 1988).

III.5.2.3 Sistema di misura del contenuto d'acqua

La misura delle variazioni di contenuto d'acqua (Δw) è ottenuta attraverso due burette a doppia camera collegate ad un DPT Fuji FHCT11V1-AKBYY (figg. III.30 e III.31). Una buretta è connessa alla linea di drenaggio, in modo che le variazioni di livello al suo interno misurino i volumi d'acqua scambiati dal provino. L'altra buretta funziona da riferimento per le letture del DPT.

Per proteggere il circuito di drenaggio da fenomeni di de-saturazione a lungo termine (cfr. § III.4) viene fatta circolare periodicamente acqua attraverso un circuito idraulico chiuso che passa al di sotto della piastra haev. Il modesto carico idraulico necessario a tale scopo è fornito da una pompa peristaltica che muove l'acqua dalla buretta di misura attraverso il circuito spiroidale rappresentato in figura III.24 spingendola nuovamente verso la buretta. Le bolle d'aria vengono espulse attraverso l'interfaccia libera acqua-aria mediante un tubicino metallico disposto all'interno della buretta stessa. Tale sistema consente di evitare sia una misura erronea delle variazioni di contenuto d'acqua sia un mancato controllo della pressione agente effettivamente nel circuito di drenaggio. Il programma di gestione automatica delle prove accende e spegne la pompa periodicamente⁹ e registra le letture di dislivello tra le due burette a pompa spenta.

Anche in questo caso, il DPT ha un intervallo di misura compreso tra -0.5 kPa e +0.5 kPa ($\pm 50\text{mm H}_2\text{O}$) ed è collegato a PC tramite porta RS232. La sensibilità di 1/500 del fondoscala corrisponde ad una variazione di peso dell'ordine di $8 \cdot 10^{-3}$ g con burette di diametro interno 10 mm.

III.5.2.4 Gestione automatica delle prove e strumentazioni complementari

Nel corso del presente lavoro il software originale di gestione delle prove RCTS su terreni saturi (Papa et al., 1989; Silvestri, 1991; D'Onofrio, 1996), scritto in HP BASIC e funzionante su workstation HP, è stato convertito in linguaggio LABVIEW 5.0 (National Instruments) e trasferito in ambiente Windows per personal computer IBM e compatibili da una società di programmazione. Ai fini delle prove realizzate nell'ambito di questa tesi, suddetto software è utilizzato esclusivamente per il controllo e la misura durante le fasi di taglio (cfr. § III.5.2.5). Difatti, il controllo in feedback delle pressioni di cella, dell'aria e dell'acqua di porosità e la misura delle variazioni di volume e contenuto d'acqua vengono eseguite tramite un secondo

⁹ Facendo funzionare la pompa per 20 minuti ogni ora non sono state in genere riscontrate significative quantità di aria accumulate.

programma, scritto in BASIC. I dati registrati da entrambi vengono combinati ed elaborati tramite un terzo programma (un insieme di macro di Microsoft Excel) che restituisce i risultati delle prove di colonna risonante e torsione ciclica in termini di rigidezza G , smorzamento D e livello di deformazione tangenziale γ . In altre parole, il primo software acquisisce i risultati in termini sollecitazioni e spostamenti al contorno del provino durante le fasi di taglio (momento torcente, rotazione all'estremità libera) e consente di eseguire tali fasi in automatico, a tempi prestabiliti; il secondo monitora le variazioni di stato volumetrico e gestisce l'applicazione di percorsi tensionali isotropi nel piano $(p-u_a):(u_a-u_w)$; l'ultimo elabora i risultati così ricavati.

Il collegamento tra apparecchiature dedicate alla fase di taglio e personal computer avviene tramite due interfacce: una AT-GPIB ed una AT-MIO-16E-10 della National Instruments. La catena strumentale utilizzata è schematizzata nelle figure III.32 e III.33.

Durante le prove di colonna risonante, la tensione a frequenza variabile che alimenta il motore elettromagnetico è fornita da un generatore digitale di segnale HP 3314 e potenziata attraverso un amplificatore HP 6824A. La debole carica fornita in uscita dall'accelerometro viene convertita in un segnale elettrico di maggior potenza attraverso un amplificatore di carica (Columbia Research Laboratory 4102M), dotato di selettore di fondo-scala manuale. Un voltmetro digitale (HP 3456A) misura l'ampiezza di tale segnale in sincrono con le letture di frequenza effettuate da un contatore di cicli digitale (HP5334A). L'apertura di un relais elettromagnetico toglie momentaneamente l'alimentazione all'LVDT per evitare un fenomeno di interferenza con l'accelerometro (d'Onofrio, 1996). Suddette apparecchiature comunicano direttamente con il PC attraverso l'interfaccia AT-GPIB e/o fra loro per il tramite di un'unità di commutazione o switching box (HP3488A) a relais elettromagnetici (per semplicità non rappresentata nella figg. III.32), ancora connessa al computer mediante AT-GPIB. Un oscilloscopio digitale (Tektronix 2230, anch'esso non indicato in figura III.32) consente di seguire l'andamento delle prove di colonna risonante in tempo reale.

Per quanto riguarda le prove di torsione ciclica, il segnale di eccitazione a frequenza costante viene fornito direttamente dalla scheda AT-MIO-16E-10 (di tipo A/D – D/A) e successivamente potenziato dall'amplificatore HP 6824A. Un amplificatore operativo (costituito da una scheda Tektronix AM501 montata su un modulo di alimentazione Tektronix TM504) riceve in ingresso il segnale dei due trasduttori di prossimità attraverso la relativa centralina di alimentazione e misura e fornisce in uscita la loro differenza algebrica, dalla quale si deduce la rotazione dell'estremità libera del provino (Silvestri, 1991). Un

potenziometro (fabbricazione Megaris), manovrato manualmente, consente di sovrapporre a suddetta tensione in uscita un valore costante, per ridurre l'eventuale offset (tensione corrispondente a rotazione nulla) prodotto da deformazioni del provino verificatesi durante le fasi di variazione di $(p-u_a)$ o (u_a-u_w) . Infine, il segnale viene acquisito tramite la scheda AT-MIO-16E-10. L'annullamento dell'offset consente di minimizzare l'intervallo di tensione necessario alla lettura e quindi di ottimizzarne la risoluzione, agendo sul guadagno della scheda. Il programma di gestione mostra a video in tempo reale i risultati delle prove torsionali.

L'insieme dei collegamenti necessari al controllo delle pressioni ed al monitoraggio dello stato volumetrico è schematizzato in figura III.34. La regolazione dei convertitori elettropneumatici Watson-Smith e l'accensione e lo spegnimento della pompa peristaltica (non rappresentata, per semplicità) avvengono, come accennato, tramite scheda A/D – D/A (CIL Alpha SuperCard). La stessa scheda viene utilizzata per misurare il segnale in uscita dalla centralina di alimentazione e misura dell'LVDT (fabbricazione SBEL). I trasduttori di pressione di cella, dell'aria e dell'acqua di porosità ed i trasduttori di pressione differenziale sono alimentati ciascuno da una centralina Druck serie 280, che acquisisce il segnale in uscita ed esegue la conversione A/D fornendo le letture in unità fisiche al PC tramite scheda seriale RS232.

III.5.2.5 Procedure sperimentali

Operazioni preliminari

Prima di iniziare la generica prova, è essenziale saturare tutti i circuiti attraversati da acqua, il trasduttore di pressione dell'acqua e la piastra porosa ad alto valore d'ingresso d'aria.

Tutte le operazioni di saturazione nonché il riempimento delle burette e del bicchiere di misura vengono realizzate tramite l'acqua proveniente da un serbatoio sovrelevato (pressione media: 25 kPa), preventivamente demineralizzata¹⁰ e poi deareata applicando il vuoto pneumatico in testa allo stesso contenitore per alcune ore, tramite un' apposita pompa.

La piastra haev non può essere saturata tramite ebollizione, come le tradizionali piastre al carburo, essendo incollata ad un piedistallo con differenti proprietà termiche. Pertanto, si fa uso della procedura proposta da Fredlund (1973), che consiste nell'eseguire alternativamente

¹⁰ Si tratta della stessa acqua utilizzata per preparare il materiale costipato, cfr § II.4.

le due fasi descritte in seguito. Inizialmente si utilizza il bicchiere normalmente usato per misurare le variazioni di volume riempiendolo d'acqua ed inducendo un moto di filtrazione attraverso la piastra mediante una differenza di carico di 600 kPa, ottenuta controllando le pressioni di cella e quella dell'acqua nei pori e chiudendo il circuito della pressione dell'aria. Successivamente le bolle d'aria eventualmente ancora presenti all'interno della piastra vengono portate in soluzione chiudendo i rubinetti di drenaggio ed attendendo che la pressione dell'acqua di porosità raggiunga il valore della pressione di confinamento imposta. Ogni fase richiede circa due ore. Suddetta procedura consente inoltre di verificare che la piastra haev sia integra e ben incollata al piedistallo e di misurarne la permeabilità, che risulta dell'ordine di 10^{-7} cm/s. È opportuno ripeterla, dopo alcuni mesi di lavoro dell'apparecchiatura, anche per controllare l'eventuale "invecchiamento" (i.e. la riduzione di permeabilità) della piastra (Barrera, 2002).

I circuiti vengono accuratamente saturati facendo circolare acqua in pressione (per gravità oppure con l'ausilio della pompa peristaltica). Le tre burette di misura sono più volte svuotate, utilizzando gli sfiati dei trasduttori di pressione differenziale, e poi riempite; quindi viene fatta fluire acqua attraverso le camere dei DPT tramite gli stessi sfiati superiori. I livelli all'interno delle burette per la misura delle variazioni di contenuto d'acqua vengono fatti equalizzare e successivamente si chiude il collegamento idraulico tra esse. La pompa peristaltica viene lasciata attiva, in continuo, fino a quando il provino non viene sistemato sul piedistallo.

Montaggio della prova

Il provino di materiale costipato, conservato in camera umida all'interno di una fustella metallica protetta da cellophane e paraffina, viene sfustellato tramite torchio manuale e successivamente pesato tramite una bilancia centesimale (± 0.01 g) e misurato tramite calibro digitale (sensibilità ± 0.01 mm).

Con la massima rapidità, per non alterare il contenuto d'acqua, il provino viene posto sul piedistallo, chiudendo i circuiti di drenaggio dell'acqua e dell'aria; si sistema sull'estremità superiore la testa di carico, avendo cura che i quattro fori filettati per il collegamento al drive plate siano disposti secondo una croce con i lati paralleli a quelli del banco di prova. Per prevenire variazioni di contenuto d'acqua non controllabili si evita di apporre carta da filtro attorno al provino. La membrana in lattice ed i relativi O-ring di fissaggio vengono apposti tramite un tendi-membrana. Il bicchiere di misura viene montato dopo aver disposto grasso al silicone sull'O-ring di tenuta. Il suo riempimento d'acqua avviene dal basso verso l'alto,

attraverso l'apposito circuito, per evitare di intrappolare bolle d'aria che renderebbero erronea la valutazione delle variazioni di volume (cfr. III.5.2.2). Il livello fluido all'interno del bicchiere viene fatto equalizzare con quello della buretta di riferimento, quindi viene chiuso il collegamento idraulico tra i suddetti recipienti. Infine, viene posto uno strato di olio al silicone al di sopra delle interfacce libere aria – acqua all'interno delle tre burette e del bicchiere.

Si procede quindi al montaggio del sistema di applicazione della sollecitazione torcente. Il telaio cilindrico, su cui è appoggiato il drive plate, viene posizionato sulla base della cella, coassialmente al provino, e fissato tramite le quattro viti, facendo attenzione ad evitare un brusco impatto tra drive plate e testa di carico. Dopo aver allentato le due viti che rendono il sistema di bobine solidale al telaio di supporto e la vite che fissa la guida in teflon del nucleo dell'LVDT, il drive plate viene posizionato correttamente ed avvitato alla testa di carico e ciascuna coppia di bobine viene scrupolosamente centrata rispetto al relativo magnete. Fissati nuovamente il sistema di bobine al telaio e la guida del nucleo dell'LVDT, si passa a montare i proximitor ed il corpo dell'LVDT sul sostegno verticale predisposto allo scopo. Poi, sistemato il cilindro cavo di confinamento, si realizzano tutte le connessioni relative ai cavi degli strumenti di misura e del motore elettromagnetico e si pone ciascun proximitor al centro dell'intervallo di misura (7.0 V), controllandone il segnale mediante il voltmetro digitale. Chiusa la cella tramite la piastra superiore è possibile applicare le pressioni di inizio prova.

Esecuzione della prova

Aperto il collegamento con il sistema di alimentazione di aria compressa (pressione di ingresso 1.1 ± 0.1 MPa) si fa crescere la pressione di cella fino a circa 30 kPa. Successivamente, aperto il rubinetto del circuito della pressione dell'aria di porosità, la si aumenta fino a 20 kPa, ottenendo così una tensione media efficace ($p-u_a$) di circa 10 kPa. Quindi, le pressioni di cella e dell'aria vengono incrementate simultaneamente e nella stessa misura in modo da mantenere la ($p-u_a$) costante (e pari a 10 kPa) e raggiungere il valore di u_a necessario per ottenere la suzione desiderata. Infine, si apre il rubinetto della linea di controllo della pressione neutra e si impone il valore di 50 kPa, applicando così la (u_a-u_w) assegnata al contorno del provino.

Come per le prove triassiali (cfr. § III.5.1.1), si distinguono tre fasi: equalizzazione, compressione e taglio. La fase di applicazione del momento torcente, di breve durata, viene però eseguita più volte su un singolo provino. Analogamente alle prove su terreni saturi, è

possibile seguire una strategia di prova multistage e/o multistep (Silvestri, 1991; d'Onofrio, 1996), con la differenza che i percorsi di carico isotropi sono descritti nel piano $(p-u_a):(u_a-u_w)$, piuttosto che lungo l'asse delle pressioni efficaci p' .

La metodologia adottata durante le prove sulla sabbia limosa del Metramo ha previsto fasi di equalizzazione, a tensione media netta di 10 kPa, per modificare la suzione del provino dal valore di post-costipamento a quello desiderato. Il criterio di interpretazione di tale fase è del tutto analogo a quanto esposto a proposito delle prove triassiali (cfr. III.5.1.1).

Successivamente, i provini sono stati compressi in tre fasi distinte: da 10 a 100 kPa, da 100 a 200 kPa ed infine da 200 a 400 kPa di $(p-u_a)$. La velocità di carico è di 4 kPa/h, come per le prove triassiali sullo stesso materiale, e si è operato facendo variare la pressione di cella e mantenendo costanti le pressioni dell'aria e dell'acqua di porosità, e quindi la suzione. In corrispondenza di $(p-u_a) = 100, 200$ e 400 kPa sono state realizzate le fasi di taglio. Per i valori più bassi di $(p-u_a)$ il momento torcente è stato progressivamente incrementato senza superare la soglia di comportamento pseudo-lineare (cfr. § I.8.1), in modo da minimizzare il disturbo apportato (probing della soglia lineare). Sono state alternate prove RC e TS (a frequenza 0.06, 0.1, 0.5 e 2 Hz), per studiare l'effetto della velocità di deformazione, avendo cura di indurre lo stesso livello di deformazione tangenziale con ogni serie di prove. Raggiunta la tensione media netta di 400 kPa, il momento torcente è stato aumentato fino al valore massimo consentito dall'apparecchiatura per indagare il comportamento non lineare del materiale oggetto di prova.

La procedura adoperata per il limo argilloso del Po è più articolata. Infatti, dopo una fase di equalizzazione preliminare a $(p-u_a)=10$ kPa sono stati seguiti percorsi isotropi nel piano $(p-u_a):(u_a-u_w)$ comprendenti sia fasi di compressione a suzione costante (in carico ed in scarico) sia fasi di variazione della suzione (in wetting e in drying) a tensione media netta costante. I cicli di carico e scarico e quelli di wetting e drying hanno permesso di esplorare un intervallo di $(p-u_a)$ compreso tra 10 e 750 kPa e di (u_a-u_w) tra 0 e 400 kPa. Lungo tali percorsi il modulo di taglio iniziale G_0 è stato misurato praticamente con continuità eseguendo periodicamente prove di colonna risonante a basso livello di deformazioni¹¹. In corrispondenza di alcuni stati tensionali [in genere, per $(p-u_a) = 100, 200, 400, 700$ kPa e $(u_a-u_w) = 0, 100, 200, 400$ kPa] è

¹¹ Nella fase preliminare di equalizzazione ciò viene evitato poiché il basso livello di $(p-u_a)$ applicato non garantisce l'assenza di scorrimenti indesiderati tra il provino e le basi scabre a contatto.

stato eseguito il probing della soglia lineare, tramite prove RC e TS a frequenza 0.5 Hz. Alla fine di varie prove è stato indagato il comportamento non lineare tramite prove RC e TS spinte fino al massimo livello di deformazione consentito dall'apparecchiatura¹².

Durante le fasi di compressione, la velocità di carico imposta è stata di 4 kPa, come per le prove triassiali eseguite sullo stesso materiale. Le fasi di wetting e drying successive all'equalizzazione preliminare sono state eseguite facendo variare simultaneamente le pressioni di cella e dell'aria (a velocità di 15 kPa) e successivamente attendendo il raggiungimento di condizioni di equilibrio. La conclusione della fase di equalizzazione è stata ancora dedotta sulla base delle indicazioni di Sivakumar (1993) e Rampino (1997), ritenendo trascurabili variazioni di contenuto d'acqua minori di 0.04 %/giorno.

III.5.2.6 Criteri di interpretazione delle prove torsionali

Prove di colonna risonante

Come accennato nel § III.5.2 lo schema di vincolo torsionale del provino all'interno della RCTS a suzione controllata è di tipo fixed-free: impedito di ruotare alla base inferiore e libero all'estremità superiore. Per interpretare le prove di colonna risonante si fa riferimento allo schema di figura III.32: un cilindro visco-elastico (il provino), con densità ρ , modulo di rigidità a taglio (lineare) G e coefficiente di viscosità dinamica (lineare) μ , bloccato inferiormente e collegato superiormente ad una massa rigida (la testa di carico ed il drive plate). Detti L l'altezza del provino, J il momento d'inerzia polare della sua sezione trasversale e I_0 il momento d'inerzia della massa rigida, la legge di rotazione $\theta_L(t)$ all'estremità libera è fornita dalla soluzione dell'equazione di equilibrio dinamico:

$$I_0 \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right]_{z=L} + \left[GJ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right]_{z=L} + \left[\mu J \frac{\partial^2 \theta_L}{\partial t \partial z} \right]_{z=L} = M_0(t) \quad (\text{III.3})$$

dove M_0 è il momento torcente applicato all'estremità superiore della massa rigida. Nel caso in cui la soluzione sia lineare, ossia che θ vari linearmente lungo l'asse del provino¹³, la distribuzione di deformazioni tangenziali γ_{zr} si ricava assumendo la sezione trasversale indeformabile:

¹² In alcuni casi non è stato possibile raggiungere il massimo momento torcente esplicabile poiché le deformazioni accumulate lungo il percorso di sollecitazione isotropa hanno compromesso la centratura dei magneti rispetto alle bobine, rendendo il drive plate non completamente libero di ruotare in prove a deformazioni tangenziali elevate.

¹³ Tale ipotesi risulta verificata con ottima approssimazione quando il rapporto tra i momenti d'inerzia del provino e della massa rigida risulta inferiore a 10^{-2} (Silvestri, 1991), come accade per la RCTS nella configurazione corrente.

$$\gamma(r, z, t) = \theta_L(t) \frac{r}{L} \quad (\text{III.4})$$

e risulta quindi uguale in ciascuna sezione ma dipendente in modo lineare dalla distanza r dall'asse del provino.

Durante la prova di colonna risonante il sistema schematizzato in figura III.32 è sollecitato da un momento M_0 che varia sinusoidalmente con ampiezza costante e frequenza variabile linearmente rispetto al tempo tra due valori estremi (f_{\min} , f_{\max}), eseguendo un cosiddetto sweep in frequenza. Purché lo sweep duri un tempo sufficientemente lungo (la sua velocità è dell'ordine di 0.1 Hz/s nell'ambito del presente lavoro) ciò che si ottiene è praticamente una successione di istanti in cui il sistema dinamico vibra a regime sotto una sollecitazione ad ampiezza e frequenza costante.

La soluzione della III.3 in condizioni di risonanza permette di ricavare il modulo di rigidezza (Silvestri, 1991) poiché, trascurando il quadrato del damping D rispetto all'unità e detti f_r la frequenza di risonanza e I il momento d'inerzia del provino risulta:

$$F \cdot \tan F = \frac{I}{I_0} \quad (\text{III.5})$$

dove

$$F = \frac{2\pi \cdot f_r L}{\sqrt{G/\rho}} \quad (\text{III.6})$$

da cui, letta la frequenza di risonanza sulla curva di risposta $\theta_L:f$, si ricava G .

Lo smorzamento D viene calcolato applicando due differenti metodologie di analisi della risposta in frequenza del sistema (d'Onofrio, 1996).

Secondo il metodo della semibanda di potenza (half power) D viene calcolato sulla base della larghezza della curva di risposta:

$$D_{hp} = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad (\text{III.7})$$

dove f_1 ed f_2 sono le frequenze a cui corrisponde una rotazione θ_L pari al valore di risonanza diviso $\sqrt{2}$.

Con il metodo della frequenza di risonanza (resonance frequency), invece, il damping è ottenuto paragonando la rotazione θ_L di risonanza a quella che sarebbe generata da una forzante statica a parità di ampiezza della sollecitazione:

$$D_{\text{rif}} = \frac{\theta_L(f=0)}{2 \cdot \theta_L(f=f_r)} = \frac{|M_o| \cdot L}{2GJ \cdot \theta_L(f=f_r)} \quad (\text{III.8})$$

Dall'equazione III.4 si deduce una non uniformità delle deformazioni e quindi delle tensioni indotte all'interno del provino, a cui si aggiunge, superata la soglia di linearità (cfr. § I.8.1), una non uniformità della rigidezza mobilitata. Le equazioni da III.3 a III.8, ricavate in ipotesi di linearità, continuano ad essere utilizzate, convenzionalmente, anche in campo non lineare per ricavare rigidezza e smorzamento, dando a G e μ significato di parametri lineari equivalenti rappresentativi del comportamento "medio" del provino. Ad essi si associa una deformazione equivalente γ , che intende approssimare il livello deformativo che mobiliterebbe, secondo l'effettiva legge tensioni-deformazioni del terreno, una rigidezza ed uno smorzamento pari a quelli calcolati. Tale deformazione si ottiene inserendo nella III.4 un raggio equivalente che sulla base di indicazioni di letteratura (Chen e Stokoe, 1979; Esposito e Gaeta, 1995) nel presente lavoro viene assunto pari all'80% del raggio del provino.

Prove di torsione ciclica

Le prove di torsione ciclica sono prove quasi-statiche: la sollecitazione torcente $M_o(t)$ è sinusoidale, di ampiezza e frequenza costante, con quest'ultima sufficientemente bassa a non indurre apprezzabili forze d'inerzia. In ipotesi di comportamento lineare, la rigidezza può essere ricavata da formule statiche applicate ai risultati del generico ciclo:

$$(\theta_L)_{\text{PP}} = \frac{(M_o)_{\text{PP}} \cdot L}{GJ} \quad (\text{III.9})$$

essendo $(\theta_L)_{\text{PP}}$ e $(M_o)_{\text{PP}}$ rispettivamente le ampiezze picco-picco della rotazione all'estremità superiore e della sollecitazione torcente.

Essendo la sollecitazione quasi-statica, le rotazioni θ variano rigorosamente in modo lineare lungo l'asse del provino, da cui:

$$\gamma(r, z, t) = \theta_L(t) \frac{r}{L} \quad (\text{III.4})$$

Inoltre, la distribuzione delle tensioni tangenziali risulta:

$$\tau(r, z, t) = M_o(t) \frac{r}{J} \quad (\text{III.10})$$

Il damping D può essere calcolato per ogni ciclo a partire della sua definizione (cfr. § I.8.1, eq. I.18) sulla base del diagramma tensioni-deformazioni¹⁴.

Per quanto riguarda il livello di deformazione di riferimento, e l'interpretazione delle prove in campo non lineare, vale quanto già detto nel caso delle prove RC: si ricorre ancora al concetto di raggio medio equivalente, qui assunto pari all'80% del raggio del provino.

¹⁴ Chiaramente il risultato è indipendente dalla distanza r dall'asse del provino.