CAPITOLO IV

RISULTATI SPERIMENTALI

IV.1 Introduzione

In questo capitolo vengono illustrati i risultati sperimentali ottenuti sulla sabbia limosa del Metramo e sul limo argilloso del Po.

Il primo materiale, costipato a due contenuti d'acqua differenti, è stato sottoposto a prove di colonna risonante e taglio torsionale a suzione controllata. Tale indagine ha integrato quanto già ottenuto nell'ambito di ricerche precedenti riguardanti lo stesso terreno (d'Onofrio, 1992; Santucci de Magistris, 1996; Rampino, 1997) con informazioni relative all'aspetto del comportamento a piccole deformazioni in condizioni di parziale saturazione, quasi totalmente inesplorato in campo internazionale. A prescindere da tale obiettivo, i risultati conseguiti hanno permesso, più 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 (Mancuso et al., 2002).

Successivamente, è stata studiata la risposta meccanica del limo argilloso del Po in condizioni di parziale saturazione tramite prove a suzione controllata. Sono stati indagati sia il campo delle medie e grandi deformazioni, attraverso prove triassiali, sia la risposta in condizioni lontane dalla rottura, mediante prove di colonna risonante e taglio torsionale.

Nel seguito, suddetti risultati sono descritti considerando aspetti della risposta meccanica a livello di dettaglio crescente e quindi con un ordine diverso da quello cronologico con cui sono state eseguite le prove. Difatti, una prima sezione è dedicata al comportamento del limo del Po in prove triassiali. Quindi, si passa all'argomento delle piccole e medie deformazioni, riferendo prima riguardo la sperimentazione sulla sabbia limosa e poi su quella più ampia e completa realizzata sul limo argilloso.

La discussione dei dati sperimentali è essenzialmente di tipo qualitativo, essendo il successivo capitolo V incentrato sulla loro interpretazione e modellazione.

IV.2 Programma sperimentale

IV.2.1 Sabbia limosa del Metramo

Le prove triassiali sulla sabbia limosa del Metramo sono quelle riportate in Rampino (1997) e Sangiuliano (1999) e già descritte sinteticamente nel §II.5.

Le prove eseguite in cella RCTS nell'ambito di questo lavoro sono otto: cinque sul materiale costipato all'ottimo e tre sul terreno wet (v. tabella IV.1). I livelli di suzione indagati vanno da 25 a 400 kPa per il primo materiale e da 100 a 400 kPa per il secondo. Come già illustrato nel §III.5, la procedura è la stessa per ogni prova: il terreno è stato compresso isotropamente a suzione costante e le fasi di taglio sono state realizzate in corrispondenza delle tensioni medie nette (p-u_a) = 100, 200 e 400 kPa.

IV.2.2 Limo argilloso del Po

Il programma sperimentale in cella triassiale sul limo del Po ha previsto quindici prove a suzione controllata aventi lo scopo di studiare gli effetti dello stato di parziale saturazione sulla compressibilità, la rigidezza a deformazioni medio - elevate e la resistenza del materiale. Sono state eseguite tre prove di compressione isotropa con fase di scarico e ricarico¹ e dodici prove di taglio con percorso di carico inclinato di 3:1 nel piano $(p-u_a):q$, tutte a suzione costante. I livelli di (u_a-u_w) indagati sono stati 50, 100, 200 e 400 kPa.

In tabella IV.2 sono sintetizzati il programma di prove e le caratteristiche iniziali dei provini. La densità secca (v. figura IV.1) ed il contenuto d'acqua misurati sui provini (i.e. dedotti dalla valutazione del peso secco a fine prova) presentano un'omogeneità leggermente inferiore rispetto ai valori pertinenti ai blocchi Proctor da cui i provini sono stati ottenuti (cfr. § II.4)². L'effetto di tale disuniformità sul comportamento meccanico (globalmente modesto) sarà discusso nei successivi paragrafi.

Il programma sperimentale in cella di colonna risonante relativo al limo del Po è sintetizzato in tabella IV.3, dove vengono specificate anche le caratteristiche iniziali dei provini. Riguardo l'omogeneità di questi ultimi, valgono le considerazioni già fatte a proposito dei provini utilizzati in cella triassiale (v. figura IV.2). Delle dodici prove a suzione controllata realizzate,

¹ Solo di scarico, per la prova a suzione 100 kPa denominata S100CI.

² È possibile, seguendo le indicazioni riportate negli standard ASTM, che ciò possa essere imputato al rigonfiamento che il materiale subisce quando viene rimosso dalla fustella formacampioni dell'apparecchiatura per il costipamento (il che giustifica una densità sistematicamente inferiore della media Proctor) ed al disturbo nella fase di realizzazione dei provini (Santucci de Magistris, 1996).

sette hanno previsto, a seguito della fase di equalizzazione preliminare, una compressione isotropa (in tre casi sia in carico che in scarico) con misura praticamente continua del modulo di taglio iniziale, G_o e del fattore di smorzamento iniziale, D_o . Le altre cinque prove hanno previsto fasi di compressione e fasi di drying e wetting a (p-u_a) costante con misura continua di G_o e D_o . Globalmente, sono stati indagati tre livelli di suzione: 100, 200 e 400 kPa, e pressioni medie nette comprese tra 25 e 700 kPa.

IV.3 Prove triassiali

IV.3.1 Fasi di equalizzazione

La fase di equalizzazione è consistita nell'applicare la suzione desiderata al contorno del provino e nell'attendere il raggiungimento di condizioni di equilibrio, a conferma di aver ottenuto una (u_a-u_w) omogenea all'interno del provino stesso (cfr. §III.5). Sono stati imposti valori modesti di tensione media netta (p-u_a) e deviatore q (rispettivamente 12 e 5 kPa) in modo da minimizzare il disturbo indotto e poter rilevare tensioni di snervamento anche ridotte nella successiva fase di compressione (Rampino, 1997).

Il fenomeno di variazione del volume e del contenuto d'acqua differito nel tempo è analogo alla consolidazione dei terreni saturi, con la differenza che piuttosto che le tensioni efficaci varia la suzione, passando dal valore indotto dalla procedura di costipamento a quello imposto al contorno del provino. Il materiale assorbe o espelle acqua a seconda che la suzione imposta sia inferiore o superiore a quella iniziale. Nel primo caso, il terreno può esibire contrazione o rigonfiamento a seconda delle caratteristiche microstrutturali, della storia tensionale pregressa, del livello di (p-u_a) corrente e della variazione di (u_a-u_w). Le riduzioni di volume dovute a wetting (collasso) presentano tipicamente una significativa componente non reversibile, mentre (per terreni non espansivi) le deformazioni di rigonfiamento risultano sostanzialmente reversibili e, a parità di variazione di suzione, di minore entità (in valore assoluto) di quelle di collasso. Diversamente, le variazioni di volume causate da un aumento di suzione sono comunque di contrazione e possono presentare componenti irreversibili non trascurabili (cfr. §1.6).

I risultati delle fasi di equalizzazione (raggruppati per livello di suzione) sono riportati nelle figure IV.3-IV.6. In ciascuna prova, il volume specifico ed il volume specifico d'acqua

variano con gradiente decrescente all'aumentare del tempo fino a risultare sensibilmente stabili dopo 15000 minuti (ovvero circa 10 giorni).

Le variazioni di contenuto d'acqua registrate sono positive a suzione 50 kPa e negative a suzione 200 kPa. Da ciò si desume che la suzione media indotta dalle operazioni di costipamento è compresa tra 50 e 200 kPa. Generalmente, si osserva una dispersione non trascurabile in termini di variazioni di volume specifico d'acqua (v. figure IV.3a-IV.6a) tra provini relativi allo stesso livello di suzione. Tale fenomeno è dovuto alla concomitanza di due fattori: la non perfetta omogeneità di contenuto d'acqua a fine costipamento e la differenza relativamente modesta tra la suzione iniziale e quella applicata. Ad ogni modo, le differenze di contenuto d'acqua post-costipamento tendono a ridursi per effetto dell'equalizzazione a un livello comune di suzione. Ciò risulta particolarmente evidente con riferimento alle suzioni di 100 e 200 kPa (v. figg. IV.4e e IV.5e). Per (u_a - u_w) = 100 kPa le curve sperimentali tendono al valore medio w = 23.0%, in tre casi con aumento del contenuto d'acqua ed in uno con diminuzione. A suzione 200 kPa la stabilizzazione avviene attorno al 22.6%.

Da questo si desume che al contenuto d'acqua ottimo relativo a costipamento Proctor standard (w = 23.0%, cfr. §II.4) corrisponde una suzione di circa 100 kPa. Il contenuto d'acqua medio effettivamente ottenuto a seguito delle procedure di addensamento è w=22.88% (v. tab. IV.2) e quindi la suzione media è compresa tra 100 e 200 kPa.

Diagrammando i contenuti d'acqua finali in funzione della suzione applicata (v. figura IV.7) si ottiene un ramo della curva di ritenzione idrica del materiale (cfr. §I.6). Nello stesso grafico viene riportato un punto relativo a materiale saturo, ottenuto mediando i contenuti d'acqua che competerebbero ai vari provini se fossero saturati a volume costante a partire dalle condizioni indotte dal costipamento.

Le variazioni di volume specifico Δv osservate sono sempre di contrazione (v. figg. IV.3b-IV.6b). Per le prove a suzione 200 e 400 kPa questa circostanza trova facile spiegazione nella riduzione di contenuto d'acqua osservata durante l'equalizzazione. Facendo riferimento solo a questi due casi, l'entità delle deformazioni aumenta al crescere di (u_a-u_w). Infatti, Δv passa da -0.005 per suzione 200 kPa a -0.024 per suzione 400 kPa (in media). Per quanto riguarda i livelli di suzione 50 e 100 kPa, a cui corrispondono aumenti di w in equalizzazione³, il segno delle variazioni di volume non è giustificabile secondo gli schemi di interpretazione

³ Fa eccezione la prova S100P400TG, a suzione 100 kPa, durante la quale si osserva una riduzione di contenuto d'acqua in fase di equalizzazione. In questo caso il volume diminuisce, in accordo a quanto ci si aspetta in una fase di drying.

tradizionali della meccanica dei terreni non saturi (cfr. §I.6), poiché è improbabile che con la tensione media netta applicata (solo 12 kPa) si siano verificate deformazioni irreversibili di collasso. Sia l'entità delle variazioni di volume registrate sia il comportamento osservato nelle successive fasi di compressione (analogo a quello di un terreno saturo sovraconsolidato) sembrerebbero indicare un modesto "riassetto" dello scheletro solido da deformazioni anisotrope: di rigonfiamento in direzione assiale e di contrazione in direzione radiale (v. esempio in fig. IV.3f).

Nella maggior parte delle prove la dispersione in termini di volume specifico postcostipamento rimane non del tutto trascurabile anche dopo l'equalizzazione (v. figg. IV.3b-IV.6d), ma, come si vedrà nel §IV.3.2, questo non sembra condizionare significativamente la ripetibilità dei risultati nelle successive prove di compressione.

IV.3.2 Fasi di compressione

La compressibilità del limo argilloso del Po in condizioni non sature è stata studiata per i livelli di suzione 100, 200 e 400 kPa mediante tre prove apposite (denominate S100CI, S200CI ed S400CI, rispettivamente) con fase di carico fino a (p-u_a) di circa 400 kPa, successiva fase di scarico di alcune centinaia di kPa e, per la S200CI e la S400CI, ricarico fino al massimo valore di tensione media netta consentito dal sistema di generazione delle pressioni.

Altre fasi di compressione isotropa (seguite da taglio) sono state realizzate in carico monotono a suzione 50, 100, 200 e 400 kPa, fino alle tensioni medie nette di consolidazione di 100, 200 e 400 kPa.

Nella figura IV.8 sono rappresentati nel piano (p-u_a):v i risultati delle prove di compressione isotropa S100CI, S200CI e S400CI, assieme ad una curva di compressione del materiale saturo (cfr. I.6) e ad una relativa al livello di suzione 50 kPa (prova S50P400TG)⁴.

Da ciascuna prova è possibile riconoscere in maniera sufficientemente chiara un tratto iniziale di pendenza minore ed il successivo ramo di compressione vergine. Al crescere della suzione si osserva una diminuzione di compressibilità: l'indice λ passa da 0.052 nel caso del materiale saturo a 0.034 per (u_a-u_w) = 400 kPa⁵ (v. fig. IV.9). L'effetto di riduzione di λ

⁴ Lo scarto che esiste in termini di volume specifico, v, e volume specifico d'acqua, v_w , indotti dal costipamento per i provini presi in considerazione è molto ridotto (v. tab. IV.2).

⁵ I valori di λ sono stati calcolati per interpolazione logaritmica considerando i dati nell'intervallo (p-u_a) = 10÷400 kPa, nel quale sono disponibili punti sperimentali per tutti i livelli di (u_a-u_w) indagati.

risulta graduale all'aumentare di (u_a-u_w) e non sembra affatto stabilizzarsi nel campo indagato, suggerendo che l'eventuale minimo (cfr. §I.6) possa essere attinto a suzioni decisamente maggiori di 400 kPa.

La riduzione di compressibilità al crescere di (u_a-u_w) risulta non trascurabile anche in scarico e ricarico. L'indice di rigonfiamento k, pari a 0.0106 a suzione 100 kPa, si riduce a 0.0051 a suzione 400 kPa (v. fig. IV.9). Anche in questo caso non si osserva alcuna tendenza a un valore minimo stabile nell'intervallo di (u_a-u_w) studiato.

Ulteriore conseguenza dello stato di parziale saturazione è l'aumento della pressione apparente di sovraconsolidazione (p-u_a)_o al crescere di (u_a-u_w). Ciò risulta evidente, nonostante la variazione di pendenza delle curve sia abbastanza graduale, specie se si confrontano i risultati del caso saturo [(p-u_a)_o \cong 60 kPa] con quelli ottenuti in prove a suzione controllata [(p-u_a)_o varia da 130 a 180 kPa per (u_a-u_w) che varia da 50 kPa a 400 kPa]. Tali tensioni possono essere interpretate come valori di snervamento (cfr. §I.9). Come sarà illustrato dettagliatamente nel capitolo V, il fenomeno descritto è regolato da due fattori concomitanti: all'effetto benefico della suzione sulla stabilità dello scheletro solido si aggiunge, nel caso delle prove a (u_a-u_w) = 200 e 400 kPa, quello di incrudimento provocato dall'equalizzazione, che è una fase di drying a suzione maggiore di quella indotta dal costipamento.

Nelle figure IV.10a-b sono riportati i risultati in termini di volume specifico d'acqua v_w. Al crescere della (p-u_a) i provini espellono acqua e quindi v_w diminuisce. Globalmente, l'andamento delle curve sperimentali è analogo a quello già descritto per il volume specifico. Le variazioni di v_w misurate a suzione non nulla sono (in valore assoluto) inferiori sia alle corrispondenti variazioni di volume specifico sia, a maggior ragione, a quelle che competono al materiale saturo (per il quale v e v_w coincidono). Difatti, l'indice di compressibilità λ_w [definito nel piano (p-u_a):v_w analogamente a λ , cfr. §I.9.2] passa da 0.052 per grado di saturazione unitario a 0.018 per suzione 400 kPa e l'indice di rigonfiamento k_w varia tra 0.0047, per (u_a-u_w) = 100 kPa e 0.0014, per (u_a-u_w) = 400 kPa.

Come mostrato in figura IV.11, per effetto di un aumento di $(p-u_a)$ a suzione costante non nulla si osserva, in tutti i casi, un aumento del grado di saturazione. Ciò vale sia in primo

carico che dopo una fase di scarico, a causa della riduzione del volume dei pori pieni d'aria non compensata da quella dei vuoti pieni d'acqua⁶.

Nelle figure IV.12-IV.15 si riportano i risultati finora descritti assieme a quelli di tutte le fasi di compressione isotropa realizzate per consolidare il materiale prima delle fasi di taglio. I dati sono raggruppati per livello di suzione. La ripetibilità dei risultati ottenuti risulta piuttosto soddisfacente in termini di variazioni di volume specifico e di volume specifico d'acqua osservate a partire dall'inizio della compressione.

Infine, vale la pena di osservare che in fase di compressione il comportamento risulta sostanzialmente isotropo, con scarti tra deformazioni assiali, ε_{ax} , e radiali, ε_{rad} , al più del 10%. Questo si verifica anche per le prove a suzione 50 e 100 kPa (v. esempio in fig. IV.16), nonostante nella precedente fase di equalizzazione si registrino ε_{ax} ed ε_{rad} di segno opposto.

IV.3.3 Fasi di taglio

Le dodici prove di taglio eseguite sul limo argilloso del Po hanno consentito di analizzare gli effetti della parziale saturazione sul comportamento in fase deviatorica.

Nelle figure IV.17-IV.20 i risultati ottenuti sono raggruppati per livello di suzione e rappresentati in termini di tensione deviatorica, variazione di volume specifico e di volume specifico d'acqua in funzione della deformazione assiale.

La risposta ottenuta nelle prove consolidate a $(p-u_a) = 100$ kPa è simile a quella di terreni sovraconsolidati saturi. Le curve tensioni-deformazioni (v. figg. IV.17a-IV.20a) presentano un picco abbastanza netto attorno al 10% di ε_{ax} oltre il quale il deviatore degrada verso valori inferiori.

Al crescere della tensione media netta di consolidazione p_c il picco risulta meno evidente o scompare del tutto. Come atteso, inoltre, aumentano la rigidezza e la resistenza.

Come si è gia avuto occasione di sottolineare (cfr. §II.6), a fine prova sono state spesso rilevate bande di taglio visibili ad occhio nudo. In particolare, ciò è sistematicamente avvenuto per i provini consolidati a $p_c = 100$ kPa. Dunque, la rottura si è verificata con una marcata localizzazione delle deformazioni ed i risultati in fase di post-picco non sono rappresentativi del comportamento del singolo elemento di volume bensì della risposta di un

⁶ Il volume dei pori pieni d'aria è proporzionale alla differenza tra v e v_w mentre quello dei pori pieni d'acqua è proporzionale alla quantità (v_w -1).

sistema (il provino) non più continuo. Tale circostanza giustifica la caduta di resistenza piuttosto brusca registrata in alcune delle prove, la mancata stabilizzazione del deviatore anche oltre il 15% di deformazioni (v. ad esempio la figura IV.19) e la perdita di attendibilità delle misure di variazione di volume (cfr. §III.5) dopo il raggiungimento della rottura "a becco di flauto".

Le deformazioni volumetriche risultano sempre di contrazione, fatta eccezione per la prova condotta a suzione 50 kPa sul materiale consolidato a $(p-u_a) = 100$ kPa, unico caso in cui si registra un significativo fenomeno di dilatanza (v. figg. IV.17b-IV.20b). A parità di suzione, l'entità delle variazioni di volume aumenta al crescere della $(p-u_a)$ di consolidazione. Il volume specifico non sembra stabilizzarsi neanche per deformazioni assiali maggiori del 15%.

Le variazioni di volume specifico d'acqua presentano andamento differente a seconda della suzione e della tensione media netta iniziale (v. figg. IV.17c-IV.20c). Sul materiale consolidato alle (p-u_a) più basse (100 e 200 kPa) e nelle prove a suzione più bassa (50 e 100 kPa), dopo una fase iniziale di espulsione d'acqua i provini tendono ad assorbirne. Il fenomeno diminuisce di intensità al crescere sia di (u_a-u_w) sia di p_c. In tutti gli altri casi si osserva una riduzione monotona del contenuto d'acqua, di entità crescente all'aumentare della tensione media netta di consolidazione. Le differenze tra le curve sperimentali relative ad uno stesso livello di suzione diventano meno accentuate al crescere di (u_a-u_w) fino a risultare particolarmente contenute a (u_a-u_w) = 400 kPa. Anche il volume specifico d'acqua, fatta eccezione per pochi casi, non tende ad un valore stabile al crescere della deformazione assiale.

L'effetto della suzione sul comportamento in fase di taglio è esemplificato nelle figure IV.21-IV.23. Al crescere di (u_a-u_w) si verifica, come atteso, un significativo aumento di rigidezza e di resistenza. L'entità delle variazioni di volume sembra poco influenzata dalla suzione: in particolare, a p_c di 400 kPa le quattro curve sperimentali $\Delta v:\epsilon_{ax}$ risultano praticamente coincidenti (v. fig. IV.22). Diversamente, le variazioni di volume specifico d'acqua dipendono fortemente dalla (u_a-u_w). Nel caso p_c=100 kPa al crescere della suzione le variazioni di v_w si riducono passando nel campo negativo a (u_a-u_w)=200 kPa. A p_c = 400 kPa gli effetti della tensione di consolidazione e della suzione si combinano facendo in modo che per (u_a - u_w) pari a 100, 200 e 400 kPa si osservi il fenomeno inverso: diminuzione dell'entità delle Δv_w al crescere di (u_a - u_w).

A causa del citato fenomeno di localizzazione delle deformazioni, non è possibile determinare punti di stato critico nel piano (p-u_a):q, né tanto meno nei piani (p-u_a):v e (p-u_a):v_w. Come per il caso della completa saturazione (cfr. §II.6), si sceglie di determinare il criterio di resistenza relativo a ciascun livello di suzione utilizzando i valori di picco del deviatore. I punti sperimentali sono interpolati con buona approssimazione da rette parallele a quella di rottura del materiale saturo (v. fig. IV.24). Su tale argomento si tornerà con maggior dettaglio nel capitolo V.

IV.4 Prove RCTS: sperimentazione sulla sabbia del Metramo

Le prove di colonna risonante e taglio torsionale realizzate sulla sabbia del Metramo⁷ hanno consentito di indagare vari aspetti del comportamento a piccole e medie deformazioni di tale materiale in condizioni non sature.

I risultati conseguiti sul terreno addensato all'ottimo, tramite cinque prove condotte alle suzioni di 25, 50, 100, 200 e 400 kPa, hanno messo in luce gli effetti sulla rigidezza iniziale G_o di una progressiva de-saturazione, passando da condizioni in cui prevale la presenza di acqua di volume nei pori del terreno fino alla situazione di preponderanza dell'acqua di menisco (cfr. §I.2).

Le tre prove realizzate sul materiale wet, condotte alle suzioni di 100, 200 e 400 kPa, hanno permesso di studiare gli effetti della struttura indotta dal costipamento, oltre a confermare alcune peculiarità di comportamento osservate sul terreno addensato all'ottimo. Come più volte sottolineato (cfr. §II.2), la sperimentazione in condizioni di suzione controllata è la più adatta per isolare gli effetti della struttura da quelli della suzione e, più in genere, dello stato iniziale.

Per entrambi i materiali, sono state previste prove RC e prove TS a 4 diverse frequenze di applicazione del carico torsionale (0.06, 0.1, 0.5 e 2 Hz), in modo da analizzare in maniera esaustiva gli effetti della velocità di deformazione.

Il comportamento a piccole e medie deformazioni, ossia il decadimento delle proprietà meccaniche al crescere del livello di deformazione tangenziale, è stato indagato alla tensione

⁷ I risultati delle prove triassiali su sabbia limosa del Metramo non satura (Rampino, 1997; Sangiuliano, 1999) sono richiamati nel § II.5.

media netta di 400 kPa tramite prove RC e TS fino alla massima sollecitazione torcente consentita dall'apparecchiatura.

Al fine di trarre conclusioni di maggiore generalità sulla risposta dei terreni addensati in condizioni lontane dalla rottura, nel seguito saranno illustrati i principali risultati conseguiti, facendo particolare riferimento agli aspetti del comportamento che si prestano al confronto con quanto ottenuto nella più ampia sperimentazione sul limo argilloso del Po. Per ulteriori dettagli si rimanda a Vinale et al. (1999) e Mancuso et al. (2002).

IV.4.1 Rigidezza a taglio iniziale, G_o

Le figure IV.25 e IV.26 riportano le misure di rigidezza G_o effettuate sui materiali ottimo e wet in funzione della tensione media netta di consolidazione. Negli stessi grafici sono riportati i risultati relativi a materiale saturo (cfr. §II.5).

A prescindere dal livello di suzione, G_o aumenta con lo stato di confinamento applicato in modo meno che lineare, come accade per la sabbia del Metramo satura ed, in genere, per i terreni in condizioni di completa saturazione (cfr. §I.8). Come atteso, al crescere di (u_a-u_w) la rigidezza aumenta. Per il materiale costipato all'ottimo, facendo riferimento ai risultati delle prove RC (v. fig. IV.25a), la rigidezza satura passa da 130 MPa per p'=100 kPa a 286 MPa per p'=400 kPa. Alla suzione di 200 kPa, G_o varia tra 231 MPa, per (p-u_a) = 100 kPa, e 464 MPa, per (p-u_a) = 400 kPa.

I valori di G_o ottenuti delle prove TS a frequenza 0.5 Hz (v. figg. IV.25b - IV.26b) risultano sistematicamente inferiori a quelli ricavati dalle corrispondenti prove RC, come avviene per il materiale saturo, dimostrando un effetto non trascurabile della velocità di deformazione anche in condizioni di parziale saturazione.

Dal confronto tra i risultati relativi ai contenuti d'acqua ottimo e wet si evince che la modalità di costipamento influenza significativamente il comportamento del materiale. Evidentemente, l'addensamento sul lato wet dà luogo ad una microstruttura più deformabile, ossia a riduzioni di G_o che, a seconda della tensione media netta e della suzione, variano tra il 20% e il 40% dei corrispondenti valori pertinenti all'ottimo.

Nelle figure IV.27 e IV.28 gli stessi risultati sono rappresentati in funzione della suzione. Il comportamento osservato sembra confermare alcune delle caratteristiche messe in luce dalle prove di compressione isotropa eseguite sullo stesso materiale (Rampino, 1997; Rampino et

al., 1999a-b; Mancuso et al., 2000a). Così come succede per la compressibilità (cfr. §II.7), anche gli effetti della suzione sulla rigidezza risultano maggiori nell'intervallo da 0 a 100-200 kPa di (u_a - u_w) e sembrano poi tendere verso una stabilizzazione. Difatti, al crescere della suzione, a tensione media netta costante, G_o si approssima ad un valore di soglia dipendente da (p- u_a).

Le curve $G_o:(u_a-u_w)$ presentano una forma ad S che può essere spiegata considerando i diversi effetti dell'acqua di volume e dell'acqua di menisco (cfr. §I.4) sul comportamento del materiale (Mancuso et al., 2002). Su tale argomento si tornerà con maggior dettaglio nel capitolo V; qui è opportuno osservare che sulla base dei risultati ottenuti è possibile identificare due intervalli di suzione nei quali gli effetti della parziale saturazione sono regolati da fenomeni differenti a livello particellare.

In condizioni di saturazione e per i più bassi valori di suzione [zona I], la quantità d'aria presente all'interno dei pori è trascurabile e pertanto il comportamento meccanico è influenzato essenzialmente dall'acqua di volume: gli effetti di un aumento di suzione sono praticamente equivalenti a quelli di un uguale incremento di tensione media efficace su materiale saturo.

Gradualmente, al crescere della suzione, la quantità d'aria presente nei pori diventa sempre più significativa, facendo in modo che l'effetto dell'acqua di menisco prevalga su quello dell'acqua di volume.

A suzioni sufficientemente elevate [zona II, a partire da (u_a-u_w) di 100-200 kPa per la sabbia del Metramo] gli effetti dell'acqua di menisco diventano dominanti e, in accordo con quanto ci si aspetta dai modelli particellari introdotti nel §I.4, le curve $G_o:(u_a-u_w)$ presentano gradiente positivo e decrescente all'aumentare della suzione.

Il contenuto d'acqua di costipamento sembra influenzare significativamente non solo i singoli valori della rigidezza iniziale ma anche il modo di variare di questa grandezza con la suzione.

A parità di $(p-u_a)$ il rapporto tra i valori di G_o di soglia e del materiale saturo risulta inferiore per il materiale costipato sul lato wet.

Inoltre, la transizione verso un comportamento dominato dagli effetti dell'acqua di menisco (zona II) sembra iniziare a valori di suzione più bassi (tra i 25 ed i 50 kPa) per il materiale costipato all'ottimo e più elevati (attorno ai 100 kPa) per il materiale wet.

Questa ultima evidenza sperimentale sembra in accordo con quanto riportano studi di letteratura (e.g. Vanapalli et al., 1996) riguardo gli effetti del contenuto d'acqua di

costipamento sulla curva caratteristica. Tipicamente, l'addensamento all'ottimo dà luogo ad un valore d'ingresso d'aria inferiore rispetto a quello sul lato wet. Ciò potrebbe giustificare la minore estensione della zona I nel caso della sabbia del Metramo costipata al contenuto d'acqua ottimo.

IV.4.2 Effetti della velocità di deformazione sulla rigidezza iniziale

In figura IV.29 i valori di G_o ottenuti tramite prove di torsione ciclica (a frequenza f = 0.01, 0.06, 0.5 e 2 Hz) e di colonna risonante⁸ a (p-u_a) = 200 kPa sono rappresentati in funzione della velocità media di deformazione tangenziale $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = 4 \cdot \gamma \cdot f$$
 (IV.1)

essendo γ il livello di deformazione media equivalente (cfr. §III.5.2).

I dati relativi ad entrambi i contenuti d'acqua di costipamento risultano ben interpolati da relazioni lineari nel piano $G_0:log(\dot{\gamma})$, anche se i punti sperimentali delle prove RC giacciono leggermente al di sopra delle linee di tendenza che si otterrebbero per i soli dati delle prove TS. L'effetto della velocità di deformazione è significativo: mediamente G_0 cresce di circa 20 MPa per ciclo logaritmico di $\dot{\gamma}$.

È possibile quantificare tale effetto tramite il coefficiente $N_{\dot{\gamma}}$ (cfr. §I.8), proposto da Isenhower (1979) per interpretare il comportamento di terreni saturi:

$$N_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{G_{\dot{\gamma}, ref}} \frac{G_2 - G_1}{\log \dot{\gamma}_2 - \log \dot{\gamma}_1}$$
(I.25).

Le misure di G_o relative a ciascuna serie di dati corrispondente ad un determinato livello di (p-u_a) e (u_a-u_w) possono essere normalizzate rispetto alla rigidezza G_{$\dot{\gamma}$,ref} che compete allo stesso stato tensionale ed alla velocità di riferimento $\dot{\gamma}$,ref scelta⁹. In questo modo, N_{$\dot{\gamma}$} può essere ottenuto, per definizione, dall'interpolazione dei dati normalizzati nel piano $\frac{G}{G_{\dot{\gamma},ref}}$: log($\dot{\gamma}$) (v. figura IV.30). Il valore di N_{$\dot{\gamma}$} che ne risulta è molto simile per il materiale ottimo (N_{$\dot{\gamma}$} = 5.7%) e per quello wet (N_{$\dot{\gamma}$} = 6.2%).

⁸ Le frequenze di risonanza variano tra 50 e 100 Hz a seconda della suzione, della pressione media netta e del contenuto d'acqua di costipamento.

⁹ La velocità di deformazione selezionata per normalizzare i dati è 0.1 %/min.

In definitiva, il contenuto d'acqua di costipamento non influenza in modo significativo la dipendenza di G_o da $\dot{\gamma}$, che quindi sembra essere funzione solo delle proprietà fisiche e mineralogiche delle particelle (Vinale et al., 1999).

IV.4.3 Comportamento a medie deformazioni

Nella figura IV.31 vengono riportati in termini di curve di decadimento normalizzate, G/G_0 : γ , i risultati delle prove RC condotte a (p-u_a) = 400 kPa sui materiali ottimo e wet. In suddette fasi la sollecitazione torsionale è stata incrementata fino al massimo valore consentito dall'apparecchiatura per studiare il comportamento non lineare e non reversibile della sabbia del Metramo parzialmente satura.

Come per i terreni saturi (cfr. §I.8), si distingue un intervallo di deformazioni tangenziali (fino alla cosiddetta soglia di linearità γ_L) entro il quale G rimane sensibilmente costante e pari al suo valore massimo G_o.

Confrontando le curve relative allo stesso contenuto d'acqua di costipamento, non si osserva un effetto significativo della suzione sulla soglia di linearità. Ciò apparentemente contrasta con le previsioni dei modelli particellari introdotti nel §I.4 per descrivere l'influenza dell'acqua di menisco. Infatti, a causa dell'effetto stabilizzante dei menischi capillari sullo scheletro solido, ci si aspetterebbe un'espansione della zona di comportamento pseudo-lineare al crescere della suzione, in analogia a quanto succede in genere nei terreni saturi per effetto di un aumento di tensione media efficace (cfr. §I.8).

A tale circostanza contribuiscono due fattori.

Innanzitutto, per la sabbia del Metramo si osserva una scarsa influenza dello stato di confinamento su alcune caratteristiche tensio-deformative anche in condizioni di completa saturazione. Risultano poco dipendenti dalla tensione media efficace non solo la soglia di linearità ma anche gli andamenti del fattore di smorzamento D con il livello di deformazione tangenziale, i fenomeni di degradazione ciclica, il valore della soglia di accoppiamento distorsionale-volumetrica (Santucci de Magistris, 1996).

Inoltre, è possibile che il valore di tensione media netta di 400 kPa scelto per analizzare il comportamento non lineare del terreno non saturo risulti "troppo" elevato, rispetto ai livelli di (u_a-u_w) investigati (0 - 400 kPa), al punto da rendere modesto il contributo della parziale saturazione alla permanenza in campo lineare.

Anche l'effetto del contenuto d'acqua di costipamento su γ_L non sembra essere particolarmente significativo. Dalle figure IV.31a-b si deduce una soglia di linearità (per G/G_o = 0.95) pari a 1·10⁻³ % e 2·10⁻³ % per i materiali ottimo e wet, rispettivamente. Il tratto praticamente orizzontale che si riscontra nelle curve di decadimento a bassi livelli deformativi è in realtà un effetto della velocità di deformazione. Al crescere di γ , infatti, aumenta anche $\dot{\gamma}$, con conseguente contributo irrigidente (cfr. §IV.4.2). Noto il coefficiente N_{$\dot{\gamma}$}, è possibile correggere i valori di G_o scalandoli con riferimento ad un'unica velocità di deformazione (Vinale et al., 1999). Apportando tale correzione si modifica la forma delle curve G: γ ma rimane sostanzialmente invariato l'ordine di grandezza di γ_L .

IV.5 Prove RCTS: sperimentazione sul limo del Po

IV.5.1 Equalizzazioni preliminari

Come nelle prove triassiali (cfr. §IV.3.1), la fase iniziale di equalizzazione ha consentito di imporre valori desiderati di suzione ai provini di materiale costipato, a tensioni nette ridotte (p-u_a = 10 kPa, q = 0 kPa). A meno della differente configurazione dell'apparecchiatura RCTS, con applicazione delle pressioni dell'acqua e dell'aria di porosità alla base inferiore, e delle dimensioni dei provini usati (ϕ = 36 mm ed H = 72 mm per la colonna risonante; ϕ = 38 mm ed H = 76 mm per il triassiale), l'equalizzazione risulta praticamente identica a quella del caso triassiale, anche perché non sono state previste fasi di taglio torsionale, dato che il basso valore di (p-u_a) applicato non avrebbe garantito l'assenza di scorrimenti tra provino e piedistallo e/o testa di carico.

I risultati ottenuti sono rappresentati nelle figure IV.32-IV.34, raggruppati per livello di suzione. Generalmente, valgono le stesse osservazioni fatte a proposito delle equalizzazioni in cella triassiale a $(u_a-u_w) = 100$, 200 e 400 kPa.

A suzione 100 kPa (figg. IV.32a-e) si osservano modeste riduzioni di volume specifico (mediamente -0.004) ed il contenuto d'acqua tende al 23.0% per due delle tre prove eseguite (come nelle prove triassiali, cfr. § IV.3) ed a un valore leggermente superiore (w = 23.35 %) nel caso della prova mp12RC. Comunque, le differenze di contenuto d'acqua esistenti all'inizio dell'equalizzazione (effetto di una non perfetta omogeneità dei provini, cfr. § IV.2) tendono a ridursi durante tale fase. Lo stesso non si verifica in maniera evidente per il volume specifico, sia a questo livello di suzione sia a quelli superiori.

A suzione 200 kPa (figg. IV.33a-e) le variazioni di volume sono ancora di contrazione e ridotte ($\Delta v = -0.003$, in media). Per le tre prove mp02RC, mp05RC, mp11RC il contenuto d'acqua sembra tendere al valore comune di 21.9 %, leggermente inferiore a quello riscontrato dalle equalizzazioni in cella triassiale. Nella mp04RC il contenuto d'acqua diminuisce di solo 0.25% nonostante il suo valore iniziale sia di 22.8%. Il verificarsi di un caso di dispersione apparentemente accentuato come questo è probabilmente favorito dalla circostanza che la differenza tra la suzione indotta dal costipamento e quella imposta durante l'equalizzazione è di entità modesta (dell'ordine dei 100 kPa, cfr. §IV.5.1) e modeste risultano di conseguenza le variazioni di stato indotte.

Dai soli dati della sperimentazione in cella di colonna risonante si deduce che la suzione corrispondente al contenuto d'acqua ottimo Proctor standard (w = 23%) è compresa tra 100 e 200 kPa, più prossima a 100 kPa.

Durante le equalizzazioni a suzione 400 kPa, infine (figg. IV.34a-e), si registrano variazioni di volume specifico più elevate: di circa -0.017 per le prove mp03RC, mp09RC ed mp10RC e di -0.028 per la prova mp07RC, che è quella a cui competono anche le variazioni di volume specifico d'acqua maggiori, essendo w inizialmente uguale a 23.26% e più elevato che negli altri casi. Il contenuto d'acqua medio raggiunto a fine equalizzazione è del 20.87%, anch'esso inferiore rispetto a quello rilevato dalla sperimentazione in cella triassiale.

In figura IV.35 sono riportati tutti i punti di fine equalizzazione nel piano (u_a-u_w) :w, ottenendo un ramo della curva di ritenzione idrica del materiale. Nello stesso diagramma è riportato un punto relativo a materiale saturo, ottenuto mediando i contenuti d'acqua che competerebbero ai vari provini se saturati a volume costante a partire dallo stato determinato dal costipamento.

Nella grafico di figura IV.26 sono rappresentati assieme i contenuti d'acqua al termine delle equalizzazioni relative alle celle triassiale e di colonna risonante. Qui si riscontra una significativa omogeneità tra i risultati ottenuti con apparecchiature piuttosto differenti, ad ulteriore conferma della bontà delle misure eseguite. I dati sperimentali sono interpolati con l'espressione proposta da van Genuchten (1980):

$$w = \frac{w_{sat}}{1 + \left(\frac{u_a - u_w}{a}\right)^n}$$
(IV.2)

con parametri a = 2.52 MPa e n = 0.25.

IV.5.2 Rigidezza a taglio iniziale, G_o

Dopo la fase di equalizzazione preliminare, ciascuna delle dodici prove eseguite in cella RCTS è proseguita con un percorso di carico isotropo nel piano $(p-u_a):(u_a-u_w)$, lungo il quale la rigidezza iniziale G_o è stata misurata con continuità mediante prove RC a basso livello di deformazione. Sette prove sono state condotte a suzione costante (100, 200 o 400 kPa). Le altre cinque hanno compreso una o più fasi in cui la suzione è stata fatta variare a tensione media netta costante (in wetting o in drying).

Nel seguito, i risultati verranno presentati tramite cinque diagrammi per ciascuna prova (v. ad esempio la fig. IV.37). Il percorso di carico isotropo seguito sarà rappresentato nelle figure "a" nel piano (p-u_a):(u_a-u_w), a partire dal punto (p-u_a) = 10 kPa, (u_a-u_w) = 140 kPa che per semplicità viene assunto come stato tensionale post-costipamento in tutti i casi, fatta eccezione per la prova mp07RC¹⁰.

Nelle figure "b" e "c" verranno riportate le misure di rigidezza relative alla parte del percorso tensionale evidenziato in rosso. Il modulo G_o verrà rappresentato in funzione della tensione media netta sia in termini assoluti sia adimensionalizzandolo rispetto alla funzione dell'indice dei vuoti f(e) proposta da Hardin e Black (1968):

$$f(e) = \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e}$$
(I.22)

ed alla pressione atmosferica.

La scelta di una rappresentazione di questo tipo è essenzialmente convenzionale, in quanto si intende raffigurare i dati del materiale non saturo nello stesso modo usato di frequente per i terreni saturi (cfr. §I.8). Come si vedrà in seguito, la f(e) non consente di depurare i dati dagli effetti della storia tensionale, riportando ad un'unica relazione $G_o:(p-u_a):(u_a-u_w)$ i punti sperimentali relativi a materiale normal consolidato e sovraconsolidato. Piuttosto, la f(e) consente di depurare i risultati dalla dispersione dovuta alla disomogeneità di indice dei vuoti a seguito del costipamento.

Infine, nelle figure "d" ed "e" saranno rappresentate le variazioni di volume specifico e volume specifico d'acqua osservate, a partire dall'inizio della fase di equalizzazione preliminare, diagrammate nei piani semilogaritmici (p-u_a): $\Delta v \in (p-u_a)$: Δv_w .

¹⁰ Nell'ambito di una discussione essenzialmente qualitativa dei risultati, risulterebbe inutilmente più complicato portare in conto le differenze tra le suzioni post-costipamento dei vari provini, che saranno trattate nel §V.2. Per la mp07RC, invece, ciò è indispensabile alla lettura dei dati, essendo la suzione iniziale di soli 80 kPa, ben al di sotto del valore medio di 140 kPa.

IV.5.2.1 Fasi di compressione a suzione costante

Tre prove sono consistite in un'equalizzazione iniziale a suzione 100 kPa (i.e. una fase di wetting condotta a $p-u_a = 10$ kPa), seguita da una compressione: monotona fino a $(p-u_a) = 400$ kPa (mp01RC); monotona fino a $(p-u_a) = 700$ kPa (mp06RC); monotona fino a $(p-u_a) = 430$ kPa seguita da uno scarico fino a 100 kPa ed un ricarico fino a 700 kPa (mp11RC). I risultati ottenuti sono diagrammati in figura IV.37.

Il comportamento che si osserva in compressione isotropa a suzione costante è del tutto analogo a quello tipico dei terreni saturi.

In primo carico, al crescere di (p-u_a) il modulo di rigidezza aumenta, in maniera praticamente lineare, se si guarda al grafico in termini di G_o (v. fig. IV.37b), e con una curvatura modesta, ma non trascurabile, se si fa riferimento alla rigidezza adimensionalizzata $G_o/[f(e) \cdot p_{atm}]$ (v. fig. IV.37c).

Nella fase di scarico e ricarico della prova mp12RC, a parità di (p-u_a), il modulo di rigidezza assume valori più elevati di quelli che competono alla precedente fase di compressione monotona. Il ciclo descritto in termini di G_o presenta un'isteresi modesta. Superata la massima tensione media netta precedentemente applicata (p-u_a = 430 kPa) la curva G_o:(p-u_a) sembra raccordarsi al prolungamento del tratto di primo carico¹¹.

La ripetibilità dei risultati è soddisfacente, con riferimento sia alle rigidezze sia alle variazioni di volume specifico. Per quanto riguarda le variazioni di volume specifico d'acqua, la dispersione è da imputare alle leggere differenze di contenuto d'acqua tra i vari provini dopo il costipamento (cfr. § IV.5.1); la forma delle curve $v_w:(p-u_a)$ in compressione è comunque la medesima per le tre prove in discussione.

In figura IV.37c è anche riportata la curva rigidezza: tensione media di confinamento relativa al materiale saturo (prova mp00RC), la cui pendenza media risulta molto simile a quella relativa suzione 100 kPa.

In figura IV.38 sono confrontati i risultati delle quattro prove con fase iniziale di equalizzazione a 200 kPa (i.e. una fase di drying condotta a p- $u_a = 10$ kPa) ed una successiva di compressione monotona, fino a (p- u_a) pari a 400 kPa (prova mp02RC), 260 kPa (prova mp04RC), 200 kPa (prova mp05RC) e 500 kPa (prova mp11RC). Nel caso della mp11RC è stata prevista una terza fase di scarico fino a (p- u_a) = 50 kPa.

¹¹ In effetti, presumibilmente a causa delle deformazioni di creep accumulate durante la fase di scarico e ricarico, la curva G_o :(p-u_a) si ricongiunge al prolungamento di quella di primo carico in maniera graduale, e la tensione di preconsolidazione (p-u_a)_o appare maggiore di 430 kPa, sia dalla figura IV.37c sia dalla IV.37d.

Anche in questo caso, la curvatura delle relazioni $G_0:(p-u_a)$ risulta particolarmente modesta e lo scarico tensionale (prova mp11RC) influisce significativamente sui valori della rigidezza, in termini sia assoluti che adimensionalizzati.. La ripetibilità dei risultati è generalmente ancora notevole.

I risultati delle quattro fasi di compressione a suzione costante di 400 kPa sono riportati in figura IV.39. L'equalizzazione preliminare rappresenta in questo caso una fase di drying (realizzata a p-u_a = 10 kPa) fino ad una suzione significativamente superiore a quella indotta dal costipamento¹². Le tensioni medie nette raggiunte in fase di carico monotono sono (p-u_a) = 200 kPa per le prove mp07RC e mp09RC e (p-u_a) = 400 kPa per le prove mp03RC e mp10RC. Per quest'ultima è stata eseguita una terza fase: di scarico, fino a (p-u_a) = 50 kPa.

Nonostante il livello di suzione elevato, e l'incrudimento generato dalla fase di equalizzazione [si noti l'entità della variazione di stato volumetrico in termini di v e v_w, nelle figg. IV.39d-e, paragonandola a quella relativa a (u_a-u_w) inferiore] a $(p-u_a) = 400$ kPa il materiale appare normalmente consolidato. Difatti, in fase di scarico si misurano rigidezze superiori ed andamenti G₀: $(p-u_a)$ del tutto analoghi a quelli osservati nelle prove mp12RC e mp11RC, rispettivamente a suzione 100 e 200 kPa. Anche le variazioni di v e v_w per effetto della riduzione di $(p-u_a)$ confermano quanto affermato (v. figg. IV.39d-e).

La ripetibilità continua ad essere soddisfacente in termini di rigidezze e variazioni di stato volumetrico osservate durante la compressione.

Infine, per facilitare l'analisi diretta degli effetti della suzione sulla rigidezza iniziale, in figura IV.40 sono riproposti i risultati delle prove mp12RC, mp11RC e mp10RC, condotte rispettivamente alla suzione di 100, 200 e 400 kPa.

Gli andamenti in carico e scarico delle tre curve $G_0:(p-u_a)$ sono del tutto simili, ed è evidente il significativo effetto della suzione sulla rigidezza a taglio. L'influenza di (u_a-u_w) sul comportamento volumetrico risulta qualitativamente e quantitativamente analoga a quella osservata tramite prove in cella triassiale e discussa nel §IV.3.2.

In figura IV.41 vengono riportati i valori di rigidezza misurati a $(p-u_a) = 50, 100, 200 e 400$ kPa in fase di primo carico nelle stesse prove mp12RC, mp11RC e mp10RC, in funzione

¹² Come già detto, la prova mp07RC parte da una suzione di circa 80 kPa. Nella rappresentazione scelta ciò corrisponde a: dv = 0.00703; $dv_w = 0.01728$ (cfr. §V.2).

della suzione. L'effetto irrigidente di (u_a-u_w) non si esaurisce affatto nel campo indagato, come evidenziato dal gradiente elevato che le serie di dati rappresentate in figura mostrano tra le suzioni di 200 e 400 kPa. Ammettendo l'esistenza di un livello di (u_a-u_w) oltre il quale gli effetti dell'acqua di menisco si stabilizzano (come per la sabbia del Metramo, cfr. §IV.4), è chiaro che questo debba essere significativamente maggiore di 400 kPa. Ciò concorda con le osservazioni fatte a proposito degli effetti della suzione sugli indici di compressibilità λ e k del limo del Po (cfr. §IV.3.2).

IV.5.2.2 Fasi di drying e wetting

Le fasi di wetting e drying condotte in alcune delle prove realizzate in cella RCTS sono consistite nell'applicare al contorno del provino la suzione desiderata in tempi relativamente brevi ed attendere il raggiungimento di condizioni di equilibrio in termini di contenuto d'acqua (cfr. § III.5), riscontrato sempre dopo circa una settimana.

La pressione media netta costante selezionata per tali fasi è stata di 200 kPa per le prove mp05RC, mp07RC, mp08RC e mp09RC e di 260 kPa per la prova mp04RC.

Per rendere omogenei i risultati in termini di tempo di confinamento, dato il valore non trascurabile della (p-u_a) applicata ed i conseguenti fenomeni di creep, nel seguito si riporteranno in diagramma le misure realizzate nel corso dei primi 9000 minuti di ciascuna fase¹³.

Prove mp04RC e mp05RC

Le prove mp04RC e mp05RC comprendono una compressione monotona a suzione costante 200 kPa seguita da una fase di drying a $(u_a-u_w) = 400$ kPa (v. fig. IV.42).

La fase di drying produce in maniera evidente un incrudimento del materiale. In entrambi i casi, infatti, la rigidezza a fine drying risulta sensibilmente maggiore di quella sulla curva $G_o:(p-u_a)$ di primo carico relativa al livello di suzione 400 kPa (prova mp10RC, v. figg. IV.42b-c). In termini di modulo di taglio adimensionalizzato, i valori finali di G_o sono molto prossimi a quelli della fase di scarico della prova mp10RC, ossia ad una condizione con grado di sovraconsolidazione di circa 1.5-2.0.

Le diminuzioni di volume specifico e volume specifico d'acqua che accompagnano suddetto aumento di rigidezza sono elevate: i punti (p-u_a, Δv) finali giacciono addirittura al di

¹³ In nessun caso, comunque, la condizione di (p-u_a) e (u_a-u_w) costante è stata protratta per oltre 9 giorni.

sotto del tratto di scarico della prova mp10RC e quelli (p- u_a , Δv_w) sul tratto di scarico (prova mp05RC) o leggermente al di sopra (mp04RC).

Tutti i dati, in definitiva, fanno pensare ad un'espansione della superficie di snervamento nel piano $(p-u_a):(u_a-u_w)$ (cfr. §I.9) con conseguente aumento della rigidezza iniziale.

La prova mp05RC ha previsto ulteriori fasi di wetting e drying tra le suzioni di 100 e 400 kPa ed è stata conclusa con una fase di drying da 100 a 200 kPa (v. fig. IV.43).

I risultati ottenuti confermano la natura irreversibile della variazione di stato volumetrico prodotta dalla prima fase di drying. Durante i successivi cicli, infatti, si osservano variazioni di v e v_w più ridotte. Le fasi di drying sono accompagnate da riduzione di volume e del contenuto d'acqua e quelle di wetting da rigonfiamento ed aumento di w. Il materiale non recupera in alcun caso lo stato volumetrico relativo alle condizioni di normale consolidazione (v. figg. IV.43d-e) ed a fine prova, ritornando allo stato tensionale di fine compressione (p-u_a = 200 kPa, u_a-u_w = 200 kPa), il volume specifico ed il contenuto d'acqua risultano sensibilmente diminuiti.

Tutto ciò condiziona significativamente la rigidezza: i valori di G_o attinti a $(u_a-u_w) = 100$ e 400 kPa continuano ad essere maggiori di quelli corrispondenti alle fasi di primo carico ed abbastanza "stabili": confrontando i risultati del primo e del secondo ciclo di suzione si osservano rigidezze abbastanza simili a parità di (u_a-u_w) e le differenze, nel senso di un aumento di G_o con il tempo di confinamento, sono attribuibili al creep. La rigidezza raggiunta al termine della prova è maggiore di quella a fine compressione di circa il 40%

Prova mp07RC

Nella prova mp07RC, dopo una compressione a $(p-u_a) = 200$ kPa, condotta a $(u_a-u_w) = 400$ kPa, la suzione è stata diminuita fino a 100 kPa, riportata a 400 kPa ed poi ridotta a 200 kPa. Infine, è stata eseguita una fase di compressione fino a $(p-u_a) = 550$ kPa (v. figura IV.44).

Durante la prima fase di wetting (CD, in figura), il materiale rigonfia ed assorbe acqua. Il volume specifico raggiunge valori prossimi a quelli competerebbero a suzione 100 kPa in condizioni di normal consolidazione (prova mp12RC) mentre il volume specifico d'acqua rimane al di sotto della curve relative a primo carico e suzione 100 kPa (prova mp12RC). La rigidezza si attesta su valori prossimi a quelli del materiale normalmente consolidato a suzione 200 kPa.

La successiva fase di drying (DE) rivela un modesto aumento di rigidezza, rispetto al termine della compressione, nonostante le variazioni di stato volumetrico accumulate durante il primo ciclo di suzione non risultino particolarmente elevate.

Le fasi finali di wetting (EF) e compressione (FG) dimostrano che il materiale ha subito un incrudimento, prodotto da tutte le fasi precedenti (a partire dall'equalizzazione), che lo rende più rigido di quanto si dimostri se compresso monotonamente a suzione 200 kPa (prova mp11RC). Le curve G_0 :(p-u_a) delle prove mp07RC e mp11RC sembrano convergere a valori elevati di (p-u_a). Ciò indica che, come atteso, gli effetti discussi, imputabili a sovraconsolidazione generata da variazioni di (u_a-u_w), tendono ad annullarsi in conseguenza di una successiva compressione.

Prova mp08RC

La prova mp08RC ha previsto un drying monotono, a partire da suzione 20 kPa e tensione media netta 200 kPa, realizzato in quattro tappe: a $(u_a-u_w) = 50$, 100, 200 e 400 kPa (v. fig. IV.45).

Come fase preliminare, era prevista la saturazione del materiale a volume costante (AB nelle figg. IV.45d-e). Il prematuro prelievo del provino dai saturatori (cfr. § II.6) ha però fatto in modo che la saturazione non fosse completa, così durante la successiva equalizzazione in cella a suzione 20 kPa il terreno continua ad assorbire acqua e rigonfia (BC).

A partire da questa condizione la pressione media netta è stata incrementata fino a 200 kPa (CD) ed infine è stata realizzata la fase di aumento della suzione in tappe (DH).

Le rigidezze G_o attinte all'equilibrio risultano maggiori di quelle corrispondenti alle curve di primo carico, a parità di suzione. L'effetto appare di entità massima a suzione 200 kPa (ragionando in termini di modulo adimensionalizzato), dove G_o è lo stesso che compete al materiale con OCR = 2.5 a parità di (u_a-u_w) (prova mp10RC). Ciò sembra giustificato essenzialmente dalle variazioni di volume specifico (v. fig. IV.45d-e), poiché alla fine del drying a 200 kPa il punto rappresentativo delle variazioni di v_w (G) è situato praticamente sulla curva di primo carico relativa alla prova mp11RC. Dopo il drying a 400 kPa, invece, il punto rappresentativo dello stato volumetrico (H) si trova al di sotto della curva di primo carico della prova mp10RC sia in termini di v sia di v_w.

Prova mp09RC

Durante la prova mp09RC è stato seguito lo stesso percorso tensionale della mp07RC, con riferimento alla prima fase di compressione BC (eseguita a u_a - $u_w = 400$ kPa), al primo wetting CD (a u_a - $u_w = 100$ kPa) ed al primo drying DE (a u_a - $u_w = 400$ kPa). Successivamente, le due prove differiscono poiché nel caso in discussione è stato realizzato un secondo wetting EF a (u_a - u_w) = 100 kPa seguito da una compressione FG fino a (p- u_a) = 700 kPa (v. fig. IV.46).

Con riferimento alle ultime due fasi (per le precedenti i risultati sono del tutto analoghi a quelli già illustrati per la prova mp07RC) si osserva (v. figg. IV.46d-e) che nonostante al termine dei cicli di suzione venga raggiunto praticamente lo stesso volume specifico che compete in primo carico a $(u_a-u_w) = 100$ kPa (prova mp06RC), ciò non accade per il volume specifico d'acqua, che rimane a valori lontani da quelli della mp06RC. La pendenza della curva di compressione v:(p-u_a) è inizialmente ridotta (rispetto alla mp06RC) ma tende ad aumentare rapidamente.

Guardando i risultati in termini di rigidezze (v. figg. IV.46b-c) è evidente che gli effetti di sovraconsolidazione indotti dalle precedenti variazioni di (u_a-u_w) tendono ad attenuarsi rapidamente al crescere di $(p-u_a)$, come mostrato dalla convergenza con la curva $G_o:(p-u_a)$ della prova mp06RC. A suzione 100 kPa tale convergenza appare più rapida di quanto risulti a $(u_a-u_w) = 200$ kPa, come visto per la prova mp07RC.

IV.5.2.3 Considerazioni conclusive

Dall'insieme dei risultati sperimentali ottenuti si evince un significativo effetto della suzione sulla rigidezza a piccole deformazioni che, in linea generale, aumenta al crescere di (u_a-u_w) .

Tuttavia, quanto conseguito dalle prove con fasi di wetting e drying evidenzia che variazioni di suzione (in particolare, aumenti di suzione oltre il valore massimo precedentemente sperimentato dal materiale) possono dar luogo a significativi fenomeni di incrudimento, ossia di incremento di modulo di rigidezza G_o , 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 rigidezza piuttosto che solo di "effetti della suzione", includendo anche in questo senso la suzione come una delle variabili influenti sul comportamento meccanico.

In analogia a quanto si osserva per i terreni saturi (cfr. §I.8), per i quali la rigidezza dipende dall'indice dei vuoti corrente oltre che dallo stato tensionale, per il limo del Po parzialmente saturo si osserva che il suddetto fenomeno di incrudimento risulta legato alle

variazioni di stato volumetrico, espresse in termini di volume specifico e volume specifico d'acqua.

Pertanto, al fine di inquadrare in maniera sintetica ed efficace i fenomeni osservati appare opportuno fare riferimento a un modello di interpretazione del comportamento volumetrico (cfr. §I.9). A ciò sarà dedicata una sezione del prossimo capitolo V.

IV.5.3 Fattore di smorzamento iniziale, D_o

Ognuna delle fasi di taglio torsionale realizzate (RC o TS) ha consentito di determinare il fattore di smorzamento corrispondente a determinanti stati e storie tensionali nel piano (p- u_a):(u_a - u_w). Particolarmente rilevanti sono i risultati delle fasi di colonna risonante, eseguite praticamente con continuità durante le prove, che mettono in luce l'evoluzione di D_o al variare delle sollecitazioni applicate e dello stato volumetrico.

Le figure IV.47-IV.50 mostrano i valori di D_0 misurati nel corso di fasi di primo carico a suzione costante, valutati con il metodo "half-power" della semibanda di potenza (cfr. §III.5). I risultati sono raggruppati per livello di suzione.

Come per il materiale saturo (v. fig. IV.47) anche per il non saturo la tensione media di confinamento ha un significativo effetto sul fattore di smorzamento, che diminuisce in modo non trascurabile al crescere di (p-u_a). Per effetto dello stato di parziale saturazione, lo smorzamento si riduce: ciò è evidente specie nel passaggio da 0 a 100 kPa di (u_a-u_w): nel primo caso D_o varia tra 4.3% e 2.8% circa, per p' che varia tra 0 e 700 kPa, nel secondo D_o varia tra 3.4% e 2.5% circa (in media), per (p-u_a) appartenente allo stesso intervallo tensionale.

Le differenze tra i risultati relativi a suzioni diverse e non nulle appaiono più contenute, praticamente trascurabili. Tale conclusione è però affetta dall'indecisione che deriva dalla dispersione tra i risultati pertinenti ad uno stesso livello di (u_a-u_w) (v. figg. IV.48-IV.50) che rende meno agevole la lettura dei dati ma consente ad ogni modo la determinazione di un fuso D_0 :(p-u_a).

Analoghe considerazioni valgono per i risultati delle fasi di scarico a suzione costante e per le fasi di wetting e drying a tensione media netta costante: in generale, a suzione compresa tra 100 e 400 kPa, gli effetti di una variazione di (u_a-u_w) sembrano limitati rispetto a quelli di un'uguale variazione di $(p-u_a)$.

IV.5.4 Effetti della velocità di deformazione

Le prove TS isolate, realizzate assieme a prove RC in corrispondenza di determinati punti (cfr. IV.2) dei percorsi tensionali seguiti nel piano (p-u_a):(u_a-u_w), hanno messo in luce una significativa dipendenza del comportamento tensio-deformativo del limo argilloso del Po dalla velocità di deformazione.

La frequenza delle TS è costante e pari a 0.5 Hz, quella delle RC varia tra 43 Hz e 65 Hz circa in funzione dello stato corrente. Pertanto, il campo di velocità di deformazione tangenziale $\dot{\gamma}$ indagato copre all'incirca due cicli logaritmici (tra 10⁻³ e 10⁻¹ %/s), essendo:

$$\dot{\gamma} = 4 \cdot \gamma \cdot f$$

(IV.1)

La figura IV.51 riporta i risultati delle prove mp10RC, mp11RC e mp12RC in corrispondenza della fase di primo carico e di una tensione media netta $(p-u_a) = 200$ kPa. L'effetto della velocità di deformazione sulla rigidezza è non trascurabile: indipendentemente dal livello di suzione, G_o varia di circa 8 MPa per ciclo logaritmico di $\dot{\gamma}$. Per la prova mp11RC, ad esempio, ciò si traduce in un incremento di G_o del 12% passando da sollecitazione quasi-statica a dinamica¹⁴.

Al fine di rappresentare in forma sintetica l'influenza di $\dot{\gamma}$ sulla rigidezza conviene adimensionalizzare ciascun dato rispetto al valore di G_o che competerebbe a parità di stato e storia tensionale nel piano (p-u_a):(u_a-u_w) ad una velocità di deformazione di riferimento. Scegliendo $\dot{\gamma}_{,ref}$ uguale a 0.1% min, la rigidezza di riferimento relativa alla prova mp11RC in figura IV.51 è, ad esempio, di 171 MPa circa.

In figura IV.52 si rappresentano in funzione della velocità di deformazione i valori di rigidezza adimensionalizzata relative alle RC e TS isolate eseguite durante le prove mp10RC, mp11RC e mp12RC. Dall'interpolazione logaritmica dei risultati (Isenhower, 1979) si ottiene $N_{ij} = 5.1\%$, essendo:

$$N_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{G_{\dot{\gamma}, ref}} \frac{G_2 - G_1}{\log \dot{\gamma}_2 - \log \dot{\gamma}_1}$$
(I.25).

¹⁴ A rigore, un'interpretazione degli effetti della velocità di deformazione andrebbe basata su risultati di prove TS realizzate a frequenza diversa piuttosto che dal paragone tra due tipi di prova (RC e TS) che prevedono un diverso criterio di interpretazione. Ad ogni modo, tipicamente i risultati di prove RC, riportati nel piano semilogaritmico G_0 : $\dot{\gamma}$, risultano leggermente al di sopra della linea di tendenza dei risultati di prove TS (cfr. §IV.4). Pertanto, il confronto qui realizzato fornisce una stima per eccesso degli effetti di $\dot{\gamma}$.

IV.5.5 Comportamento a medie deformazioni

In alcune delle prove RCTS a suzione controllata sono state previste fasi di probing della soglia di linearità (cfr. § IV.2) per valutare gli effetti di pressione media netta e suzione sulle curve di decadimento $G:\gamma$.

Dall'insieme dei risultati si deduce una soglia di linearità, valutata in corrispondenza di $G/G_0=95\%$, compresa tra 5·10⁻³% e 8·10⁻³%, per (p-u_a) variabile tra 100 e 500 kPa e (u_a-u_w) variabile tra 50 e 400 kPa.

In seguito ad un aumento di (p-u_a) si osserva un incremento della soglia di linearità γ_L , non trascurabile per il materiale oggetto di sperimentazione. Nell'esempio di figura IV.53, relativo alla prova mp11RC, condotta alla suzione costante di 200 kPa, si osserva come, per (p-u_a) che varia da 100 a 500 kPa in primo carico, γ_L passi da $6 \cdot 10^{-3}$ % a $9 \cdot 10^{-3}$ %. In fase di scarico, la soglia di linearità risulta uguale o leggermente maggiore di quella che compete alla fase di primo carico, a parità di stato tensionale. Risultati analoghi sono stati ottenuti dalle altre prove.

L'effetto della suzione è esemplificato dalla figura IV.54, relativa alle fasi della prova mp08RC condotte a (p-u_a) = 200 kPa e (u_a-u_w) crescente da 50 a 400 kPa. Diversamente dall'effetto della tensione media netta, un aumento di (u_a-u_w) induce una leggera riduzione di γ_L (che passa da 7·10⁻³% a 5·10⁻³% nel caso in esame) pur facendo aumentare il valore assoluto delle rigidezze a taglio. Simili risultati si ottengono paragonando i risultati di fasi di compressione a suzione differente.

Presumibilmente, il comportamento descritto deriva dai diversi effetti che hanno a livello microscopico la pressione media netta e la suzione di matrice nell'acqua di menisco (cfr. § I.4). Essendo il ruolo di (p-u_a) analogo a quello della p' dei terreni saturi, è logico aspettarsi un'estensione del campo di linearità al crescere della tensione media netta per effetto dell'aumento dei punti di contatto intergranulari che consegue alla compressione. Diversamente, l'effetto di "bonding" che deriva dalla presenza dei menischi sembra diventare meno efficace per la permanenza in campo lineare quando la suzione aumenta e quindi le dimensioni medie dei menischi stessi diminuiscono.

IV.6 Conclusioni

A seguito della descrizione dei risultati, sembra opportuno riepilogare in maniera sintetica i principali aspetti del comportamento meccanico osservato.

La risposta a medie e grandi deformazioni del limo argilloso del Po è stata indagata tramite prove triassiali a suzione controllata.

Dalle fasi di equalizzazione si deduce che la suzione media indotta dal costipamento è compresa tra 100 e 200 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.

La suzione ha un effetto "benefico" sul comportamento in fase di compressione. Al crescere di (u_a-u_w) l'indice λ , valutato sulle linee di consolidazione normale, varia da 0.052 nel caso del materiale saturo a 0.043 per $(u_a-u_w) = 400$ kPa. La riduzione di compressibilità risulta non trascurabile anche in scarico-ricarico. In entrambi i casi, non si osserva alcuna tendenza a un valore minimo stabile al crescere della suzione. Inoltre, al crescere di (u_a-u_w) aumenta la pressione apparente di sovraconsolidazione $(p-u_a)_o$, da circa 60 kPa per il materiale saturo fino a circa 180 kPa a suzione 400 kPa.

Le curve tensioni-deformazioni delle prove di taglio consolidate a $(p-u_a)=100$ kPa presentano un picco abbastanza netto intorno al 10% di deformazione assiale. Al crescere della tensione media netta di consolidazione il picco risulta meno evidente o scompare del tutto, inoltre aumentano la rigidezza e la resistenza.

Le deformazioni volumetriche risultano sempre di contrazione, fatta eccezione per la prova relativa ai minimi valori di suzione non nulla e pressione di consolidazione indagati, rispettivamente 50 kPa e 100 kPa.

Al crescere della suzione si verifica un significativo aumento della rigidezza e della resistenza. Per effetto di uno spiccato fenomeno di localizzazione delle deformazioni, specie alle $(p-u_a)$ di consolidazione più basse, non è possibile ottenere punti di stato critico. I dati sperimentali $[(p-u_a), q]$ corrispondenti al valore di picco sono interpolati con buona approssimazione da rette parallele a quella di rottura del materiale saturo.

Tramite prove di colonna risonante e taglio ciclico a suzione controllata è stato studiato il comportamento a piccole deformazioni di due terreni non saturi: la sabbia limosa del

Metramo ed il limo argilloso del Po.

Le misure di rigidezza a taglio iniziale sulla sabbia limosa sembrano confermare alcune caratteristiche messe in luce dalla sperimentazione realizzata sullo stesso materiale da Rampino (1997), in cella triassiale. Così come succede per la compressibilità, anche gli effetti della suzione sulla rigidezza sembrano stabilizzarsi per suzioni maggiori di 200 kPa. Le curve $G_o:(u_a-u_w)$ presentano una forma ad S, interpretata sulla base di considerazioni microscopiche riguardo gli effetti dell'acqua di volume e di menisco. Tale peculiarità è osservata sia sul materiale costipato all'ottimo sia su quello addensato sul lato wet. La differente struttura indotta dal contenuto d'acqua di costipamento incide in modo sostanziale sia sui singoli valori di G_o sia sul suo modo di variare con la suzione.

Le prove realizzate sul limo argilloso del Po hanno consentito di studiare gli effetti della parziale saturazione sia in fase di carico a suzione costante sia in fase di wetting e drying a tensione media netta costante.

Con riferimento al primo aspetto, il comportamento che si osserva in compressione isotropa è del tutto analoga a quello tipico dei terreni saturi. Al crescere di $(p-u_a)$, in primo carico G_o aumenta in modo meno che lineare (anche se "quasi lineare" per il materiale oggetto di prova). In fase di scarico e ricarico la rigidezza assume valori più elevati di quelli misurati nella precedente fase di compressione monotona.

Al crescere di (u_a-u_w) ed a parità di $(p-u_a)$ la rigidezza aumenta in modo significativo. Come per la compressibilità dello stesso materiale e diversamente da quanto osservato per la rigidezza della sabbia limosa del Metramo, l'influenza della suzione non sembra esaurirsi nel campo indagato. Pertanto, ammettendo l'esistenza di un livello di (u_a-u_w) oltre il quale gli effetti dell'acqua di menisco (e quindi della suzione) si stabilizzano, questo deve essere decisamente maggiore di 400 kPa.

Le fasi di wetting e drying mettono ulteriormente in luce la forte dipendenza della rigidezza dalla storia tensionale, oltre che dai valori di $(p-u_a)$ e (u_a-u_w) . Per effetto di variazioni di suzione è possibile che abbia luogo un significativo fenomeno di incrudimento, ossia di aumento di rigidezza, a parità di $(p-u_a)$ e (u_a-u_w) , accompagnato da variazioni irreversibili del volume specifico e del contenuto d'acqua.

In generale, il comportamento osservato in termini di Go appare strettamente legato alle

variazioni di stato volumetrico indotte dai percorsi di carico seguiti. Per meglio interpretare tale fenomeno nonché rappresentarlo in modo più immediato, può risultare vantaggioso approfondire le possibilità di modellazione del comportamento volumetrico del limo argilloso del Po.

Partendo da questa ipotesi, nel successivo capitolo V si inquadreranno i risultati delle fasi di equalizzazione e compressione in cella triassiale e di colonna risonante tramite un modello elasto-plastico per poi ragionare su questa base del legame esistente tra rigidezza, stato e storia tensionale.