



Università degli Studi
di Palermo

EFFETTI DEL PERCORSO DI SOLLECITAZIONE SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DI UN'ARGILLA A SCAGLIE COMPATTATA NON SATURA SOTTOPOSTA A CICLI DI IMBIBIZIONE ED ESSICCAMENTO

C. Airò Farulla^{*}, M. Rosone^{*}

^{*} Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)

Università di Palermo

Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

E-mail: camillo.airofarulla@unipa.it, marco.rosone@unipa.it

(Ricevuto 20 Settembre 2014, Accettato 28 Settembre 2014)

Parole chiave: Argilla compattata, terreni a doppia struttura, suzione controllata, cicli di imbibizione ed essiccamento, modellazione.

Sommario. *Il comportamento di un'argilla compattata sottoposta a cicli di imbibizione ed essiccamento viene analizzato attraverso l'esecuzione di prove edometriche a suzione controllata. I provini sono soggetti a diverse serie di variazione cicliche della suzione precedute da differenti percorsi di carico e scarico a suzione costante, allo scopo di studiare gli effetti del percorso delle sollecitazioni sulle deformazioni volumetriche e sulle variazioni di contenuto d'acqua indotte dalle variazioni cicliche della suzione. I risultati delle prove sono stati simulati con soddisfacente successo attraverso un modello costitutivo elasto-plastico per terreni non saturi, in cui la risposta meccanica globale è dipendente dalle deformazioni della microstruttura, della macrostruttura e dalle loro reciproche interazioni.*

1 INTRODUZIONE

Lo studio del comportamento meccanico delle argille rigonfianti compattate non sature costituisce un tema di grande interesse nel campo dell'Ingegneria Civile e Ambientale, anche in considerazione del loro possibile impiego per l'isolamento di discariche di rifiuti solidi e di siti contaminati. In questo ambito un aspetto molto indagato è quello della valutazione delle deformazioni volumetriche e delle variazioni del grado di saturazione indotte da cicli di imbibizione ed essiccamento, non solo per la valutazione del comportamento delle opere in sito, ma anche perché la risposta alle variazioni cicliche di suzione costituisce una informazione chiave per indagare sui legami costitutivi dei materiali considerati (Alonso et al., 2005). Dai numerosi risultati sperimentali pubblicati emerge che per effetto di variazioni cicliche della suzione le argille, di norma, accumulano deformazioni volumetriche plastiche che possono essere di rigonfiamento o di compressione in funzione della storia dello stato di sollecitazione, dei carichi applicati e della intensità delle variazioni di suzione. Inoltre,

l'accumulo di deformazioni plastiche in seguito a variazione cicliche di suzione può indurre effetti anche sulla rigidità e sulla tensione di preconsolidazione del materiale.

Per spiegare e riprodurre i comportamenti osservati sono stati invocati meccanismi diversi e sono stati elaborati modelli concettuali facenti capo, prevalentemente, a due distinte impostazioni. La prima riconduce il comportamento volumetrico dei materiali all'interazione meccanica tra i differenti livelli di organizzazione della struttura a livello microscopico e, in particolare, all'interazione tra la microstruttura e la macrostruttura (Gens e Alonso, 1992; Alonso et al., 1999; Gens et al., 2006). La seconda chiama in causa gli effetti dell'isteresi idraulica e la dipendenza delle curve di ritenzione dei materiali dallo stato di addensamento (Vaunat et al., 2000; Wheeler et al., 2003).

Con riferimento a questo tema, da diversi anni viene sviluppata presso l'Università degli Studi di Palermo una ricerca sperimentale riguardante l'analisi del comportamento meccanico di un'argilla a scaglie compattata non satura sottoposta, in un edometro a suzione controllata, a percorsi di sollecitazione comprendenti diverse fasi di carico e scarico e cicli di imbibizione ed essiccamento. Nel seguito si analizzano e si discutono gli effetti della storia di carico sulle deformazioni volumetriche e sulle variazioni di contenuto d'acqua indotte dalle variazioni cicliche di suzione.

I risultati delle prove sono interpretati sulla base del quadro di riferimento basato su un modello elasto-plastico per terreni non saturi a doppia struttura in cui la risposta meccanica è messa in relazione alle deformazioni volumetriche della micro, della macrostruttura e della loro interazione reciproca (Alonso et al. 1999). Le capacità del modello sono valutate sulla base delle simulazioni dei risultati delle prove presentate.

2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale è stato sviluppato sottoponendo in edometro a suzione controllata due provini di argilla a scaglie compattata non satura a diversi cicli di imbibizione ed essiccamento, ottenuti facendo variare la suzione di matrice nell'intervallo $s = 10-800$ kPa, a pressione verticale netta, σ_{vnet} , costante, e fasi di carico e scarico a s costante e pari a 800 kPa. I percorsi delle sollecitazioni sono illustrati nei diagrammi di Fig. 1; la condizione iniziale di riferimento è caratterizzata da $\sigma_{vnet} = 50$ kPa e $s = 800$ kPa (punto A).

Il primo provino, il *LC800bis*, è stato sottoposto a tre serie di cicli di wetting e drying: la prima serie è stata eseguita quando, in fase di primo carico, la pressione verticale netta ha raggiunto il valore di 800 kPa; la seconda serie ha avuto inizio dopo una fase di carico fino a $\sigma_{vnet} = 1600$ kPa e scarico a 800 kPa; infine la terza serie è stata eseguita a valle di una fase di ricarico a 1600 kPa e scarico fino a $\sigma_{vnet} = 50$ kPa. In particolare, la serie 1 ha avuto inizio quando il punto B, rappresentativo nel piano ($\sigma_{vnet} - s$) dello stato di sollecitazione agente sul provino, si trova sulla linea di snervamento *LC* (Fig. 1 a); all'inizio della serie 2 il punto B si trova alla sinistra della *LC* (punto C), a modesta distanza da essa; nella serie 3 esso è ancora alla sinistra della *LC* (punto A), ma distanza molto maggiore della precedente.

Il provino *A2050* è stato invece sottoposto a due serie di cicli di wetting e drying: la prima serie è stata eseguita immediatamente dopo la prima fase di equalizzazione alla pressione verticale netta di 50 kPa e suzione imposta al valore di 800 kPa mentre la seconda serie ha avuto inizio dopo una fase di carico fino a $\sigma_{vnet} = 1600$ kPa e scarico nuovamente fino a $\sigma_{vnet} = 50$ kPa.

Il programma sperimentale svolto evidenzia gli effetti del grado di preconsolidazione, $\sigma_{vnet} / \sigma_{v0}$, ove σ_{v0} è la pressione di snervamento valutata sulla *LC* e corrispondente al valore della

suzione applicata (Alonso et al., 1999), sulla risposta del materiale ai cicli di suzione e gli effetti di questi ultimi sulla tensione di preconsolidazione e sulla rigidità dei successivi cicli di carico e scarico. Naturalmente, il grado di preconsolidazione qui considerato è quello che caratterizza il provino all'inizio di ciascuna serie di cicli.

Il controllo della suzione è stato attuato con la tecnica della sovrappressione di aria (Romero, 2001; Airò Farulla & Ferrari, 2005). In considerazione della durata dei tempi di equalizzazione, le variazioni della suzione nell'intervallo 10-800 kPa sono state eseguite con un solo passo di carico. Le differenti fasi ad incrementi, di carico o di suzione, sono state mantenute fino a quando la deformazione volumetrica risultava minore o uguale a 0.1%/giorno a temperatura costante ($T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$). Le variazioni di contenuto d'acqua sono state determinate misurando il flusso d'acqua in entrata ed in uscita per mezzo di una buretta di risoluzione 0.02 cm^3 . Ulteriori particolari della tecnica sperimentale sono stati dettagliatamente illustrati in precedenza (Airò Farulla & Ferrari, 2005, Airò Farulla et al., 2007).

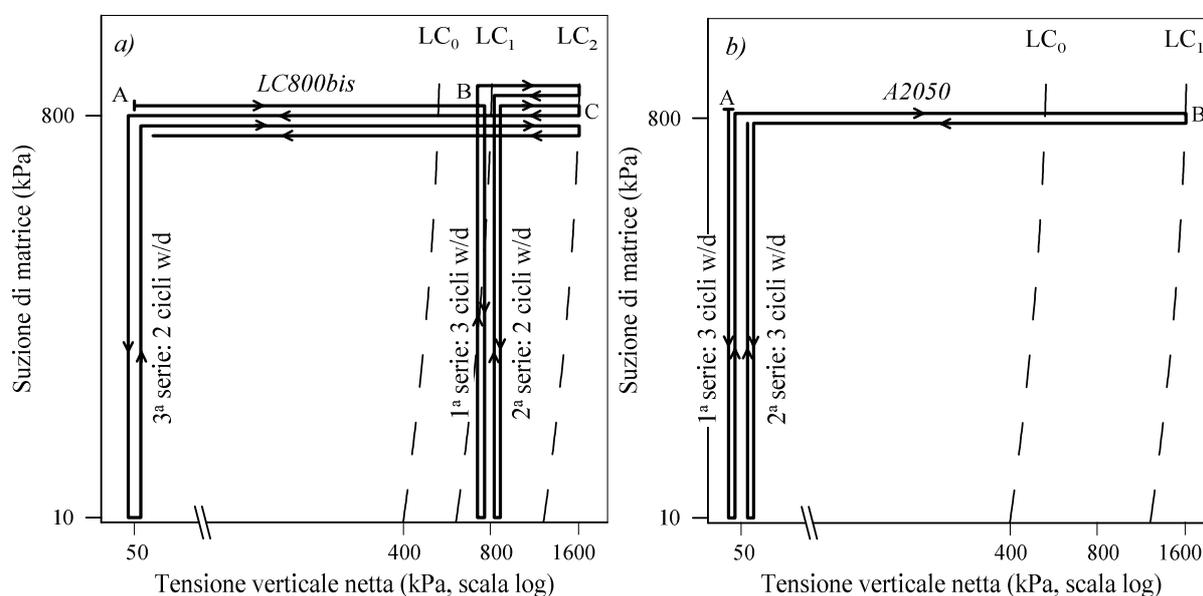


Figura 1: Percorsi di tensione sul piano $\sigma_{net} - s$ dei provini LC800bis (a) e A2050 (b).

Per la sperimentazione è stata impiegata un'argilla a scaglie avente limite di liquidità $w_l = 0.58$, indice di plasticità $I_p = 0.30$, peso specifico dei grani $\gamma_s = 27.27 \text{ kN/m}^3$. Dopo essere stata essiccata all'aria (umidità relativa media $HR = 50\%$ circa, contenuto d'acqua igroscopico $w_h = 0.045$), l'argilla è stata disgregata con un pestello di gomma, utilizzando per la preparazione del provino il passante allo staccio N° 4 ASTM (apertura delle maglie 4.76 mm). Il materiale, dopo essere stato umidificato, è stato compattato staticamente all'interno dell'anello edometrico, ottenendo provini di caratteristiche iniziali: $w_0 = 0.15 \pm 0.02$; peso secco dell'unità di volume $\gamma_{d0} = 17.2 \pm 0.2 \text{ kN/m}^3$; indice di porosità $e_0 = 0.57 \pm 0.1$; grado di saturazione $S_0 = 0.73 \pm 0.1$. La suzione di matrice a fine costipamento è risultata pari a 2 MPa circa (Airò Farulla et al., 2008). A livello microscopico l'argilla presenta una struttura ad aggregati con distribuzione della densità del diametro di ingresso dei pori di tipo bimodale, caratteristica dei materiali a doppia porosità (Airò Farulla & Jommi, 2005; Airò Farulla et al., 2008, Airò Farulla e Rosone, 2012).

3 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati delle diverse serie di cicli di suzione tra $s = 10 - 800$ kPa effettuate sul provino *LC800bis* evidenziano che il comportamento idro-meccanico è fortemente dipendente dalla storia di carico pregressa, dal quale dipendono, fissata l'intensità della pressione verticale netta applicata e della variazione della suzione, il segno delle deformazioni plastiche (di compressione ovvero di rigonfiamento) e l'intensità delle stesse. L'evoluzione delle deformazioni volumetriche per effetto delle variazioni cicliche della suzione, illustrata nei diagrammi di Fig. 2, è caratterizzata dall'accumulo di rilevanti deformazioni plastiche di compressione nella serie 1 e di rigonfiamento nella serie 3. In entrambi i casi le deformazioni plastiche si verificano, per la gran parte, nel primo ciclo, mentre il comportamento tende a diventare reversibile in quelli successivi. Il comportamento nella serie 2 risulta, invece, praticamente reversibile sin dall'inizio. Informazioni più dettagliate possono essere ricavate dai diagrammi di Fig. 3, che rappresentano gli incrementi di deformazione misurati nelle fasi di imbibizione e di essiccamento dei singoli cicli; le deformazioni di compressione sono positive, negative quelle di rigonfiamento.

Nel primo ciclo della serie 1 il provino subisce al ridursi della suzione un evidente collasso, con una deformazione di compressione di poco inferiore al 2%. Una deformazione di ritiro di intensità quasi uguale si manifesta nel successivo essiccamento, per cui complessivamente in questo ciclo il provino accumula una contrazione volumetrica di poco inferiore a 4%. Nel secondo ciclo gli incrementi di deformazione si riducono drasticamente, e sono di segno opposto, ossia di rigonfiamento in imbibizione e di compressione in essiccamento, con piccole differenze nei valori misurati. Tali differenze si riducono ulteriormente nel terzo ciclo con una leggera prevalenza della deformazione di compressione. E', comunque, evidente che il materiale tende verso una condizione di "equilibrio" caratterizzata da deformazioni reversibili (Alonso et al., 1999). Nel caso in esame il valore di "equilibrio" reversibile dell'incremento di deformazione è assunto pari a 0.44% (media dei valori assoluti degli incrementi misurati nell'ultimo ciclo). All'inizio della seconda serie il provino manifesta una deformazione plastica di rigonfiamento di intensità molto piccola (qualche decimo di punto percentuale) e comportamento reversibile nel ciclo successivo, con valore medio degli incrementi misurati di 0.41 %, molto prossimo al precedente.

Infine, con riferimento alla terza serie, nella prima fase di imbibizione il provino rigonfia fortemente con un incremento di deformazione volumetrica di poco inferiore a 5%, solo in parte recuperata nella successiva fase di ritiro caratterizzata da $\Delta\varepsilon_v = 3\%$ circa. Quest'ultimo incremento, in particolare, è praticamente coincidente con quelli misurati nelle diverse fasi dei cicli successivi, per cui si può concludere che in questo caso la condizione di reversibilità è raggiunta già nel primo essiccamento. E' da rilevare, inoltre, che, per effetto della pressione verticale netta applicata (50 kPa), il valore $\Delta\varepsilon_v$ di "equilibrio" in questa serie è più elevato di quelli valutati in precedenza.

L'andamento dell'indice di porosità e con i cicli di suzione, illustrato nei diagrammi di Fig. 4, riflette, ovviamente, l'evoluzione delle deformazioni volumetriche già esaminate. Nella prima serie, a causa del comportamento fortemente contraente del provino, esso si riduce passando dal valore iniziale $e = 0.538$ ai valori 0.480 e 0.472, nelle due fasi del terzo ciclo. Nella seconda serie le variazioni sono piuttosto piccole e comprese tra 0.461 e 0.454. Infine, nella terza serie esso cresce notevolmente passando dal valore iniziale di 0.458 al valore di 0.536 nella prima fase di imbibizione; nelle successive fasi oscilla tra i valori di "equilibrio" 0.535 e 0.492. Questo diagramma, in particolare, illustra in maniera molto efficace la forte espansione volumetrica dell'argilla provocata dalle variazioni della suzione applicate nella terza serie con $\sigma_{vnet} = 50$ kPa.

L'evoluzione del contenuto d'acqua w del provino nelle tre serie di cicli, illustrata nei diagrammi di Fig. 5, è caratterizzata dal fatto che esso aumenta in tutte e tre le serie, indipendentemente dal segno delle deformazioni volumetriche misurate. Gli incrementi di w sono significativi nella prima e terza serie, molto modesti e, tuttavia, ancora apprezzabili nella seconda. Gli aumenti irreversibili di w si verificano quasi esclusivamente nel primo ciclo di suzione e derivano dal fenomeno dell'isteresi idraulica. Per un'analisi di dettaglio dei risultati, nei diagrammi di Fig. 6, si rappresentano i valori degli incrementi Δw in funzione dei cicli per ciascuna serie. Congruentemente con la convenzione sui segni delle deformazioni i volumi di acqua espulsi dal provino (ossia le riduzioni di w) sono considerati positivi e negativi quelli assorbiti (ossia gli aumenti di w). Con riferimento alla serie 1, nel primo ciclo l'incremento di w nella fase di imbibizione è elevato e maggiore (in valore assoluto) della riduzione determinata dal successivo essiccamento, con un aumento di w , per effetto, come già osservato, del fenomeno dell'isteresi idraulica. Dal momento che l'incremento di w avviene in presenza di una forte contrazione volumetrica, si verifica un incremento irreversibile molto elevato del grado di saturazione (Fig. 7). Nei cicli successivi i volumi di acqua scambiati si riducono, con una evidente tendenza ad un comportamento reversibile. In particolare, nel terzo ciclo le variazioni di w risultano, in valore assoluto, pari a 0.010 circa in entrambi le fasi. Poiché in questi cicli le deformazioni volumetriche di contrazione superano, seppure di poco, quelle di rigonfiamento, è possibile osservare nei diagrammi di Fig. 7 un ulteriore moderato incremento di S che raggiunge l'unità nell'ultima fase di imbibizione. Un comportamento del tutto analogo si riscontra nella seconda serie, con il raggiungimento di una condizione reversibile nel secondo ciclo, caratterizzata da un valore di "equilibrio" della variazione di w pari a 0.006. In questa serie, il grado di saturazione, che risulta pari a 1 prima dell'inizio dei cicli, si mantiene costante nelle varie fasi successive (Fig. 7). I volumi d'acqua scambiati si incrementano notevolmente nei cicli della serie 3, in dipendenza della forte espansione della struttura del materiale. In particolare, nel primo ciclo il volume d'acqua assorbito supera quello espulso con un incremento netto del contenuto d'acqua; il grado di saturazione è 1 alla fine della fase di imbibizione. Nei cicli successivi il comportamento diventa perfettamente reversibile con variazioni di contenuto d'acqua pari in valore assoluto a $\Delta w = 0.022$, e variazioni parimenti costanti del grado di saturazione tra 1 e 0.96 (Fig. 7). È opportuno sottolineare il forte aumento di Δw rispetto alle due serie precedenti in conseguenza del valore molto più basso di σ_{vnet} .

In virtù dell'accoppiamento del comportamento idro-meccanico dei terreni non saturi, l'analisi dei risultati del provino A2050, evidenzia come la variazione ciclica di suzione, e le deformazioni plastiche accumulate, influenzino anche la risposta meccanica dei terreni non saturi durante i successivi cicli di carico-scarico.

Le deformazioni volumetriche misurate alla fine di ogni variazione di suzione sono riportate in fig. 8. Durante la prima imbibizione della prima serie, il provino rigonfia con un incremento di deformazione volumetrica di poco inferiore al 3%, recuperata solo in parte nella successiva fase di ritiro caratterizzata da $\Delta \varepsilon_v = 2.5\%$ circa. Le deformazioni durante i cicli successivi sono sostanzialmente coincidenti e pertanto le condizioni di reversibilità vengono raggiunte sin dal primo essiccamento.

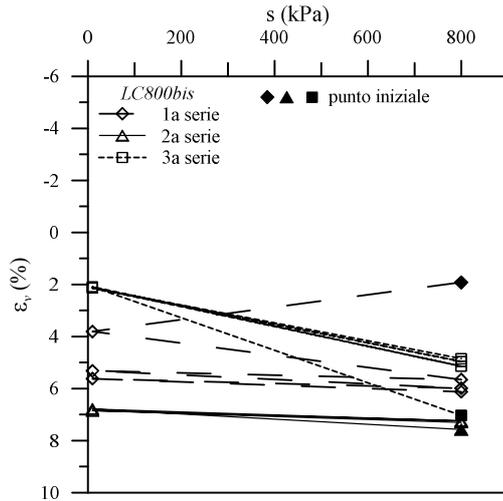


Figura 2: Provino *LC800bis*. Evoluzione delle deformazioni volumetriche durante i cicli.

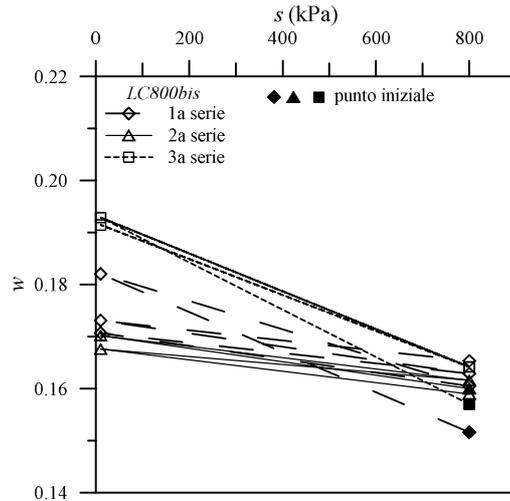


Figura 5: Provino *LC800bis*. Evoluzione del contenuto d'acqua durante i cicli.

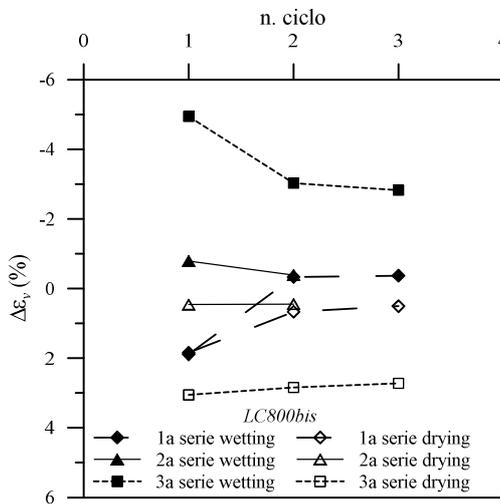


Figura 3: Provino *LC800bis*. Incremento delle deformazioni volumetriche durante i cicli.

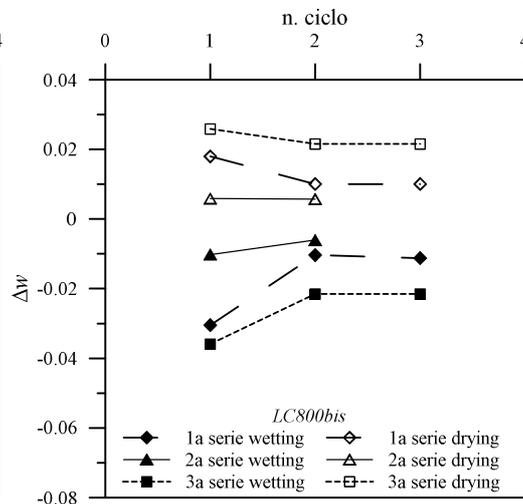


Figura 6: Provino *LC800bis*. Incrementi del contenuto d'acqua in funzione del numero di cicli.

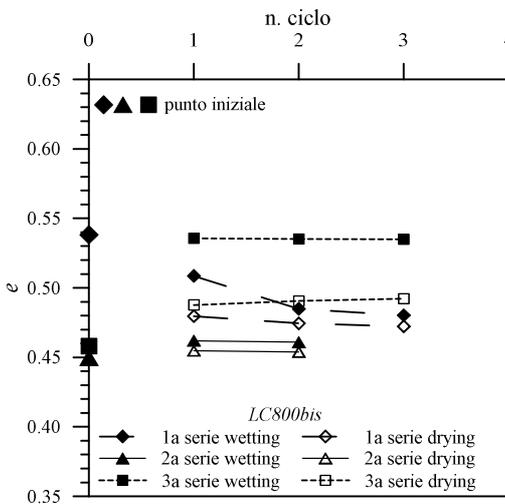


Figura 4: Provino *LC800bis*. Variazione dell'indice di porosità in funzione del numero di cicli.

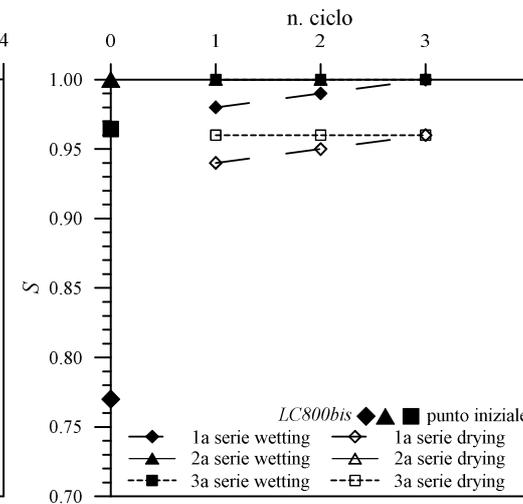


Figura 7: Provino *LC800bis*. Variazione del grado di saturazione in funzione del numero di cicli.

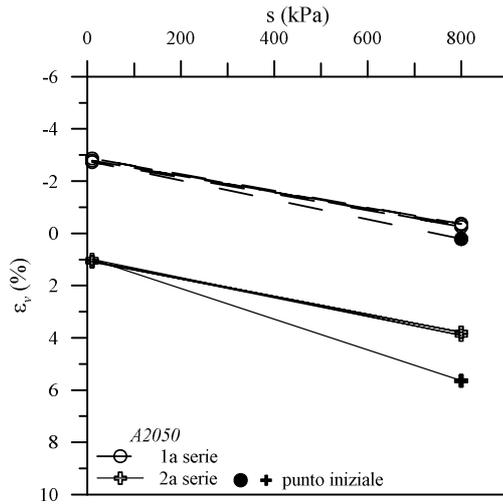


Figura 8: Provino A2050. Evoluzione delle deformazioni volumetriche durante i cicli.

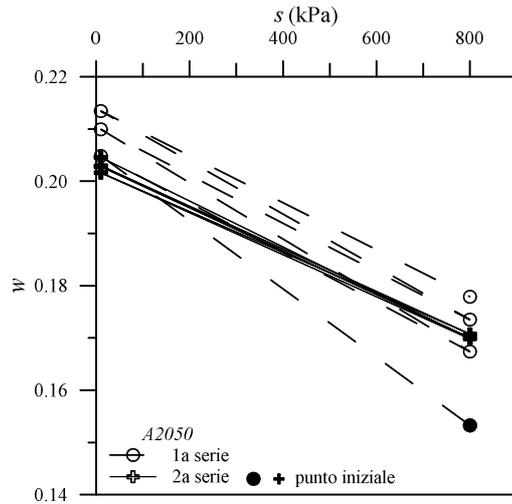


Figura 11: Provino A2050. Evoluzione del contenuto d'acqua durante i cicli.

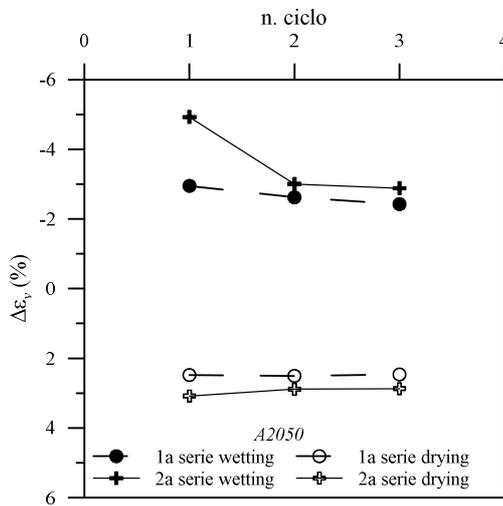


Figura 9: Provino A2050. Incremento delle deformazioni volumetriche durante i cicli.

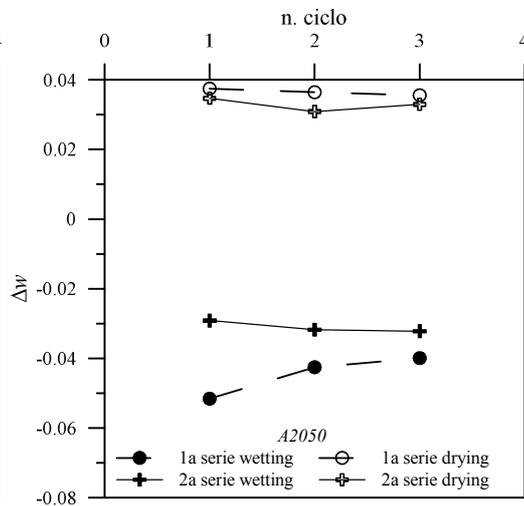


Figura 12: Provino A2050. Incrementi del contenuto d'acqua in funzione del numero di cicli.

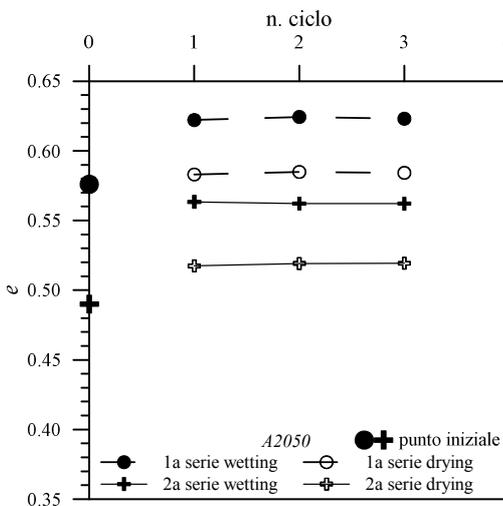


Figura 10: Provino LC800bis. Variazione dell'indice di porosità in funzione del numero di cicli.

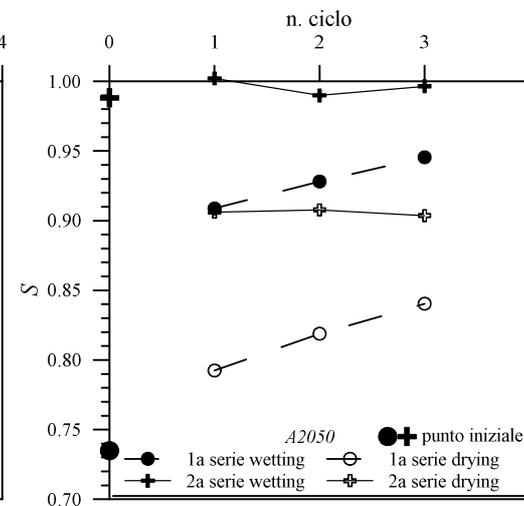


Figura 13: Provino LC800bis. Variazione del grado di saturazione durante i cicli.

Come mostrato in fig. 9, le variazioni di deformazione volumetrica $\Delta\varepsilon_v$, misurate durante la seconda serie sono in valore assoluto maggiori di quelle della prima serie. Inoltre, dal confronto con la fig. 3, si osserva che le $\Delta\varepsilon_v$ misurate durante la seconda serie di cicli del provino *A2050* e la terza serie di cicli del provino *LC800bis* sono praticamente coincidenti, nonostante gli indici di porosità dei due provini all'inizio e durante i cicli considerati siano piuttosto diversi (confronto tra fig. 4 e fig. 10). L'analogia di comportamento tra i due provini, nelle serie considerate, può essere ricondotta al forte grado di preconsolidazione generato nel caso del provino *A2050* dal processo di carico effettuato prima dei cicli di suzione e nel caso del provino *LC800bis* dal precedente collasso macrostrutturale indotto dall'imbibizione a tensione verticale netta elevata.

Come si osserva dalla fig. 10, l'indice di porosità del provino *A2050* oscilla tra i valori di equilibrio $e = 0.584$ e 0.623 durante la prima serie, mentre durante la seconda serie esso varia tra 0.519 e 0.562 . Il minore addensamento all'inizio dei cicli di suzione influenza anche l'evoluzione del contenuto d'acqua del provino per effetto della variazione di suzione: la fig. 11, evidenzia che nelle fasi di imbibizione si raggiungono contenuti d'acqua più elevati rispetto al provino *LC800bis* sia durante la prima, pari a $w = 0.213$, che durante la seconda serie di cicli, pari a $w = 0.205$. Nonostante in termini volumetrici si raggiunga quasi subito la condizione stazionaria, i volumi d'acqua scambiati durante le fasi di imbibizione della prima serie aumentano, seppur in maniera via via meno marcata, con il progredire dei cicli, mentre per effetto dell'isteresi idraulica i volumi scambiati in fase di essiccamento sono sempre inferiori e sostanzialmente costanti ($\Delta w = 0.036$). Durante la seconda serie, il comportamento è reversibile fin dal primo ciclo: le variazioni di contenuto d'acqua durante la fase di imbibizione risultano leggermente più contenute, $\Delta w = 0.032$, mentre in fase di essiccamento le variazioni di contenuto d'acqua sono abbastanza simili a quelle misurate durante la prima serie. Infine, dalla fig. 13 si osserva che durante la prima serie, sia in fase di wetting che in fase di drying, il grado di saturazione tende ad aumentare con il progredire del numero dei cicli, nonostante i rispettivi indici di porosità rimangano sostanzialmente costanti. Il comportamento totalmente reversibile osservato durante la seconda serie comporta che il grado di saturazione oscilli costantemente tra i valori di 1.00 e 0.91 , rispettivamente durante le fasi di imbibizione ed essiccamento.

Per evidenziare le variazioni di indice di porosità durante i cicli di carico-scarico, vengono riportati nelle figg. 14a e 15a i risultati delle prove sul piano $\sigma_{vnet} - e$. Nello stesso diagramma vengono anche riportati, per confronto, i risultati ottenuti dal provino *LC2-1*, avente le stesse caratteristiche iniziali, sottoposto ad un solo ciclo di carico e scarico a $s = 800$ kPa. Nelle figg. 14b e 15b si riportano invece i relativi gradi di saturazione S in funzione della tensione verticale netta applicata. Per effetto della serie iniziale di cicli di suzione, la curva edometrica del provino *A2050* inizialmente si dispone al di sopra della curva del provino *LC2-1* mentre per tensioni verticali nette maggiori di 800 kPa le due curve sostanzialmente si sovrappongono avendo una differenza tra i rispettivi indici di porosità di $\Delta e = 0.004$. La rigidità in questo tratto ($\sigma_{vnet} = 800 - 1600$ kPa) è caratterizzata da $\lambda = \Delta e / D \ln s'_{vnet} = 0.089$. La tensione di preconsolidazione si riduce leggermente, passando dai 570 kPa per il provino *LC2-1* ai circa 520 kPa del provino *A2050*. Per effetto del forte collasso subito durante la prima serie di cicli di suzione, la macrostruttura del provino *LC800bis* diventa molto più stabile e nella successiva fase di carico tra $\sigma_{vnet} = 800 - 1600$ kPa il provino è molto meno deformabile ($\lambda = 0.039$). Dopo il successivo ciclo di suzione, che determina un accumulo di ridotte deformazioni di rigonfiamento, il provino assume un comportamento ancora più rigido in quanto esso probabilmente si trova in campo elastico ($\lambda = 0.022$). Dopo

il terzo ciclo, che determina un accumulo di deformazioni negative più elevate, l'indice di compressione ritorna ad aumentare ($\lambda = 0.036$), evidenziando così una maggiore vicinanza al dominio di snervamento. Comunque, in linea generale, in tutti i cicli di carico eseguiti sul provino *LC800bis* non risulta evidente lo snervamento della macrostruttura e soprattutto il chiaro raggiungimento della retta vergine. Durante le fasi di carico, i volumi di acqua scambiati sono notevolmente inferiori rispetto a quelli scambiati durante i cicli di suzione. Pertanto, si osserva che il grado di saturazione aumenta solamente quando il provino subisce elevate deformazioni volumetriche per effetto dei fenomeni di collasso della macrostruttura mentre esso rimane sostanzialmente costante durante le fasi elastiche di carico-scarico.

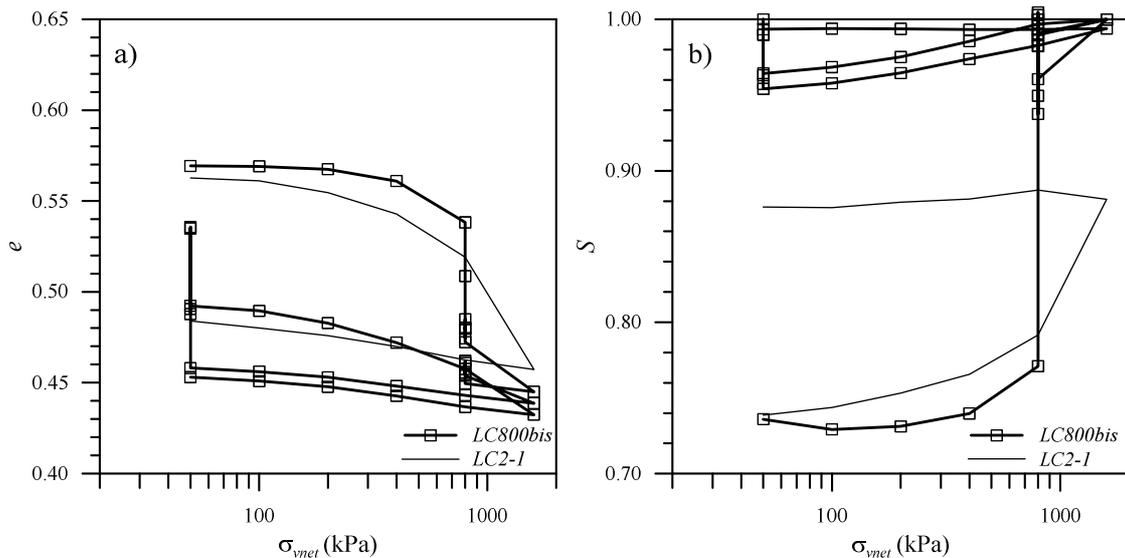


Figura 14: Risultati delle prove *LC800bis* e *LC2-1* sul piano $\sigma_{vnet} - e$ (a) e sul piano $\sigma_{vnet} - S$ (b).

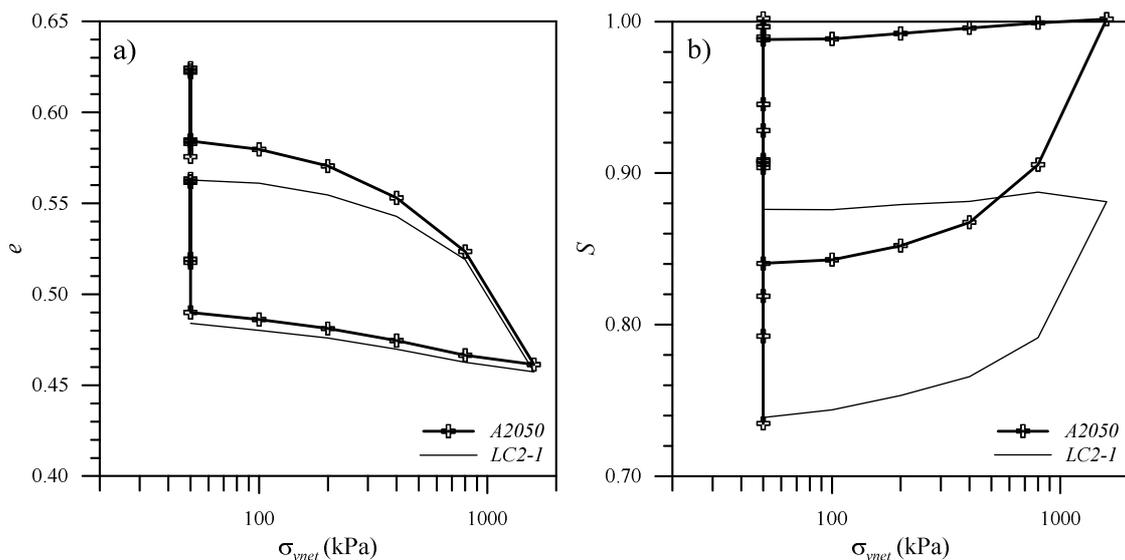


Figura 15: Risultati delle prova *A2050* e *LC2-1* sul piano $\sigma_{vnet} - e$ (a) e sul piano $\sigma_{vnet} - S$ (b).

4 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

Il comportamento volumetrico dell'argilla compattata non satura è fortemente dipendente dal grado di preconsolidazione, dal quale dipendono, fissata l'intensità della pressione verticale netta applicata e della variazione della suzione, il segno delle deformazioni plastiche (di compressione ovvero di rigonfiamento) e l'intensità delle stesse. Gli effetti irreversibili indotte dalle variazioni della suzione si attenuano fortemente dopo il primo ciclo e rapidamente il materiale tende verso una condizione di "equilibrio", caratterizzata dalla reversibilità delle deformazioni nei cicli di suzione. In questa condizione l'intensità degli incrementi delle deformazioni dipende, per dato valore della variazione di s , dalla pressione verticale netta agente.

Sulla base delle caratteristiche strutturali dell'argilla considerata, l'andamento delle deformazioni osservate può essere interpretato con riferimento ai diversi meccanismi che controllano la risposta volumetrica dei materiali a doppia porosità, considerando quindi le interazioni tra la microstruttura e la macrostruttura (Alonso et al., 1999). I meccanismi di interazione che si instaurano, in funzione delle condizioni al contorno imposte durante la prove, possono essere molto diversi tra loro e controllano la risposta globale dell'argilla compattata. Ad esempio, il collasso osservato nella prima fase di imbibizione della serie 1 del provino *LC800bis* è da ricondurre allo scorrimento mutuo degli aggregati per la riduzione della resistenza a taglio lungo le areole di contatto determinata dalla scomparsa dei menischi e del loro effetto stabilizzante. Al contrario, nella prima imbibizione della terza serie dello stesso provino, per effetto del forte addensamento della macrostruttura, in relazione ai valori di Δs e σ_{vnet} applicati e alla storia di carico precedente, il rigonfiamento degli aggregati determina l'espansione globale del volume del provino.

Le deformazioni nelle condizioni di reversibilità vanno ricondotte all'espansione e al ritiro elastico degli aggregati in presenza di un assetto della macrostruttura resa stabile dalle deformazioni plastiche accumulate nei cicli precedenti (Ferrari et al., 2009).

Le evoluzioni del contenuto d'acqua e del grado di saturazione al variare della suzione sono determinate dall'azione concorrente dei meccanismi che regolano l'assorbimento e l'espulsione dell'acqua contenuta nei macropori e le deformazioni volumetriche indotte (Romero & Vaunat, 2000). In particolare, gli incrementi di w seguono, qualitativamente, un andamento simile a quello delle deformazioni volumetriche con variazioni irreversibili nei primi cicli e reversibili in quelli successivi. Le variazioni irreversibili, anche se di intensità diversa, sono tutte dello stesso segno, risolvendosi, per effetto del fenomeno dell'isteresi idraulica, in un aumento del contenuto d'acqua del materiale. Nella condizione reversibile sia i valori degli incrementi delle deformazioni volumetriche e sia quelli del contenuto d'acqua rimangono, nell'ambito di ciascuna serie, costanti (o variano poco) per cui anche i valori di S rimangono costanti o presentano moderate variazioni

4 SIMULAZIONE DEI RISULTATI

Nelle argille a scaglie compattate coesistono diversi livelli di organizzazione strutturale, per cui è fondamentale distinguere tra la microstruttura dove avvengono i fenomeni alla scala delle singole particelle argillose e la macrostruttura dove avvengono le interazioni tra gli aggregati e gli assemblaggi di particelle (scaglie). A livello della microstruttura si possono riconoscere due tipi di raggruppamenti elementari di particelle argillose (EPA): uno costituito dalle particelle iso-orientate e fortemente addensate all'interno delle scaglie e l'altro, di tipo flocculato, dagli assemblaggi che si sono costituiti durante la compattazione. La distribuzione

dei diametri caratteristici dei pori è bimodale con un picco che ricade nella zona dei macropori e un secondo picco nella zona dei micropori. Quindi, la compattazione delle argille a scaglie non altera la microstruttura delle scaglie ma crea un nuovo sistema di macropori interaggregato, che dipende fortemente dai percorsi di sollecitazione applicati e dallo stato di addensamento (Airò & Rosone, 2012).

Il modello Barcelona Expansive Model (*BExM*, Alonso et al. 1999) viene usato per simulare il comportamento delle argille compattate rigonfianti durante i cicli di suzione, considerando la risposta volumetrica dipendente dalla risposta della micro, della macrostruttura e dalla loro interazione.

Il modello, al fine di semplificare la determinazione dei parametri, si basa su alcune ipotesi: nel caso di condizioni edometriche le equazioni costitutive sono definite in termini di tensione verticale netta; il comportamento della microstruttura è di tipo volumetrico ed elastico e vengono trascurate le deformazioni elastiche macrostrutturali; esiste un equilibrio meccanico, idraulico, chimico e termico tra la micro e la macro struttura; le deformazioni microstrutturali inducono deformazioni plastiche della macrostruttura, modificando pertanto la forma e la posizione della linea di snervamento "Loading Collapse" (*LC*).

Il modello si basa quindi sulla separazione delle due componenti di deformazione dovute ai due livelli strutturali e l'incremento della deformazione volumetrica è definito come:

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^m + \dot{\epsilon}_v^M$$

dove $\dot{\epsilon}_v^m$ è l'incremento di deformazione volumetrica della micro e $\dot{\epsilon}_v^M$ è l'incremento di deformazione plastica accoppiata della macro.

La microstruttura nel campo di suzione studiato rimane satura, come osservato sulla base delle curve di ritenzione determinate per un ampio campo di valori dell'indice di porosità (Airò Farulla et al., 2010). Difatti, durante tutte le prove presentate nella memoria il contenuto d'acqua è sempre maggiore del contenuto d'acqua microstrutturale che delimita il campo al di sopra del quale la microstruttura rimane satura. Ne segue che le variazioni di suzione a livello microstrutturale sono equivalenti alla variazione delle tensioni efficaci.

L'incremento di deformazione microstrutturale può essere calcolato sulla base della seguente relazione:

$$\dot{\epsilon}_v^m = \frac{k_m}{1 + e_m} \frac{\dot{\sigma}_v'}{\sigma_v'}$$

dove k_m è la compressibilità della microstruttura, σ_v' è la tensione verticale efficace, e_m è l'indice di porosità microstrutturale, assunto inizialmente pari a 0.30 (Ferrari et al., 2009). Per k_m è stato stimato un valore costante pari a 0.012 attraverso l'esecuzione di prove a diverse tensioni verticali (Airò Farulla et al. 2007).

L'incremento di deformazione macrostrutturale viene calcolato in funzione dell'incremento di deformazione elastica microscopica attraverso le funzioni di accoppiamento f_i (quando la microstruttura si ritira) e f_d (quando la microstruttura rigonfia) (Alonso et al. 1999):

$$\dot{\epsilon}_v^M = f_i \cdot \dot{\epsilon}_v^m \quad , \quad \dot{\epsilon}_v^M = f_d \cdot \dot{\epsilon}_v^m$$

Le funzioni di accoppiamento dipendono dal rapporto tra σ_v/σ_{v0} , dove σ_{v0} è la tensione di snervamento al valore corrente di suzione letta sulla *LC* mentre σ_v è la tensione verticale netta applicata.

In accordo con le ipotesi del modello, le deformazioni plastiche accoppiate inducono fenomeni di *incrudimento* o *rammollimento* sulla macrostruttura, indotti dalla variazione della forma e della posizione della curva che rispondono alla validità della seguente legge di

incrudimento:

$$\frac{\dot{\sigma}_{v0}^*}{\sigma_{v0}^*} = \frac{1 + e_M}{(\lambda_{(0)} - k)} \dot{\varepsilon}_v^M$$

dove e_M è l'indice di porosità della macro, calcolato come differenza tra l'indice di porosità totale e l'indice di porosità microstrutturale, σ_{v0}^* è la tensione verticale efficace di snervamento condizioni di completa saturazione, $\lambda_{(0)}$ è la pendenza della retta vergine (riferita alle condizioni di saturazione) e k è la pendenza della linea di scarico-ricarico.

L'andamento bilineare delle due funzioni di accoppiamento, riportate in figura 16, è stato ottenuto minimizzando la differenza tra gli incrementi totali delle deformazioni volumetriche misurati e calcolati per effetto delle variazioni di suzione nelle prove riportate in Ferrari et al. 2009.

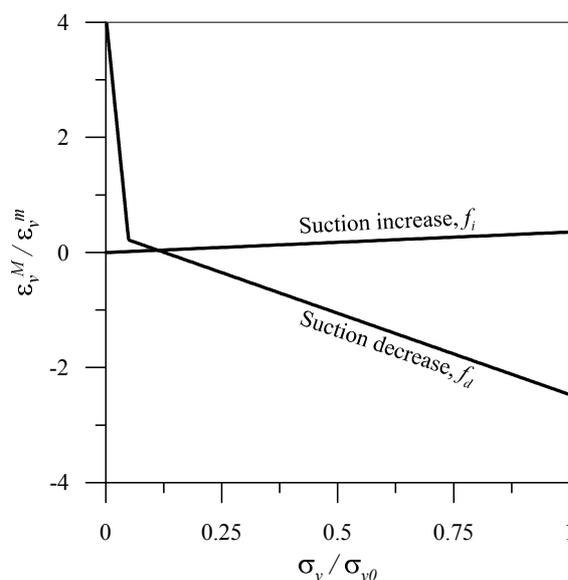


Figura 16: Funzioni di accoppiamento usate nelle simulazioni.

In fase di carico-scarico, così come nel primo wetting della prima serie di cicli di suzione del provino *LC800bis*, il calcolo delle deformazioni plastiche è stato eseguito in accordo a quanto previsto dal modello Barcelona Basic Model (Alonso et al., 1990). Tale affermazione è dovuta al fatto che la mobilitazione della *LC* avviene ad opera delle deformazioni plastiche della macro. In questo caso questa deformazione non è la conseguenza delle deformazioni della micro, e viene quindi governata dai principi propri di *BBM*.

Dal confronto tra i risultati sperimentali e il risultato delle simulazioni, riportato in fig. 17 per quanto concerne il provino *A2050* ed in fig. 20 per quanto concerne il provino *LC800bis*, si osserva un soddisfacente accordo. In particolare, per quanto riguarda il provino *A2050*, il modello riproduce in maniera ottimale sia il comportamento praticamente reversibile durante il primo ciclo di suzione che l'accumulo di deformazioni di rigonfiamento generato durante la seconda serie di cicli di suzione. Dalla figura 18, dove viene riportato il confronto tra il valore assoluto delle deformazioni volumetriche misurate e calcolate per ogni ciclo, si osserva che il modello sottostima leggermente il rigonfiamento che si verifica in seguito alla prima riduzione di suzione di entrambe le serie.

La simulazione del provino *LC800bis* evidenzia come il modello interpreti bene anche il collasso che si verifica durante la prima serie di cicli di suzione, anche se si osserva una maggiore deformazione assoluta durante la fase di essiccamento rispetto a quella prevista dal

modello (fig. 21). Per tale motivo, durante la seconda serie di cicli del provino *LC800bis*, il modello evidenzia un leggero accumulo di deformazioni di compressione ($\varepsilon_v = 1.4\%$) contro un leggero rigonfiamento misurato sperimentalmente ($\varepsilon_v = -0.3\%$). Nel caso della III serie del provino *LC800bis*, quando il provino è fortemente preconsolidato, la simulazione della deformazione di rigonfiamento durante la prima imbibizione è più che soddisfacente: la deformazione volumetrica simulata in valore assoluto è $\varepsilon_v = 5.5\%$ mentre la deformazione sperimentale in valore assoluto è pari a $\varepsilon_v = 5.3\%$.

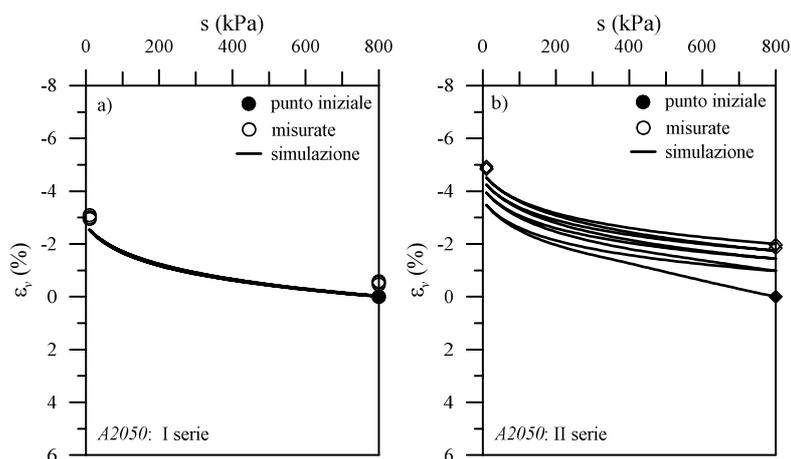


Figura 17: Deformazioni volumetriche misurate e modellate in funzione della suzione per la I serie (a) e la II serie (b) di cicli di suzione del provino A2050.

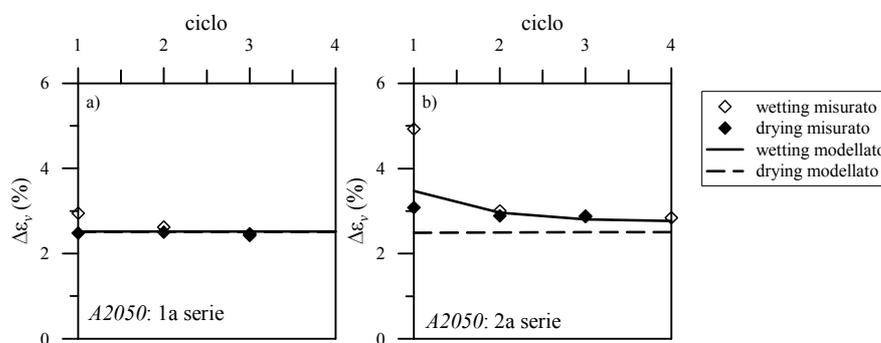


Figura 18: Variazione delle deformazioni volumetriche (in valore assoluto) misurate e calcolate per la I serie (a) e la II serie (b) di cicli di suzione del provino A2050.

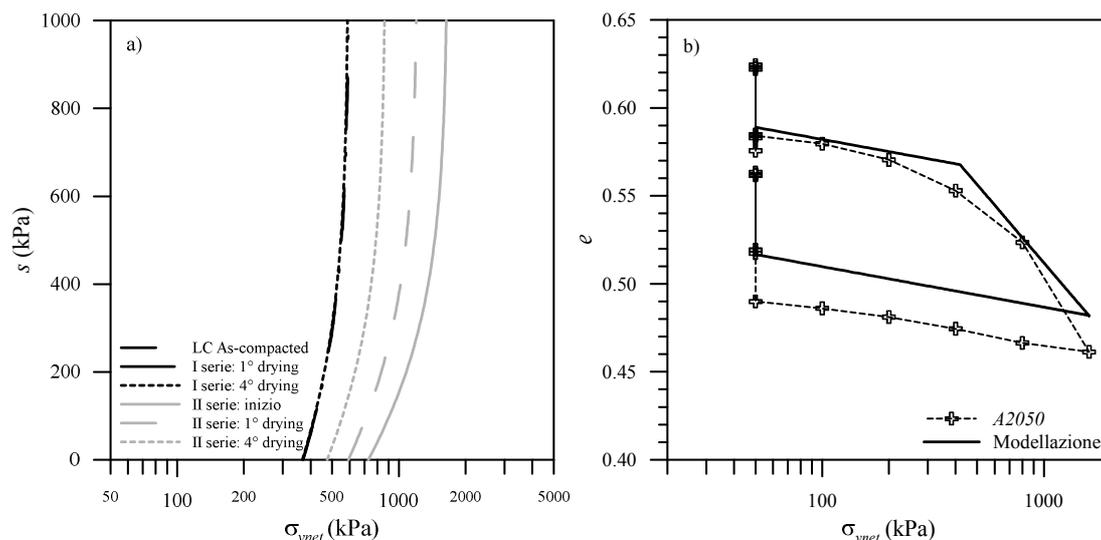


Figura 19: Provino A2050: andamento della linea di snervamento LC (a) e dell'indice di porosità in funzione della tensione verticale netta (b).

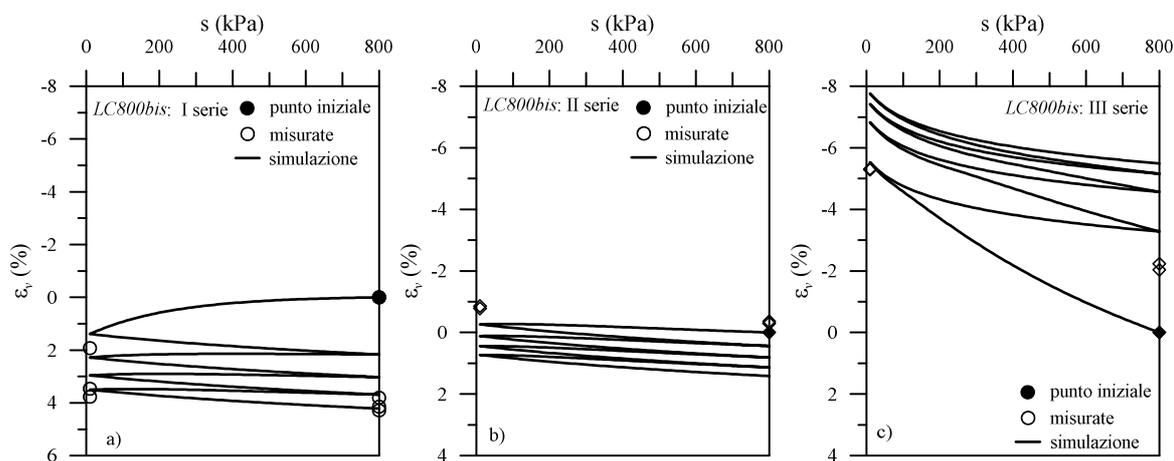


Figura 20: Deformazioni volumetriche misurate e modellate in funzione della suzione per la I serie (a), la II serie (b) e la III serie (c) di cicli di suzione del provino LC800bis.

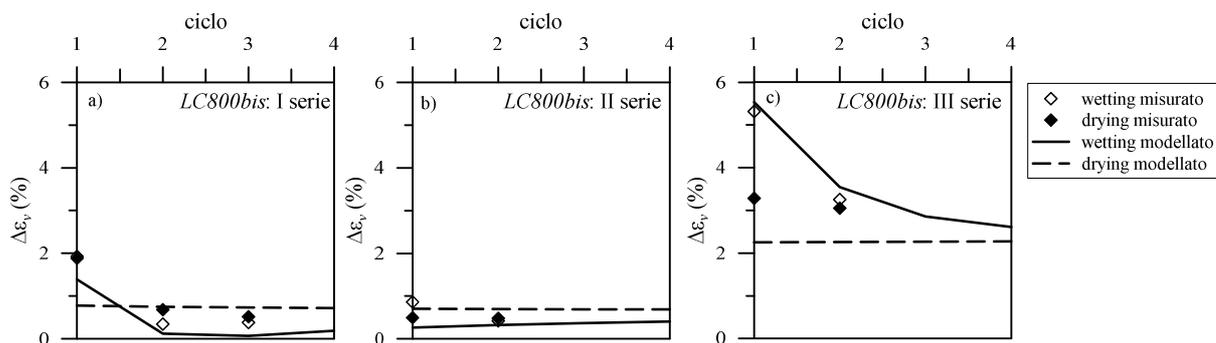


Figura 21: Variazione delle deformazioni volumetriche (in valore assoluto) misurate e calcolate per la I serie (a), la II serie (b) e la III serie (c) di cicli di suzione del provino LC800bis.

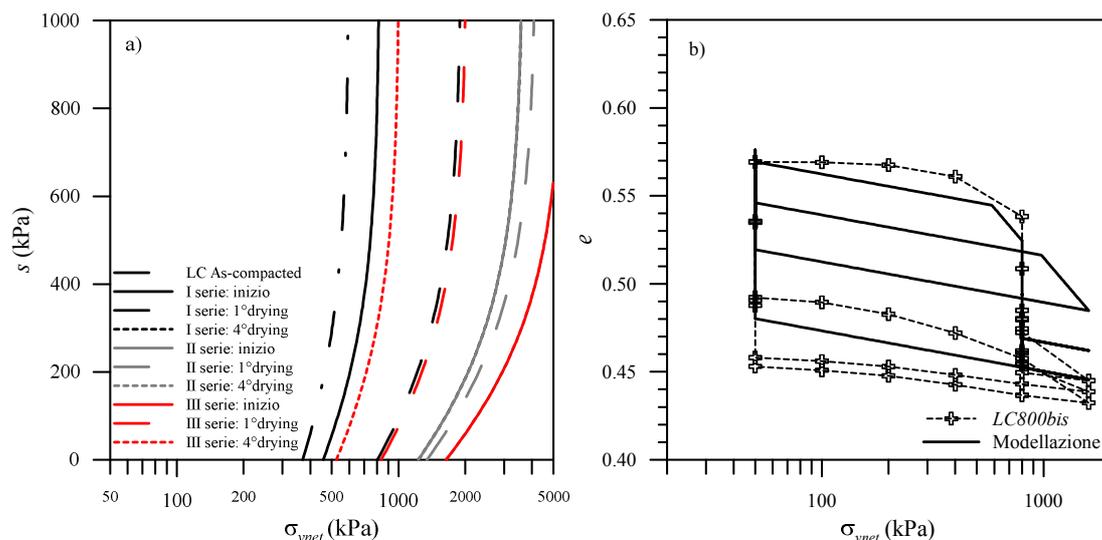


Figura 22: Provino *LC800bis*: andamento della linea di snervamento *LC* (a) e dell'indice di porosità in funzione della tensione verticale netta (b).

Ad ogni modo, il modello previsionale interpreta molto bene le condizioni di equilibrio che si raggiungono con il progredire dei cicli, anche se rispetto all'evidenza sperimentale esso necessita di più cicli, almeno quattro, per raggiungere le condizioni di completa reversibilità (figg. 18 e 21). Un esempio molto evidente può essere rappresentato dalla seconda serie di cicli di suzione del provino A2050 dove sperimentalmente le condizioni di reversibilità sono raggiunte già al primo essiccamento mentre il modello raggiunge l'equilibrio solo al quarto essiccamento. In corrispondenza della condizione finale, le deformazioni volumetriche accumulate con i cicli sono però praticamente coincidenti ($\Delta\varepsilon_v = 0.03\%$).

Le deformazioni plastiche accoppiate della macrostruttura indotte dalle variazioni cicliche di suzione, in accordo con la legge di incrudimento presentata in precedenza, inducono la variazione della forma e della posizione della curva di snervamento Loading Collapse. Utilizzando la tensione di preconsolidazione a suzione nulla, σ_{v0}^* , il parametro di fitting della *LC* σ_c e la relativa equazione della *LC*, vengono rappresentate nelle figg. 19a e 22a le curve *LC* ottenute dalle simulazione numeriche. Per semplicità di lettura vengono rappresentate le condizioni iniziali as-compacted e le curve corrispondenti al primo e all'ultimo processo di essiccamento per ciascuna serie. È interessante osservare che la prima serie di cicli del provino A2050 non induce sostanziali variazioni della *LC* in quanto non vi sono sensibili deformazioni plastiche accoppiate. La successiva fase di carico trascina la *LC* verso destra fino a raggiungere la tensione massima applicata in corrispondenza di $s = 800$ kPa mentre il rigonfiamento accumulato durante la seconda serie di cicli di suzione induce un graduale spostamento verso sinistra della curva di snervamento. Per effetto di queste variazioni della linea di snervamento, in figura 19b vengono riportati sul piano $\sigma_{vnet}-e$ i risultati ottenuti mediante simulazione numerica. La fase di carico-scarico intermedia tra i due cicli di suzione viene modellata in maniera soddisfacente, anche se per elevate tensione nette si osserva una maggiore pendenza della retta per effetto dell'elevato grado di saturazione raggiunto a causa dell'isteresi idraulica legata alla prima fase di imbibizione. Inoltre, è doveroso osservare che al massimo livello di carico il provino raggiunge la completa saturazione.

Dalle simulazione del comportamento del provino *LC800bis* si osserva che oltre alla prima fase di carico (*A-B* nella figura 1a) che induce uno snervamento (fig. 22b) e una conseguente traslazione verso destra della *LC*, anche i primi due cicli di suzione inducono un incrudimento

del materiale che comporta un notevole aumento della tensione di preconsolidazione ($\sigma_{v0} = 5300$ kPa). Quindi si può osservare che il modello riproduce bene l'incremento di deformazioni di rigonfiamento con l'aumentare del grado di preconsolidazione, anche se ciò comporta una sovrastima delle deformazioni quando il grado di preconsolidazione cresce notevolmente, come nel caso della terza serie di tale provino

Sia il secondo (*B-C*) che il terzo (*B-C-A*) ciclo di carico-scarico si sviluppano interamente in campo elastico e pertanto, come mostrato in fig. 22a la curva del quarto drying del primo ciclo coincide con la curva iniziale del secondo ciclo e la curva del quarto drying del secondo ciclo coincide con la curva iniziale del terzo ciclo. Il forte rigonfiamento dell'ultima serie invece riporta verso sinistra la curva *LC* e la tensione di preconsolidazione letta sulla *LC* in corrispondenza di $s = 800$ kPa è pari a $\sigma_{v0} = 980$ kPa. In figura 22b si osserva come le fasi di carico-scarico siano simulate in maniera soddisfacente a parte una leggera differenza nell'indice di porosità dell'ultima fase di carico scarico, causata da una sovrastima delle deformazioni di rigonfiamento indotte dall'ultima serie di wetting e drying.

5 CONCLUSIONI

L'evidenza sperimentale documentata nella memoria su provini di argilla a scaglie compattata non satura soggetti a cicli di imbibizione ed essiccamento ha mostrato una forte dipendenza della risposta volumetrica dai percorsi di sollecitazione applicato prima della variazione ciclica di suzione. L'argilla ha mostrato durante le prove eseguite un comportamento completamente reversibile o un accumulo di deformazioni plastiche (di compressione o di rigonfiamento) in funzione della tensione verticale netta applicata e del grado di preconsolidazione indotto dal percorso di tensione applicato. In ogni caso, il comportamento reversibile viene raggiunto dopo pochi cicli di suzione. Le corrispondenti variazioni del contenuto d'acqua sono governate invece dal fenomeno dell'isteresi idraulica.

Il comportamento sperimentale osservato è stato interpretato considerando che il materiale è un tipico materiale a doppia struttura (Ferrati et al., 2009; Airò & Rosone, 2012). I risultati delle simulazioni numeriche, effettuate applicando il modello *BExM*, sono stati soddisfacenti.

La modellazione ha interpretato con successo sia il forte rigonfiamento indotto dall'elevato grado di preconsolidazione che il collasso strutturale indotto dall'imbibizione ad elevata tensione verticale netta. L'elevato grado di preconsolidazione è stato indotto sull'argilla compattata sia attraverso intesi processi di carico e scarico a suzione costante che attraverso deformazioni plastiche della macrostruttura accoppiate indotte dalle variazioni cicliche di suzione a tensione verticale netta costante. Le funzioni di accoppiamento, che rappresentano l'interazione meccanica tra i livello micro e macro strutturali, sono state ottenute minimizzando la differenza tra gli incrementi totali delle deformazioni volumetriche misurati e calcolati in conseguenza delle variazioni di suzione delle prove riportate in Ferrari et al. (2009).

Il modello riproduce bene diverse caratteristiche del comportamento meccanico delle argille compattate quali ad esempio l'incremento di deformazioni di rigonfiamento con l'aumentare del grado di preconsolidazione. In generale, il modello richiede molti più cicli per raggiungere la completa reversibilità in termini di risposta volumetrica ai cicli di suzione. Tale differenza potrebbe essere legata ad altre aliquote di deformazioni macrostrutturali plastiche che non vengono considerate nel modello.

BIBLIOGRAFIA

- Airò Farulla, C. 2008. *Stress path dependence of hydromechanical behaviour of compacted scaly clay in wetting and drying suction controlled oedometer tests at constant vertical net stress*. In Toll et al. (eds) *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*: 321–326 Taylor&Francis Group, London.
- Airò Farulla C., Jommi C. 2005. *Suction controlled wetting-drying cycles on a compacted scaly clay*. Proc. Int. Conf. on Problematic Soils. Edited by H. Bilsen and Z. Nalbatoglu. Eastern Mediterranean University, Famagusta, N. Cyprus. 25-27 May 2005, Vol.1, pp. 229-238.
- Airò Farulla, C., Ferrari, A. and Romero, E. 2007. *Deformability of compacted tectonised scaly clay in controlled suction oedometer tests*. In Third Asian Conference on Unsaturated Soils: 21–23 April 2007, Nanjing, China.
- Airò Farulla, C. & Rosone, M. 2012. *Microstructure characteristics of unsaturated compacted scaly clay*. In “Unsaturated Soils: Research and Applications 2012, Part 2, 123-130, DOI: 10.1007/978-3-642-31116-1_16, “Proc. of 2nd European Conference on Unsaturated Soils, E-UNSAT 2012”, Napoli, Italy, 20-22 June 2012, Springer Heidelberg New York Dordrecht London. ISBN: 978-3-642-31115-4.
- Alonso, E.E. & Vaunat, J. 2001. *An appraisal of structure level interactions in expansive soils*. In 3rd International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering. Edited by Fernandes et al. Oporto, Portugal. Sep 02–04. Balkema Publishers, pp. 17–30.
- Airò Farulla C., Ferrari A., Romero E. 2008. *Volume change behaviour of a compacted scaly clay during suction changes*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 47, p. 688-703, 2010.
- Alonso, E.E., Vaunat, J. and Gens, A. 1999. *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*. Engineering Geology, 54(1–2): 173–183.
- Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C. and García-Escudero, E. 2005. *Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting*. Engineering Geology, 81(3): 213–226.
- Buisson, M.S.R. and Wheeler, S.J. 2000. *Inclusion of hydraulic hysteresis in a new elastoplastic framework for unsaturated soils*. In A. Tarantino & C. Mancuso (eds), *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*: 109–119. Rotterdam: Balkema.
- Ferrari A., Airò Farulla C., Romero E. 2009. *On the volumetric response of a compacted clay subjected to wetting and drying cycles*. 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 23-25 November 2009, Newcastle, Australia
- Gens, A. and Alonso, E.E. 1992. *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*. Canadian Geotechnical Journal, 29(6): 1013–1032.
- Gens A., Sanchez M., Sheng D. 2006. *On the constitutive modelling of unsaturated soils*. Acta Geotechnica, 1:137-147.
- Romero, E. 2001. *Controlled-suction technique*. Proc. of the 4° Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Edited by W.Y.Y. Gehling and F. Schnaid. Porto Alegre, Brasil, pp. 535-542.
- Romero, E., Vaunat J. 2000. *Retention curves of deformable clays*. Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Trento, pp. 91-106.
- Sharma, R.S. and Wheeler, S.J. 2000. *Behaviour of an unsaturated highly expansive clay during cycles of wetting and drying*. In *Unsaturated Soils for Asia*. Edited by H. Rahardjo, D.G. Toll, and E.C. Leong. Rotterdam. Balkema, pp. 721–726.
- Sivakumar, V., Tan, W.C., Murray, E.J. and McKimley J.D. 2006. *Wetting, drying and*

- compression characteristics of compacted clay*. Geotechnique 56(1): 57–62.
- Thom, R., Sivakumar, R., Sivakumar, V., Murray, E.J. and McKinnon, P. 2007. *Pore size distribution of unsaturated kaolin: the initial states and final states following saturation*. Geotechnique 57(5): 469–474.
- Tripathy, S. and Subba Rao, K.S. 2009. *Cyclic swell-shrink behaviour of a compacted expansive clay*. Geotechnical and Geological Engineering 27: 89–103.
- Vaunat, J., Romero, E. and Jommi, C. 2000. *An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils*. In A. Tarantino & C. Mancuso (eds), *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*: 121–138. Rotterdam: Balkema.
- Wheeler, S.J., Sharma, R.S. and Buisson, S.R. 2003. *Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils*. Geotechnique 53(1): 41–54.