

## **CAPITOLO VI**

### **CONCLUSIONI**

La ricerca presentata in questa tesi ha avuto come obiettivo lo studio del comportamento meccanico di terreni utilizzati come materiali da costruzione tramite prove a suzione controllata. Essa si inserisce in un più ampio progetto in corso da vari anni presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica (DIG) di Napoli, finalizzato all'analisi degli effetti della suzione e delle variabili di costipamento sulla risposta meccanica dei terreni.

I materiali utilizzati per opere in terra quali dighe, argini, rilevati, sistemi di rivestimento di discariche, ecc. vengono tipicamente addensati per ottenere proprietà meccaniche ed idrauliche idonee. La scelta di energia, contenuto d'acqua e tecnica di costipamento rappresenta la strategia per modulare dette proprietà. In ogni caso, il terreno risultante è parzialmente saturo, situazione che spesso permane anche in condizioni di esercizio e che presenta notevoli conseguenze pratiche. Per questo motivo, nello studio dei terreni costipati è indispensabile far ricorso agli schemi concettuali ed ai modelli della meccanica dei terreni non saturi, nonché adoperare apparecchiature di laboratorio specifiche.

La sperimentazione svolta si è concentrata sullo studio della risposta meccanica a piccole e medie deformazioni in condizioni di suzione controllata. Le motivazioni di tale progetto sono state essenzialmente due. Da un lato, è sembrato opportuno approfondire un tema di indubbio interesse teorico e pratico, per il quale i contributi ad oggi disponibili in letteratura risultano ancora in numero ridotto e spesso contrastanti nei contenuti. Dall'altro, ci si è posti l'obiettivo di trovare un anello di congiunzione tra due settori dello studio della risposta meccanica dei materiali costipati, nei quali l'attività di ricerca del DIG è impegnata da molti anni: l'analisi del comportamento a piccole deformazioni dei terreni saturi e di quello a medie e grandi deformazioni dei terreni non saturi.

Lo studio della risposta tensio-deformativa in condizioni lontane dalla rottura "eredita" le difficoltà teoriche e sperimentali connesse ad entrambi i settori suddetti.

Con riferimento al modulo di rigidezza a taglio, è riconosciuta per un determinato terreno saturo (fissate le proprietà intrinseche) la forte dipendenza dal livello di deformazione distorsionale, dallo stato di confinamento, dallo stato volumetrico, dalla storia tensionale. Per un materiale non saturo, gli ultimi tre fattori richiedono di essere definiti in forma più generale ed anche l'analisi dei loro effetti risulta più onerosa e complessa.

La presenza di due fluidi all'interno dei pori (di cui uno compressibile) e l'interazione che questi hanno tra loro e con lo scheletro solido condizionano fortemente lo stato tensionale e, più in genere, il comportamento meccanico ed idraulico. Non è possibile estendere il principio delle tensioni efficaci di Terzaghi (1936) al caso della parziale saturazione, ma è necessario piuttosto far riferimento a due variabili distinte come tensione netta e suzione. Inoltre, a differenza del caso saturo, sono necessarie due variabili indipendenti per descrivere lo stato volumetrico, come il volume specifico ed il volume specifico d'acqua. Anche nel caso più semplice dei terreni non espansivi, infine, la storia tensionale determina la posizione di due luoghi di snervamento nel piano tensioni medie nette - suzione: la Loading Collapse e la Suction Increase, generalizzazioni della tensione di preconsolidazione di un terreno saturo.

Dal punto di vista sperimentale, l'applicazione di percorsi tensionali deviatorici a un provino non saturo non implica particolari differenze rispetto alle tecniche tipicamente utilizzate per i materiali saturi. Tuttavia, per lo studio del comportamento a piccole deformazioni la necessità di dispositivi complessi e sofisticati per il controllo delle tensioni deviatoriche e delle deformazioni distorsionali si sovrappone a quella di sistemi per imporre la suzione e monitorare lo stato volumetrico. Si richiede, infatti, di poter controllare le tensioni totali nonché quelle agenti nell'acqua e nell'aria di porosità. Inoltre, essendo le variazioni di volume e di contenuto d'acqua tra loro indipendenti, bisogna provvedere separatamente alla loro misura.

Questa ricerca si inserisce in un settore relativamente giovane rispetto alla meccanica dei terreni saturi e tuttora in continua crescita. Negli ultimi due decenni si è assistito a notevoli sviluppi, sia negli approcci teorici che nella sperimentazione, e dall'indagine dei principi generali che regolano il comportamento dei materiali non saturi si è progressivamente passati a studi di maggior dettaglio. In particolar modo, continua a ricevere notevole attenzione il comportamento volumetrico. Essendo aumentato il numero di risultati sperimentali con misura contemporanea di variazioni di volume e contenuto d'acqua, forte impulso ha ricevuto

di recente lo sviluppo di modelli che integrano l'interpretazione della risposta meccanica ed idrica, fortemente accoppiate.

Tra gli aspetti ancora da approfondire spicca senz'altro il comportamento a piccole deformazioni. La valenza applicativa di tale problematica risiede chiaramente nella possibilità di tenere in conto gli effetti della parziale saturazione su quei parametri (rigidezza, smorzamento) che influiscono, in condizioni statiche e dinamiche, sullo stato limite di esercizio rispetto alle deformazioni per fondazioni superficiali, pali di fondazione, scavi in aree urbane, opere in terra, ecc.

Il lavoro svolto si è articolato in varie fasi. Tra le peculiarità della risposta dei terreni non saturi è stato privilegiato l'approfondimento teorico del comportamento volumetrico, necessario all'interpretazione dei risultati ottenuti nel campo delle piccole deformazioni. È stata progettata e messa a punto una cella di colonna risonante e taglio torsionale (RCTS), idonea all'esecuzione di prove a suzione controllata. Inizialmente, tale apparecchiatura è stata utilizzata per integrare l'ampia caratterizzazione della sabbia limosa del Metramo costipata intrapresa presso il DIG a partire dal 1992. In seguito, lo studio sperimentale si è concentrato sul comportamento di un nuovo materiale costipato, il limo argilloso del Po. Ai fini di un inquadramento più generale della risposta di tale materiale in condizioni di parziale saturazione, oltre ad investigarne il campo delle piccole e medie deformazioni sono state realizzate prove triassiali a suzione controllata tramite la cella già impiegata da Rampino (1997).

I risultati ottenuti sono di particolare interesse ed originalità, tanto nello sviluppo della nuova apparecchiatura di colonna risonante quanto nella sperimentazione con essa eseguita.

La cella RCTS è il risultato di una serie di modifiche apportate ad una versione dello stesso dispositivo per terreni saturi. Tali modifiche prendono spunto da varie soluzioni di letteratura ormai consolidate e dalle recenti esperienze avute presso il DIG con altre apparecchiature a suzione controllata (cella triassiale ed edometro).

La suzione è applicata con il metodo della traslazione degli assi. Sia la pressione dell'aria sia quella dell'acqua di porosità vengono imposte attraverso il piedistallo, che consta di due parti concentriche. In quella centrale trovano alloggio la piastra porosa ad alto valore d'ingresso d'aria ed, al di sotto, un incavo spiroidale per la circolazione d'acqua al fine di

allontanare l'aria filtrata per diffusione. Nella zona anulare esterna si trova il circuito della pressione dell'aria di porosità, che viene comunicata al provino attraverso sedici fori.

Le deformazioni radiali sono ottenute indirettamente, misurando le variazioni di livello di un bagno liquido che circonda il provino. La camera di misura consiste in uno spazio a sezione di corona circolare compreso tra un bicchiere in alluminio montato attorno al provino e la testa di carico. Un trasduttore di pressione differenziale consente di valutare il dislivello rispetto al liquido contenuto in una buretta di riferimento.

La misura delle variazioni di contenuto d'acqua è ottenuta attraverso due burette collegate ad un secondo trasduttore di pressione differenziale. Una 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 funziona da riferimento.

Il programma sperimentale è consistito in prove di colonna risonante e taglio ciclico a suzione controllata per lo studio della risposta a piccole e medie deformazioni della sabbia limosa del Metramo ed in prove triassiali ed RCTS a suzione controllata per caratterizzare il comportamento meccanico del limo argilloso del Po nel campo delle piccole, medie e grandi deformazioni.

Il primo materiale è stato addensato con la procedura Proctor modificato. Sul terreno costipato all'ottimo sono state eseguite cinque prove, su quello wet tre, indagando livelli di suzione compresi tra 0 e 400 kPa.

Il limo del Po, costipato all'ottimo Proctor standard, è stato sottoposto a quindici prove in cella triassiale, di compressione e di taglio, alle suzioni di 50, 100, 200 e 400 kPa. Tramite l'apparecchiatura di colonna risonante sono state eseguite dodici prove a suzione controllata. Di queste, sette hanno previsto una compressione isotropa a suzione costante (in tre casi sia in carico che in scarico) con misura continua del modulo di taglio e del fattore di smorzamento iniziali. Le altre cinque prove hanno compreso fasi di drying e wetting a tensione media netta costante. Sono stati indagati, oltre al caso della saturazione, tre livelli di suzione: 100, 200 e 400 kPa.

L'analisi dei risultati ottenuti ha messo in evidenza un'apprezzabile ripetibilità ed ha confermato la bontà delle misure eseguite. Ciò vale anche con riferimento all'omogeneità tra i risultati conseguiti sul limo argilloso del Po in fase di sollecitazione isotropa, con due apparecchiature (cella triassiale e RCTS) piuttosto differenti. Nel complesso, inoltre, è stato

possibile inquadrare questi ultimi in modo soddisfacente alla luce dei recenti modelli elastoplastici per terreni non saturi. La stessa modellazione del comportamento volumetrico è servita poi di supporto all'interpretazione del comportamento a piccole deformazioni.

Dalle fasi di equalizzazione si è dedotto che la suzione media indotta dal costipamento è compresa tra 110 e 140 kPa. Nonostante una leggera dispersione delle caratteristiche iniziali dei provini, le differenze di contenuto d'acqua post-costipamento tendono a ridursi per effetto dell'equalizzazione a un livello comune di suzione. Le variazioni di volume specifico sono sempre di contrazione e significative specie a suzione 400 kPa, valore nettamente superiore alla  $(u_a - u_w)$  conseguente all'addensamento. Quando si supera la massima suzione pregressa, ha luogo un fenomeno di accumulo di deformazioni irreversibili con conseguente spostamento sia della Suction Increase, che viene intercettata direttamente dal percorso tensionale, sia della Loading Collapse, per accoppiamento.

La suzione ha un effetto "benefico" sul comportamento in fase di compressione. Al crescere di  $(u_a - u_w)$  si osserva una significativa riduzione degli indici di compressibilità sia in condizioni di consolidazione normale sia in scarico-ricarico. In entrambi i casi, non si osserva alcuna tendenza a un valore minimo stabile. Anche gli indici di compressibilità relativi al volume specifico d'acqua diminuiscono al crescere della suzione. Il modo di variare di queste grandezze è sempre di tipo esponenziale, ma la velocità della diminuzione cambia da un caso all'altro, per cui non è possibile determinare parametri comuni che esprimano in modo unico gli effetti di  $(u_a - u_w)$ . Infine, al crescere di  $(u_a - u_w)$  aumenta la pressione apparente di sovraconsolidazione.

La determinazione del luogo di snervamento Loading Collapse è stata complicata da due fattori: la posizione delle rette vergini nel piano  $(p - u_a):v$ , con quella relativa a suzione 400 kPa sottoposta rispetto alle altre in un ampio campo tensionale, e il già citato incrudimento in fase di equalizzazione a suzione 400 kPa. È stato possibile descrivere con buona approssimazione la forma della LC ed il suo modo di evolvere al procedere dei percorsi tensionali applicati tramite il modello di Wheeler e Sivakumar (1995).

Anche dalle fasi di taglio condotte in cella triassiale è stata osservata una significativa influenza della suzione, al cui crescere si verifica un aumento della rigidità e della

resistenza. A causa di uno spiccato fenomeno di localizzazione delle deformazioni, specie alle tensioni medie nette di consolidazione più basse, non è stato possibile ottenere punti di stato critico. I dati sperimentali  $[(p-u_a), q]$  corrispondenti al valore di picco della curva tensioni - deformazioni sono stati interpolati con buona approssimazione da rette parallele a quella di rottura del materiale saturo. L'effetto della suzione può in definitiva essere esplicitato attraverso la funzione coesione apparente. Come avviene per la compressibilità, esso è meno che lineare e, nel campo indagato, lontano dallo stabilizzarsi al crescere della suzione stessa.

Lo studio del comportamento a piccole deformazioni è iniziato con un materiale differente, la sabbia limosa del Metramo, investigando gli effetti della suzione sulla rigidità iniziale tramite percorsi di carico monotoni di compressione isotropa a  $(u_a-u_w)$  costante. I risultati conseguiti hanno permesso, in generale, di far luce sugli effetti della suzione e della struttura indotta dal costipamento sul comportamento in condizioni lontane dalla rottura dei terreni addensati e quindi hanno rappresentano per alcuni aspetti il punto di riferimento per la più completa sperimentazione sul limo argilloso del Po. Sulla loro base, è stato proposto uno schema interpretativo semplificato basato sulla relazione  $G_o:p'$  del terreno saturo e su schemi particellari elementari che danno conto dei diversi effetti dell'acqua di volume e di menisco sullo scheletro solido.

Dall'insieme dei risultati sperimentali ottenuti sul limo argilloso del Po è stato messo in luce un significativo effetto della suzione sulla rigidità a piccole deformazioni che, in linea generale, aumenta al crescere di  $(u_a-u_w)$ .

In condizioni di consolidazione normale, le relazioni  $G_o:(p-u_a)$  hanno tutte pressappoco la stessa pendenza media. Pertanto, è possibile interpolare con una stessa curva, traslata verso l'alto di una quantità dipendente dalla suzione, sia i dati pertinenti a terreno saturo che quelli del materiale non saturo. Anche gli effetti della  $(u_a-u_w)$  su  $G_o$ , esprimibili per quanto detto attraverso il solo valore che la rigidità assume in corrispondenza di una generica  $(p-u_a)$  di riferimento, hanno gradiente decrescente al crescere della suzione, ma non tendono a stabilizzarsi nel campo investigato.

Quanto conseguito dalle fasi di wetting e drying ha messo in evidenza che, a causa di variazioni di suzione (in particolare, aumenti di suzione oltre il valore massimo pregresso), possono aver luogo fenomeni di incrudimento, ossia di incremento di rigidità, a parità di stato tensionale  $(p-u_a)$ ,  $(u_a-u_w)$ . Per questo, è più corretto parlare in termini generalizzati di

effetti della storia tensionale sulla rigidità piuttosto che solo di “effetti della suzione”. In analogia a quanto si osserva per i terreni saturi, per i quali la rigidità dipende dall’indice dei vuoti corrente oltre che dallo stato tensionale, il suddetto fenomeno di incrudimento è legato alle variazioni di stato volumetrico, espresse in termini di volume specifico e volume specifico d’acqua.

Interpretando il comportamento volumetrico con il modello di Wheeler e Sivakumar (1995) è stato possibile studiare gli effetti del percorso tensionale isotropo seguito sulla posizione dei luoghi di snervamento Loading Collapse e Suction Increase e quindi di rappresentare in forma sintetica l’evoluzione dello stato di sovraconsolidazione nel corso delle prove. Ciò ha permesso di estendere la relazione  $G_o:(p-u_a):(u_a-u_w)$  ricavata per la consolidazione normale allo stato di sovraconsolidazione derivante da variazioni non monotone di tensione media netta (carico – scarico) oppure di suzione (drying – wetting).

I possibili sviluppi futuri di questa ricerca riguardano gran parte degli aspetti finora considerati.

Per l’attrezzatura di colonna risonante, sarebbe utile poter estendere il campo di suzione applicabile, attualmente limitato di fatto ad un massimo di 0.5 MPa. Una differenza fondamentale tra i risultati ottenuti sulla sabbia limosa e sul limo argilloso è che, nel caso di granulometrie più fini, sarebbe necessario raggiungere  $(u_a-u_w)$  più elevate di quelle ad oggi disponibili per osservare la presumibile stabilizzazione degli effetti dell’acqua di menisco. Ciò sarebbe realizzabile mantenendo il metodo di applicazione corrente della suzione ma rendendo l’apparecchiatura in grado di sopportare pressioni di cella e dell’aria maggiori. In alternativa, non appare eccessivamente complicata l’implementazione di un sistema alternativo, quale il controllo osmotico, che consentirebbe anche di superare il massimo di 1.5 MPa della tecnica di traslazione degli assi legato al valore di ingresso d’aria delle piastre ceramiche attualmente in commercio.

Sarebbe estremamente vantaggioso anche il miglioramento della risoluzione delle deformazioni tangenziali, che nella configurazione attuale penalizzano le misure di rigidità e di damping in prove TS. Le soluzioni di potenziamento dell’apparecchiatura potrebbero essere analoghe a quelle che, presso il DIG, hanno portato allo sviluppo dell’apparecchiatura di colonna risonante denominata THOR (d’Onofrio, 1996).

Per quanto riguarda lo studio sperimentale e l’interpretazione del comportamento in condizioni lontane della rottura, meriterebbero ulteriore approfondimento i fenomeni di

accoppiamento tra Loading Collapse e Suction Increase e le loro conseguenze sul comportamento a piccole deformazioni. Anche gli effetti del collasso strutturale sulla rigidità iniziale, ossia le conseguenze di percorsi di riduzione di suzione sullo stato di sovraconsolidazione del materiale, potrebbero essere oggetto di nuovi studi. Più in generale, i risultati già ottenuti sui materiali costipati oggetto di prova potranno essere confermati ed integrati da sperimentazione su altri terreni. Un loro significativo arricchimento potrebbe essere conseguito con un numero limitato di prove eseguite sul limo argilloso del Po costipato a contenuti d'acqua diversi dall'ottimo, verificando se la struttura indotta dalla procedura di preparazione influisca in modo significativo sulle proprietà intrinseche del materiale, in modo analogo a quanto succede per la sabbia limosa del Metramo.

Nell'ambito della letteratura tecnica specifica, lo studio realizzato si presenta come il primo finalizzato ad inquadrare in modo esteso ed organico il comportamento a piccole e medie deformazioni in condizioni di parziale saturazione. È molto probabile che il tema di ricerca non si esaurisca con questa tesi, che rappresenta comunque un valido punto di partenza per indagini future. Inizialmente, gli schemi concettuali proposti potranno essere di supporto all'interpretazione di nuovi dati sperimentali. Anche se il loro impiego in modelli costitutivi completi da utilizzare per risolvere problemi al finito potrebbe richiedere tempi decisamente lunghi, le concrete possibilità di sviluppo in questa direzione sembrano notevoli.