

MODELLAZIONE DI PROCESSI DI IMBIBIZIONE IN UN RILEVATO

Giada M. Rotisciani, Giulio Sciarra, Augusto Desideri

Sapienza Università di Roma

giada.rotisciani@uniroma1.it, giulio.sciarra@uniroma1.it, augusto.desideri@uniroma1.it

Francesca Casini

Università degli Studi di Roma Tor Vergata

francesca.casini@uniroma2.it

Sommario

Lo studio numerico presentato in questa nota è finalizzato alla valutazione degli effetti indotti dall'innalzamento della superficie libera in un rilevato stradale. I risultati presentati si riferiscono alla simulazione di una prova in centrifuga eseguita da Thorel *et al.* (2011) su un modello di rilevato realizzato in scala 1/100 con una miscela di sabbia e argilla. Gli effetti indotti dai processi di imbibizione per risalita capillare sono analizzati con riferimento, in particolare, alla distribuzione degli spostamenti verticali all'interno del rilevato e alle variazioni di stato di sforzo e deformazione in due elementi posti a diverse profondità.

1. Introduzione

I rilevati stradali e ferroviari sono realizzati utilizzando come materiali da costruzione terreni in condizione di parziale saturazione. È ben noto che questi terreni, se soggetti a processi di imbibizione, possono collassare causando elevati cedimenti in testa al rilevato. L'innesco di fenomeni di collasso volumetrico è legato a vari fattori e, in particolare, al livello di addensamento raggiunto dopo il costipamento.

In questa nota si analizzano gli effetti di un processo di imbibizione indotto dall'innalzamento della superficie libera sul comportamento di un terreno compattato dinamicamente sul lato *dry* della curva Proctor. Nell'ambito di questo studio è stata simulata numericamente la prova in centrifuga eseguita da Thorel *et al.* (2011) su un modello di rilevato realizzato con una miscela di sabbia e argilla. Il comportamento meccanico del materiale è descritto numericamente dal legame di Cam-Clay modificato esteso alle condizioni di parziale saturazione (Jommi, 2000; Tamagnini, 2004). Le capacità previsionali di questo modello sono state valutate nel corso degli anni da numerosi autori con riferimento principalmente all'elemento di volume (Casini, 2012; Rotisciani *et al.*, 2015). I risultati presentati in questa nota consentono, da un lato, di validare il legame costitutivo in un problema al finito, dall'altro, aiutano a comprendere le variazioni di stato di sforzo e di deformazione associate a processi di risalita capillare.

Nella prima parte della nota si richiamano brevemente le proprietà idro-meccaniche del materiale utilizzato nella sperimentazione, le fasi della prova e le misure acquisite. Nella seconda parte si descrive il modello numerico e si commentano i principali risultati ottenuti. In particolare, si evidenziano le buone capacità previsionali del legame di Cam-Clay confrontando i profili di spostamento verticale e di indice dei vuoti misurati durante la prova con quelli ottenuti dal modello. Infine, si analizzano i percorsi di carico associati a processi di imbibizione per risalita capillare.

2. Descrizione della sperimentazione in centrifuga

Di seguito si descrivono brevemente le fasi della sperimentazione in centrifuga e i principali risultati

ottenuti. Maggiori dettagli sono riportati in Thorel et al. (2011).

La prova in centrifuga è eseguita a un'accelerazione di 100 g su un modello di metà rilevato avente altezza 21 cm, larghezza della base 60 cm e inclinazione della scarpata 33° (Fig. 1a).

Il materiale utilizzato nella sperimentazione è una miscela di caolino (40%) e di Fontainbleau sand (60%), di seguito indicata con la sigla SMC. La curva di compattazione del materiale è ricavata da prove Proctor standard e fornisce valori del contenuto d'acqua ottimo, w_{opt} , e della massima densità secca, ρ_{MDD} , rispettivamente, di 13.5% e 1.87 kg/m³. Le caratteristiche di compressibilità di SCM sono dedotte dai risultati di prove edometriche a contenuto d'acqua costante, eseguite su provini compattati dinamicamente in condizioni di completa e parziale saturazione. La curva di ritenzione, WRC, mostrata in Fig. 1b in termini di suzione, s , e grado di saturazione, S_r , è ricavata utilizzando la tecnica osmotica.

Il materiale viene disposto all'interno dello *strong-box* in sette strati dello spessore di 3 cm, compattati dinamicamente con una procedura analoga a quella utilizzata nelle prove Proctor standard. Il contenuto d'acqua iniziale è di 10.4%, pari al 78% di w_{opt} . Compattando il materiale sul lato *dry* della curva Proctor, i livelli di addensamento raggiunti sono modesti e ciò amplifica gli effetti indotti dai processi di imbibizione. La base del rilevato poggia su uno strato di sabbia dello spessore di 2 cm, dal quale è separato da un telo di geotessile. Dopo aver disposto e compattato il materiale per strati, una parte di esso viene rimosso creando una scarpata inclinata di 33° sul piano orizzontale (Fase 0). Terminata la fase di preparazione, il modello di rilevato viene messo in volo a un'accelerazione di 100 g (Fase 1). Raggiunte le condizioni stazionarie, lo *strong-box* viene connesso idraulicamente con una riserva d'acqua e la superficie libera viene fissata a una quota coincidente con la base del rilevato (Fase 2). Nella Fase 3 la superficie libera viene innalzata di 5 cm.

Gli spostamenti verticali in testa al rilevato sono misurati con tre trasduttori laser, installati a pochi centimetri dalla scarpata, e sette trasduttori di spostamento LVDT installati nella parte centrale con spaziatura regolare (3 cm). I sedimenti all'interno del rilevato sono determinati elaborando le immagini acquisite in continuo da una telecamera installata nella centrifuga solidale con lo *strong-box*. Le elaborazioni di queste immagini permettono di valutare gli spostamenti di alcuni target posizionati lungo le superfici di separazione dei primi quattro sottostrati in prossimità dell'asse del rilevato (Fig. 1a). In Fig. 2a sono riportati gli andamenti con la profondità degli spostamenti verticali, w , accumulati nelle fasi di imbibizione (Fasi 2 e 3). I sedimenti si concentrano principalmente nella parte bassa del rilevato e aumentano con l'innalzamento della superficie libera. Analogamente, le maggiori variazioni dell'indice dei vuoti, e , si manifestano negli strati di terreno più profondi (Fig. 2b). I valori di e sono calcolati dalle misure di spostamento verticale assumendo che il sottostrato si deforme in condizioni edometriche. Limitatamente alle porzioni di terreno considerate (lontane dalla scarpata e dalla sommità del rilevato), questa ipotesi è ragionevole.

3. Modellazione numerica

3.1. Descrizione del modello numerico

La prova in centrifuga è simulata numericamente alla scala del modello con un codice di calcolo agli elementi finiti in condizioni di deformazione piana. Lo strato di terreno è discretizzato con una griglia di 23 cm di altezza e 60 cm di larghezza con elementi di dimensione variabile da (0.5x0.5) a (1.0x0.5) cm². Analisi preliminari hanno mostrato che riducendo ulteriormente la dimensione delle elementi si ha un aumento degli oneri computazionali senza apprezzabili variazioni delle previsioni numeriche.

I nodi disposti lungo i lati verticali del reticolo possono muoversi solo in direzione verticale mentre quelli disposti lungo la base sono vincolati in entrambe le direzioni. Tutte le superfici sono considerate inizialmente come contorni impermeabili.

Il contatto tra lo strato di base (avente uno spessore di 2 cm) e il terreno sovrastante è simulato come un contatto puramente attrittivo con un angolo di attrito pari a quello di stato critico (32°).

Il comportamento meccanico di SCM è descritto numericamente dal modello di Cam-Clay modificato, esteso alle condizioni di parziale saturazione seguendo l'approccio proposto da Jommi (2000). I parametri del modello sono riportati in Tab. 1 (Tamagnini 2004), insieme alle caratteristiche di ritenzione e di permeabilità del materiale. Il modello costitutivo è stato calibrato sulla base dei risultati di prove edometriche eseguite su provini saturi e parzialmente saturi e di prove penetrometriche statiche eseguite su un modello di rilevato con caratteristiche del tutto simile a quello utilizzato nella prova.

Il moto della fase fluida è governato dalla ben nota equazione di Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(S_r) \frac{\partial h}{\partial z} \right)$$

in cui θ è il contenuto di acqua volumetrico, definito come rapporto tra il volume dell'acqua, V_w , e il volume totale, V ; $k(S_r)$ è la legge di variazione della permeabilità con il grado di saturazione e h il carico idraulico. La funzione $k(S_r)$ è descritta dalla legge di potenza $k(S_r) = k_{sat} (S_r)^\delta$. I valori dei parametri k_{sat} e δ sono stati ricavati con una procedura di *best fitting* delle curve di evoluzione nel tempo dei sedimenti in testa al rilevato.

La curva di ritenzione, WRC, è definita dalla seguente relazione (Van Genuchten, 1980):

$$S_r = \frac{1}{[1 + (\alpha s)^n]^m}$$

in cui α , m e n assumono i valori riportati in Tab. 1 e sono stati determinati con una procedura di *best-fitting* dei dati sperimentali. La curva di ritenzione è univocamente definita ed è indipendente dall'indice dei vuoti.

La simulazione numerica, analogamente alla prova in centrifuga, si articola in quattro fasi.

Il processo di deposizione e compattazione per strati non è modellato numericamente. Il materiale è immaginato già messo in opera con uno stato tensionale iniziale litostatico e un coefficiente di spinta in quiete, K_0 , pari a 1. Le pressioni interstiziali variano linearmente con la profondità e assumono a piano campagna un valore di 720 kPa, corrispondente a un contenuto d'acqua di 10.4%.

La fase di preparazione è simulata numericamente eliminando gli elementi posizionati al di sopra di una superficie inclinata di 33° rispetto al piano orizzontale uscente dal piede del rilevato (Fase 0). La fase di messa in volo è modellata incrementando istantaneamente l'accelerazione di gravità da 1 a 100 g (Fase 1). Le ultime due fasi sono simulate modificando le condizioni idrauliche alla base del rilevato. In particolare, nella Fase 2 la pressione dell'acqua viene fissata a un valore nullo; nella Fase 3 viene incrementata istantaneamente fino a 50 kPa. In questa ultima fase, per simulare l'innalzamento della superficie libera, si applica sulla porzione di scarpata sommersa un carico triangolare agente normalmente al contorno della griglia e si impongono pressioni dell'acqua idrostatiche costanti.

3.2. Risultati delle simulazioni numeriche

Gli andamenti con la profondità degli spostamenti verticali e dell'indice dei vuoti riportati in Fig. 2 si riferiscono a una verticale distante 0.5 cm dall'asse del rilevato. Nel complesso le previsioni numeriche sono in buon accordo con i dati sperimentali e ciò conferma le buone capacità previsionali del legame costitutivo nella simulazione di processi di imbibizione.

Come già evidenziato dalle misure, l'entità dei sedimenti previsti dal modello aumenta sensibilmente con l'innalzamento della superficie libera (Fig. 2a). Gli andamenti con la profondità nelle due fasi sono abbastanza simili e indicano che le deformazioni si concentrano esclusivamente nella parte bassa del rilevato. Non si hanno, invece, effetti apprezzabili nella parte alta dove gli spostamenti verticali si mantengono costanti. Al contrario, i dati acquisiti durante la prova indicano che anche gli strati di terreno più superficiali risentono dei processi di imbibizione e tendono a cedere nella Fase 2 e a rigonfiare nella Fase 3. L'aumento di volume osservato sperimentalmente nella parte alta del rilevato durante l'innalzamento della superficie libera è colto anche dal modello numerico ma le variazioni di e previste sono modestissime (Fig. 2b).

L'analisi numerica consente, inoltre, di studiare con maggiore dettaglio gli effetti indotti dalla risalita capillare all'interno del rilevato. Le variazioni di pressione dell'acqua u , del grado di saturazione, dello stato di sforzo e di deformazione sono analizzati con riferimento, in particolare, a due elementi posti nella parte alta e bassa del rilevato (2.75 e 14.75 cm).

Come mostrato in Fig. 3, durante la fase di messa in volo il profilo di u ruota intorno al baricentro e raggiunge in condizioni stazionarie un gradiente di 1000 kPa/m. La pressione dell'acqua nell'elemento superficiale si riduce di 68 kPa mentre in quello profondo aumenta di 50 kPa. Queste variazioni non producono effetti apprezzabili su S_r perché il punto rappresentativo delle condizioni finali per entrambi gli elementi cade sul ramo sub-verticale della WRC (Fig. 1b). Nella Fase 2 il profilo di u trasla orizzontalmente verso valori maggiori di pressione dell'acqua ($\Delta u=720$ kPa) e conseguentemente aumenta il grado di saturazione. Le variazioni di S_r sono, però, diverse a seconda della quota: nell'elemento superficiale ΔS_r non supera 0.1, in quello profondo raggiunge 0.19. Questa differenza è dovuta alle diverse condizioni iniziali e alla forma della WRC. Al crescere di u , infatti, il punto rappresentativo delle condizioni dell'elemento superficiale si muove lungo il tratto sub-verticale della WRC mentre quello relativo all'elemento profondo raggiunge il tratto sub-orizzontale. Considerazioni analoghe valgono anche per la Fase 3.

Le differenze evidenziate in termini di ΔS_r condizionano in modo significativo anche l'evoluzione dello stato tensio-deformativo nei due elementi considerati. I percorsi di carico e le risposte nel piano di compressibilità sono rappresentati in Fig. 4, in termini di invarianti dello stato di sforzo, p' e q , e volume specifico, v . Nella stessa figura sono riportate anche le superficie di plasticizzazione F_i associate a istanti i -esimi della simulazione.

Lo stato tensionale iniziale dell'elemento profondo è isotropo e cade all'interno della funzione di plasticizzazione (Fig. 4a). Incrementando l'accelerazione di gravità da 1 a 100 g, aumenta il peso della colonna di terreno sovrastante (tratto AB). La risposta dell'elemento è inizialmente elastica ed è controllata, in condizioni edometriche, da $K_0^e = v/(1-v)$. Raggiunta la superficie di plasticizzazione, la risposta diviene elasto-plastica e il percorso di carico tende verso la retta K_0 . Nel piano di compressibilità le variazioni di v sono modeste e sono controllate dalle pendenze della linea di rigonfiamento (nel primo tratto) e della linea di consolidazione normale associata ai valori correnti di S_r e rapporto di carico (nel secondo tratto). Imponendo la condizione di pressione dell'acqua nulla alla base del rilevato, si crea un flusso d'acqua che risale progressivamente dal basso verso l'alto. Al variare del grado di saturazione gli elementi posti in prossimità della base tendono a collassare. Ciò comporta una riduzione della tensione orizzontale efficace nell'elemento considerato a tensione verticale efficace costante (tratto BC). Quando la risalita dell'acqua raggiunge e supera la quota dell'elemento considerato, entrambi gli invarianti dello stato di sforzo si riducono e il percorso di carico tende verso la retta K_0 (tratto CDE). Variazioni significative del volume specifico si misurano solo nel tratto DE e sono associate a fenomeni di collasso volumetrico. In questa fase le variazioni di suzione comportano un progressivo aumento del grado di saturazione da 0.44 a 0.56. Ad esso corrisponde una significativa contrazione della superficie di plasticizzazione che mantiene lo stato di sforzo in regime elasto-plastico. Nella Fase 3, l'innalzamento della superficie libera comporta un ulteriore scarico tensionale. Lo stato si sforza si muove lungo la retta K_0 e lo scheletro solido collassa con conseguente riduzione di volume (tratto EF).

La risposta dell'elemento più superficiale mostrata in Fig. 4b è ben diversa da quella appena commentata. Nella fase di messa in volo gli effetti indotti in termini di variazioni di tensioni verticali totali e suzione sono modesti e, pertanto, lo stato di sforzo rimane all'interno del campo elastico (tratto AB). Durante la risalita dell'acqua dal basso verso l'alto, le tensioni principali (specialmente quella orizzontale) si riducono e la superficie di plasticizzazione si contrae (tratto BCE). Lo stato di sforzo rimane comunque all'interno della funzione di plasticizzazione e le deformazioni volumetriche sono associate a rigonfiamenti elastici. Nell'ultima fase della prova, lo stato di sforzo raggiunge la funzione di plasticizzazione corrente. L'ulteriore riduzione di suzione comporta una contrazione della funzione

di plasticizzazione, tale da portare lo stato tensionale in regime elasto-plastico. Le deformazioni di volume si mantengono comunque modeste e sono associate a un comportamento rigonfiante dello scheletro solido.

4. Considerazione conclusive

I risultati presentati in questa nota confermano le buone capacità previsionali del modello di Cam Clay modificato nella risoluzione di problemi al finito. Gli andamenti dello spostamento verticale e dell'indice dei vuoti con la profondità sono in linea con quelli misurati durante la prova in centrifuga. La simulazione numerica evidenzia, inoltre, l'influenza delle condizioni iniziali, in termini di u e S_r , e della forma della WRC sull'innesto dei fenomeni di collasso volumetrico. Questi ultimi si verificano, infatti, solo negli elementi profondi in cui il valore della suzione finale è inferiore a quello associato al punto di massima curvatura della WRC. Per limitare i rischi di innesto di fenomeni di collasso volumetrico è necessario, quindi, compattare adeguatamente gli strati di terreno più profondi. Al contrario, non è necessario porre particolare attenzione alla compattazione degli strati più superficiali che sono solo marginalmente influenzati dai processi di imbibizione per risalita capillare.

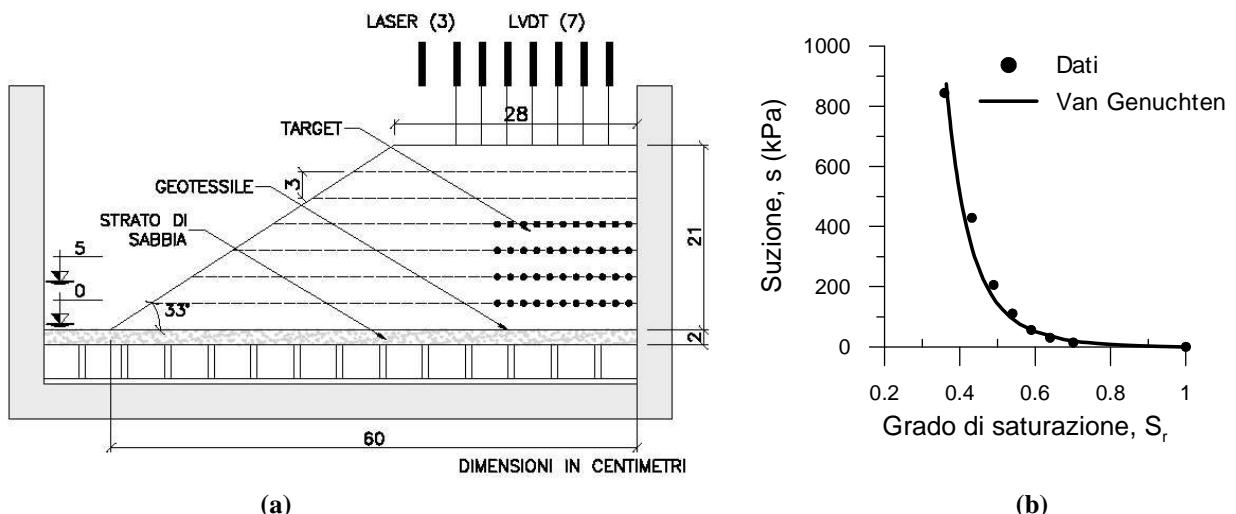


Fig 1. a) Modello fisico di rilevato; b) Curva di ritenzione di WRC.

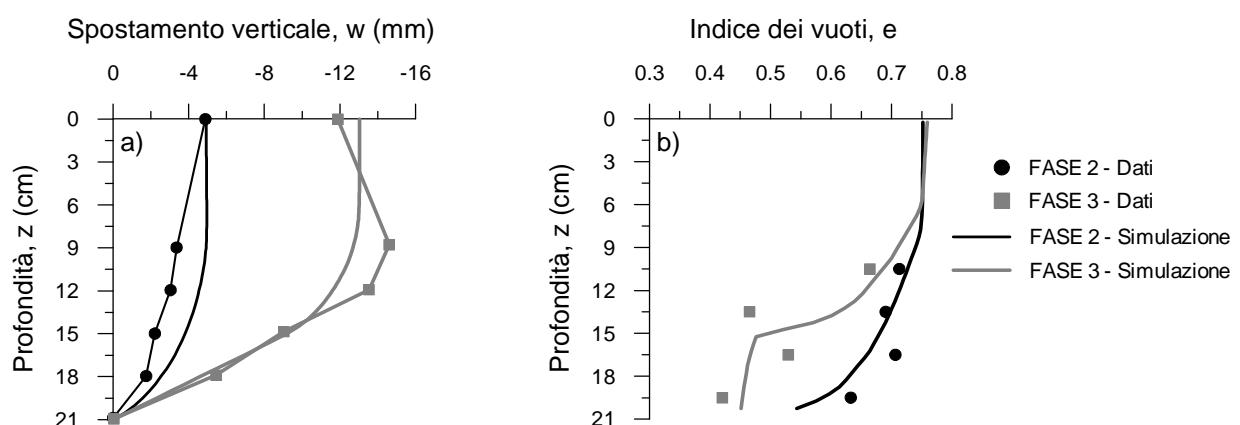


Fig 2. Confronto tra le misure e le previsioni numeriche: a) profili in z dei sedimenti ; b) dell'indice dei vuoti.

Cam-Clay						WRC			$k(S_r)$	
ν'	κ	λ	N_0	b	M	α	m	n	k_{sat}	δ
0.25	0.005	0.085	1.94	6.2	1.418	0.35	0.15	1.17	$7 \cdot 10^{-6}$	3

Tab.1 Proprietà idro-meccaniche del materiale.

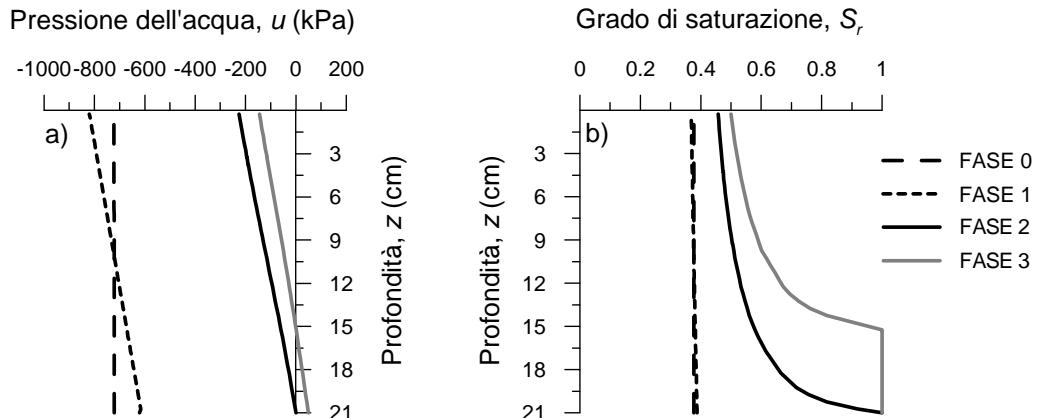


Fig. 3. Andamenti con la profondità delle pressioni interstiziali u (a) e del grado di saturazione S_r (b).

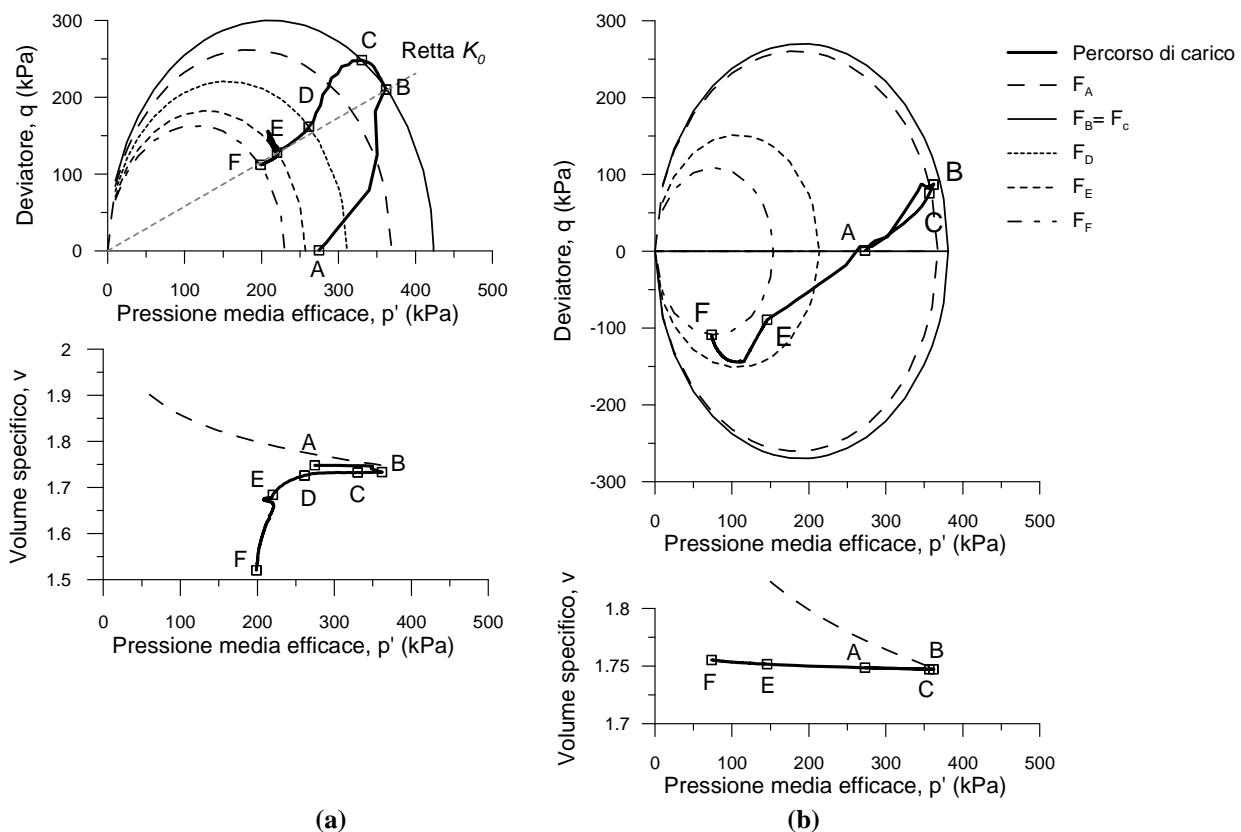


Fig. 4. a) Elemento profondo $z=14.75$ cm; b) Elemento superficiale $z=2.75$ cm.

Bibliografia

- Casini F. (2012). "Deformation induced by wetting: a simple model", *Can. Geotech. J.*, 49(8), 954-960.
 Jommi C. (2000). "Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils", In Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated soils, International Workshop on Unsaturated soils, Trento, 139-153.
 Rotisciani G. M. Sciarra G., Casini F., Desideri A. (2015). "Hydro-mechanical response of collapsible soils under different infiltration events", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, DOI: 10.1002/nag.2359.
 Tamagnini R. (2004). "An extended Cam Clay model for unsaturated soils", *Géotechnique*, 54 (3), 223-228.
 Thorel L, Ferber F, Caicedo B, Khokhar M. (2011). "Physical modelling of wetting-induced collapse in embankment base", *Géotechnique*, 61 (5), 409-420.