

Analisi numeriche per la valutazione dell'efficacia di sistemi drenanti in versanti argillosi instabili

Giulia Biavati¹, Alessandro Simoni²

¹Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, biavati@geomin.unibo.it

²Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, simoni@geomin.unibo.it

Numerical analysis for the evaluation of subsurface drains effectiveness, implications for the stability of clay-rich slopes

ABSTRACT: This paper focuses on the theoretical study of the effectiveness of subsurface drains on the stability of clay-rich slopes. The complex dynamic phenomena that affect the infiltration rate from the topographic surface and the transient hydraulic response at depth have been typically observed in the study of seepage in clay slopes. The numerical modelling allowed to analyse how these processes can influence the effectiveness of drains. It was also possible to investigate the role of some natural elements such as the soil compressibility and the saturated hydraulic conductivity distribution with depth. Results show that the effectiveness of drains varies consistently with the hydraulic conductivity value if the soil is homogeneous and incompressible, whereas is small if the compressibility of the soil and different hydraulic conductivity values with depth are considered. Implications for slope stability were then considered by calculating the increasing in the factor of safety for the different hypotheses.

Key terms: numerical modelling, drains, infiltration processes, hydraulic conductivity

Termini chiave: modellazione numerica, sistemi drenanti, processi di infiltrazione, permeabilità

Riassunto

Il lavoro ha come principale scopo la valutazione teorica dell'efficacia di sistemi drenanti eseguiti su versanti naturali instabili costituiti da terreni fini a bassa permeabilità. Per quanto complessi, i processi dinamici che regolano il tasso di infiltrazione e la propagazione delle pressioni in profondità sono la base osservazionale nello studio della circolazione idrica sub-superficiale. Con la modellazione agli elementi finiti è stato possibile studiare l'efficacia dei sistemi drenanti tenendo conto di tali dinamiche e valutando come alcuni fattori, quali la compressibilità del terreno e la stratificazione della permeabilità con la profondità, influenzino i risultati. L'analisi evidenzia come in ipotesi di terreno omogeneo e incompressibile l'efficienza dei dreni varia in funzione del valore di permeabilità, mentre, tenendo conto delle proprietà di compressibilità e di stratificazione della permeabilità, la diminuzione delle pressioni interstiziali si mantenga sempre bassa nell'intervallo di permeabilità indagato. Rispetto ai risultati ottenuti in termini di pressioni interstiziali è stata, poi, valutata l'influenza sulla stabilità dei versanti calcolando l'aumento del fattore di sicurezza nelle ipotesi considerate.

1. Introduzione

La scelta degli interventi di drenaggio come metodo di stabilizzazione di frane in terra è dovuta al fatto che le condizioni idrauliche costituiscono la causa più frequente

del raggiungimento delle condizioni di rottura (Ho, 2004). A questo vanno aggiunti motivi economici e di impatto visivo che fanno spesso preferire gli interventi di drenaggio a quelli di tipo strutturale.

Nella pratica corrente, però, la progettazione di sistemi drenanti non si avvale di criteri di progetto universalmente riconosciuti per quantificare il loro effetto sulle condizioni idriche e, dunque, sulla stabilità dei versanti. Questo è dovuto principalmente alle croniche incertezze legate alla caratterizzazione dei versanti naturali. Il terreno è eterogeneo per natura ed il flusso transitorio non uniforme, in particolare nei terreni di copertura. Ne consegue che, in fase progettuale, risulta difficile definire un modello geologico-tecnico rappresentativo e scegliere dei valori adeguati, specialmente per i parametri idraulici richiesti da qualsiasi strumento di analisi (permeabilità, infiltrazione, profondità del substrato supposto impermeabile).

Le soluzioni teoriche proposte in letteratura (Hutchinson, 1977, Burghignoli e Desideri, 1986, Di Maio et al., 1986, Airò Farulla e Valore, 1994) presentano invariabilmente due assunzioni: 1) presenza di substrato impermeabile (o fortemente meno permeabile) ad una certa distanza dalla superficie, 2) terreno omogeneo e isotropo rispetto al valore di permeabilità per i terreni di superficie interessati dalla realizzazione delle opere di drenaggio. Entrambe sono assunzioni che, secondo le più recenti esperienze nei versanti argillosi, non sono sempre sostenibili. In versanti costituiti da terreni fini, infatti, le evidenze sperimentali,

derivanti da misure puntuali, indicano chiaramente l'importanza della risposta transitoria alle precipitazioni che include una dominante componente normale al pendio (Iverson e Major, 1987, Baum e Reid, 1995, Simoni et al., 2004, Malet et al., 2005).

Per questo motivo, in contrapposizione alle tradizionali soluzioni analitiche che si basano su irrealistiche assunzioni di stazionarietà del flusso sub-superficiale (Hooghoudt, 1940, Donnan, 1946), attraverso l'implementazione di modelli numerici, si sono volute fornire soluzioni alternative in grado di rappresentare situazioni che più spesso sono state riscontrate nello studio della circolazione idrica nei versanti argillosi. In particolare, il lavoro prende in considerazione condizioni transitorie di flusso nel medio periodo (stagionale), la possibile stratificazione di permeabilità e le caratteristiche di compressibilità del terreno. L'analisi numerica intende chiarire il ruolo di questi fattori nel problema in esame e valutare l'efficienza idraulica nelle diverse situazioni al variare della permeabilità satura dei terreni.

2. Metodo

Per quanto complessi, i processi dinamici che caratterizzano la porzione satura ed insatura regolano il tasso di infiltrazione e la propagazione delle pressioni in profondità e costituiscono la base osservazionale nello studio della circolazione idrica sub-superficiale. In particolare è stato notato come la risposta idraulica in profondità sia un processo transitorio caratterizzato da una forte componente verticale (Simoni et al., 2004) e come la propagazione delle pressioni in profondità risulti attenuata e ritardata, ovvero sia influenzata dalle proprietà di compressibilità del terreno. Per simulare compiutamente il processo di filtrazione e valutare l'efficacia dei sistemi drenanti alla luce di tali dinamiche, è stato utilizzato il programma agli elementi finiti SEEP/W (Krahn, 2004). Esso risolve l'equazione di Richards (1931), che descrive il flusso Darciano, transitorio e a saturazione variabile in un mezzo poroso.

I risultati sono stati esplicitati prima in termini di efficienza idraulica ($\Delta H\%$), intesa come abbassamento percentuale della pressione interstiziale rispetto al valore che si verifica in assenza di dreno ($\Delta H\% = ((h_{(nd)} - h_{(d)}) / h_{(nd)}) * 100$); poi in termini di efficienza meccanica (ΔF_s), intesa come aumento del fattore di sicurezza che consegue alla diminuzione di pressione riscontrata ($\Delta F_s = F_{s(d)} - F_{s(nd)}$) ($h_{(nd)}$: massima altezza di pressione in assenza di dreno; $h_{(d)}$: massima altezza di pressione in presenza di dreno; $F_{s(nd)}$: minimo valore del fattore di sicurezza raggiunto in assenza di dreno; $F_{s(d)}$: minimo valore del fattore di sicurezza raggiunto in presenza di dreno).

In generale, infatti, l'efficacia di un sistema drenante dipende dal suo effetto sul regime della pressione dei pori piuttosto che dall'abbassamento della superficie libera dell'acqua o dalla portata di acqua raccolta. Entrambe le grandezze ($\Delta H\%$ e ΔF_s) sono state analizzate in riferimento

al punto mediano tra due trincee drenanti (da questo punto "dreni", per motivi di semplicità) distanti tra loro 26 m e 50 m, alla profondità corrispondente a quella massima dei dreni (5 m) che viene considerata rappresentativa di una ipotetica superficie di scorrimento. Il rapporto tra l'interdistanza dei dreni e la profondità (S/D) assume i valori di 5 m ca. e 10 m rispettivamente per le due geometrie analizzate.

Le analisi hanno preso in considerazione un impulso di precipitazione della durata di 3 mesi rappresentativo di una stagione piovosa. L'impulso di pioggia (4.5E-8 m/s pari a 350 mm per la durata di 3 mesi) è stato sommato al tasso medio stimato di infiltrazione efficace annua (100 mm) che simula condizioni stazionarie di lungo periodo. Le analisi dei processi di filtrazione in condizioni di stato transitorio partono da tale stato stazionario, prevedono l'applicazione dell'impulso trimestrale di pioggia e proseguono per una durata complessiva pari a 4 volte l'impulso indagato. L'interfaccia dreno-terreno è stata simulata tramite una condizione al contorno del tipo portata nulla ($q=0$) e "boundary review". In questo modo, al termine di ogni passo di calcolo, i nodi che hanno altezza piezometrica positiva vengono riesaminati, tramite flusso diretto verso l'esterno, fino a che l'altezza totale non eguaglia quella geometrica. Si simula l'allontanamento di acqua dal terreno lungo l'interfaccia di filtrazione di un dreno con flusso che avviene soltanto in condizioni di saturazione. In questo caso l'acqua si allontana per gravità e all'interfaccia dreno/terreno si mantiene a una pressione uguale a quella atmosferica. L'opzione del boundary review è stata utilizzata anche per il contorno superiore del modello: in questo modo, eventuale acqua in eccesso derivante dall'impulso di precipitazione transitorio viene allontanata. L'intervallo dei valori di permeabilità satura indagato è compreso tra 1E-9 m/s e 1E-6 m/s mentre la curva caratteristica e la funzione di permeabilità (a meno del valore di k_s) sono state mantenute costanti ($b=15$; $\psi_a = 0.8$ m; Campbell, 1974) (Fig. 1).

Per quanto riguarda la geometria del modello si rimanda alla descrizione dei due casi analizzati (Fig. 2). Caratteristiche comuni sono rappresentate dalla profondità dei dreni ($D=5$ m) e dalla posizione del substrato impermeabile che è posto a 10 m dal p.c.. Per proprietà di simmetria, è stato possibile considerare il problema riproducendo il semispazio (S/2) esistente tra un dreno ed il piano verticale passante per il punto mediano tra due dreni posti alla medesima profondità. Così, si è considerato un dominio largo 13 m e uno 25 m per analizzare spaziature tra i dreni (S) di 26 m e 50 m, rispettivamente. Il piano campagna è sempre stato mantenuto orizzontale per motivi di semplicità, nel caso di pendio, la situazione è quindi riconducibile a quella di dreni trasversali.

Il calcolo di $\Delta H\%$ e, successivamente, di ΔF_s , presuppone il confronto tra l'altezza di pressione misurata nel punto di riferimento nel caso di presenza o assenza di dreno. Dato che i risultati della modellazione allo stato transitorio sono dipendenti dalle condizioni iniziali adottate,

è importante che queste ultime siano simili nei due casi. Per questo motivo, le condizioni iniziali nel caso di assenza di dreno vengono di volta in volta adattate, in modo da rendere minime le differenze. Quando è presente il dreno, invece, esse corrispondono invariabilmente al risultato di una

precedente modellazione allo stato stazionario e possono dare indicazioni sul comportamento del sistema a lungo termine, pur tenendo presenti le limitazioni insite in tale tipo di analisi.

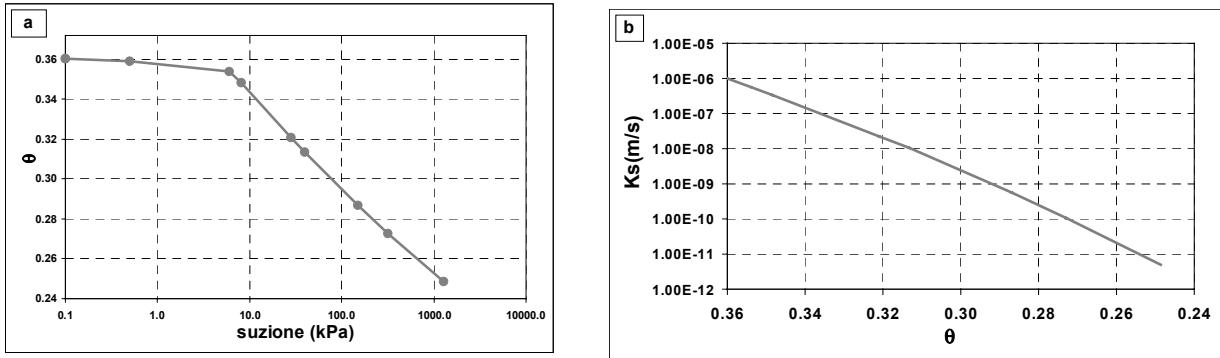


Fig. 1: a) Curva caratteristica utilizzata per le analisi; b) Funzione di permeabilità per il caso di $k_s=1E-6$ m/s
 a) Soil water characteristic curve used for the analyses; b) Hydraulic conductivity function ($k_s=1E-6$ m/s)

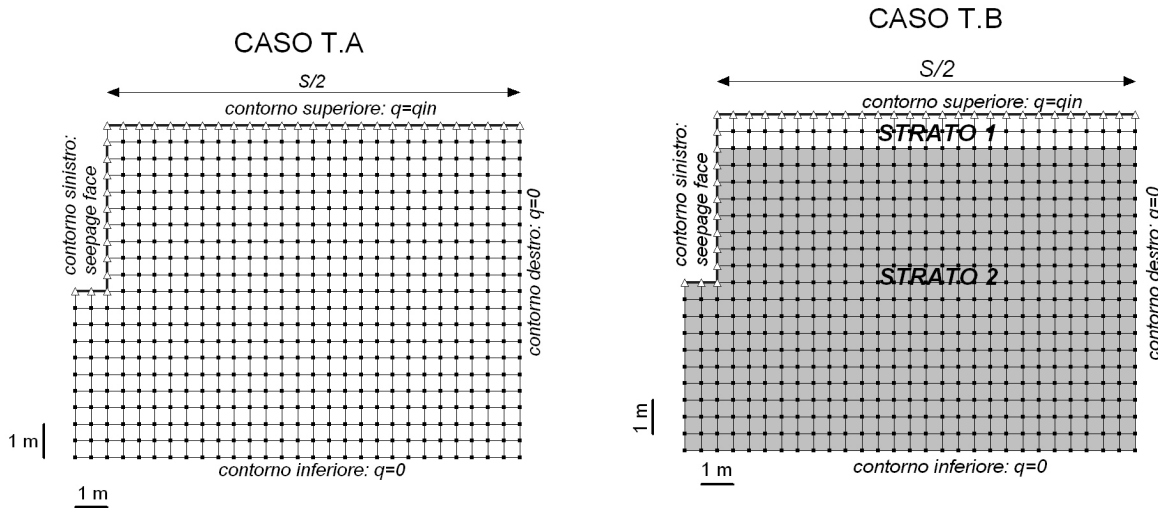


Fig. 2: Modello utilizzato e condizioni al contorno nell'analisi agli elementi finiti per i due casi considerati (T.A e T.B)
 Numerical modelling domains and boundary conditions for the two considered cases (T.A and T.B)

2.1 Caso T.A

Il caso considera un unico strato di spessore pari a 10 m avente alla base un substrato impermeabile. E' stato indagato come varia la risposta idraulica al variare della permeabilità del terreno (l'intervallo di permeabilità indagata è compreso tra 1E-8 m/s e 1E-6 m/s). Le condizioni stazionarie iniziali sono differenti in base alla permeabilità del materiale, con una superficie freatica fortemente depressa per via della presenza del dreno in caso di permeabilità elevata, mentre prossima a piano campagna in caso di permeabilità ridotta. Per permettere un confronto tra le condizioni senza dreno e le condizioni col dreno, si è imposto che, in assenza di dreno la superficie freatica fosse alla stessa profondità che si rileva nel punto più distante dal dreno quando esso è presente. Questo comporta alcune

differenze in termini di contenuto volumetrico d'acqua (θ) nella zona insatura (Fig. 3a). Essi risultano, infatti, mediamente inferiori, nel caso di assenza di dreno, e comportano un leggero ritardo nella propagazione dell'impulso piovoso transitorio. I risultati, in termini di efficienza idraulica ($\Delta H\%$) ne risultano influenzati solo in maniera marginale.

2.2 Caso T.B

In questo caso, lo spessore dello strato superficiale dotato di maggiore permeabilità, viene drasticamente ridotto. L'analisi considera due strati, di spessore di 1 m e 9 m aventi alla base un substrato impermeabile. E' stata indagata la risposta idraulica al variare della permeabilità dello strato superficiale ($k_s = 1E-8$ m/s ÷ 1E-6 m/s) mantenendo

costante ($k_s = 1E-9$ m/s) quella dello strato più profondo.

La compressibilità dei terreni è stata considerata al fine di evitare l'istantanea, e poco verosimile (Iverson e Major, 1987), propagazione delle pressioni nella zona satura che si ottiene nel caso di compressibilità nulla (diffusività infinita). Nel caso esaminato, la ridotta (ma verosimile) permeabilità dello strato inferiore fa sì che la tavola d'acqua si mantenga sempre prossima alla superficie. Durante i processi di infiltrazione l'aumento delle pressioni interstiziali provoca una diminuzione delle tensioni efficaci, lo scheletro solido si rigonfia permettendo ulteriore

immagazzinamento di acqua e determinando, così, un ritardo nella trasmissione delle pressioni verso il basso. La compressibilità può rivestire un ruolo significativo nei processi di filtrazione solamente nel caso di terreni fini (Iverson, 2000). La compressibilità viene descritta tramite l'indice di compressibilità ($m_v = \Delta\sigma' / \Delta\varepsilon$), che regola la pendenza della curva caratteristica nel tratto delle pressioni positive. Il valore scelto per le analisi è pari a $1E-4$ kPa⁻¹, che ben può rappresentare la compressibilità dei terreni argillosi (Freeze e Cherry, 1979).

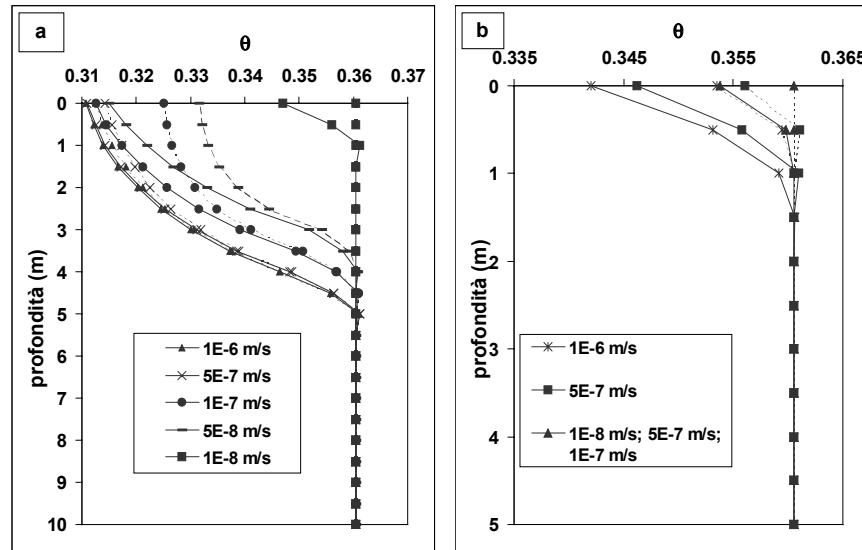


Fig. 3: Distribuzione iniziale del contenuto d'acqua volumetrico con la profondità per il caso T.A (a) e T.B (b) (linea continua: assenza di dreno, linea tratteggiata: presenza di dreno). Nel caso di presenza di dreno, il contenuto d'acqua deriva da un'analisi allo stato stazionario con portata specifica in ingresso al contorno superiore pari al valore di infiltrazione efficace stimato (vedi testo)

Initial soil water content profile for the two different analyses: T.A (a) and T.B (b) (solid line: without drain, dashed line: with drain). In case the drain is present, the water content profile results from a steady-state analysis performed imposing, at the upper boundary, a specific discharge equal to the estimated effective infiltration rate (see text for details)

2.3 Implicazioni per la stabilità dei versanti

Con riferimento al caso semplice di pendio indefinito, il fattore di sicurezza in un generico punto sulla superficie di scorrimento è espresso come segue:

$$F_s = \frac{c' + [\gamma \cos^2 \beta - \gamma_w h_w] \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad [1]$$

dove: c' (coesione del materiale) = 8.7 kPa, ϕ' (angolo di attrito) = 16° , γ (peso di volume del terreno immerso) = 20 kN/m³, γ_w (peso di volume dell'acqua) = 9.81 kN/m³, β (angolo di inclinazione del pendio) = 14° , z (spessore di terreno) = 5 m, h_w = altezza di pressione misurata sulla superficie di scorrimento (m).

E' stata così calcolata l'efficienza meccanica ΔF_s , che rappresenta la variazione (aumento) del fattore di sicurezza che si verifica in seguito all'esecuzione di sistemi drenanti. A differenza di $\Delta H\%$, tale differenza non è normalizzata ma rappresenta il valore assoluto.

La [1] è stata risolta derivando il valore di h_w dalle modellazioni numeriche. I restanti parametri rimangono

costanti e vengono loro assegnati valori tipici di terreni argillosi strutturalmente complessi (Cotecchia e Chandler, 2000), sebbene la valutazione deterministica del fattore di sicurezza vada al di là degli scopi di questo lavoro.

Per quantificare l'influenza sulla stabilità prodotta dalla realizzazione del dreno, si è calcolata per ogni caso (T.A, T.B) la massima differenza tra il fattore di sicurezza minimo raggiunto in presenza o assenza di dreno.

3. Risultati

3.1 Caso T.A

Nella Fig. 4 sono riportate le risposte idrauliche che si registrano in caso di interdistanza tra i dreni di 26 m. In assenza di dreno per tutti i casi analizzati l'impulso piovoso ha una durata sufficiente per portare a saturazione il sistema (il valore di altezza di pressione pari a 5 m corrisponde, infatti, all'innalzamento della tavola d'acqua fino a piano campagna). Il tempo inferiore si registra per $k_s = 1E-8$ m/s poiché le condizioni iniziali sono più vicine alla completa

saturazione del profilo. Il modello non considera gli effetti dell'evapotraspirazione e dell'allontanamento dell'acqua verso il piede del versante, ne consegue che il valore massimo di pressione raggiunto a causa dell'impulso transitorio rimanga costante anche in seguito. Tale incongruenza non ha effetto sui parametri ΔF_s e $\Delta H\%$.

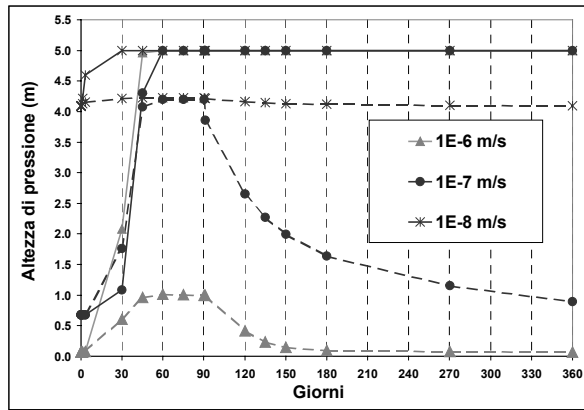


Fig. 4: Andamento dell'altezza di pressione nel punto monitorato (5 m da p.c. a distanza $S/2=13$ m dal dreno) nel caso T.A. (linea continua: assenza di dreno, linea tratteggiata: presenza di dreno) *Variation of pressure height with time at the monitored point (5 m below surface, $S/2=13$ m from the drain)*

In presenza del dreno, a seconda della permeabilità del materiale, si raggiungono picchi differenti il cui valore massimo è inversamente proporzionale alla permeabilità del materiale: al crescere di quest'ultima, infatti, cresce l'aliquota intercettata dal dreno. Una volta terminato l'impulso di precipitazione, le pressioni tornano gradualmente alla condizione iniziale per effetto della filtrazione operata dal dreno, con velocità proporzionale alla permeabilità del materiale. Si noti come in questo caso, il valore di altezza di pressione che corrisponde alla saturazione sulla verticale non corrisponde all'altezza della tavola d'acqua come nel caso senza dreno, dove la distribuzione delle pressioni è idrostatica in tutto il dominio di flusso, ma a un valore inferiore per via della filtrazione diretta verso il dreno. Così, per $k_s = 1E-8$ m/s, l'altezza di pressione che corrisponde alla totale saturazione non risulta 5 m ma 4.23 m. L'efficienza idraulica (Fig. 5), risulta sostanzialmente indipendente da k_s e pari al 16% per $k_s \leq 1E-7$ m/s. All'ulteriore aumento di k_s , l'efficienza idraulica subisce un brusco incremento fino ad un massimo pari all'80% per $k_s = 1E-6$ m/s. Numerosi fattori concorrono a determinare il comportamento osservato. $\Delta H\%$ aumenta sensibilmente quando viene superato un valore di k_s (k_{soglia}) che permette al dreno di allontanare una quantità d'acqua simile a quella che si infila dalla superficie pur senza che la tavola d'acqua si avvicini al p.c.. Ovviamente la geometria del problema gioca un ruolo importante.

A tale riguardo è interessante notare come, nel caso $S=50$ m; il punto di massima curvatura (o soglia di

efficienza) si sposti verso valori di permeabilità solo leggermente superiori ($k_s = 5E-7$ m/s) dimostrando la forte influenza di tale parametro. Nell'intervallo di k_s indagato, l'efficienza idraulica massima raggiunge il 47%. E' bene specificare che, al di sotto del valore di k_{soglia} , viene raggiunta la completa saturazione prima della fine dell'impulso piovoso.

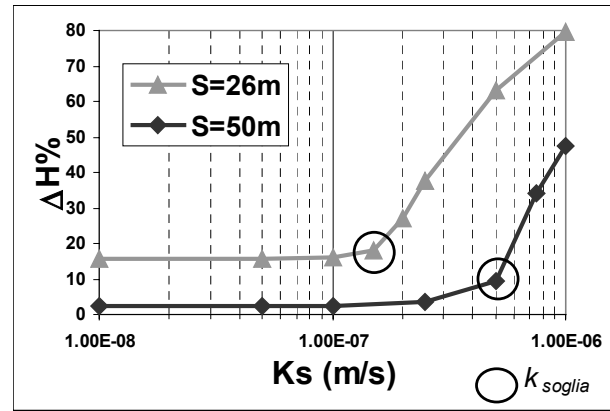


Fig. 5: Valori di efficienza idraulica al variare della permeabilità nel caso T.A, per i due valori considerati di spaziatura tra i dreni (S) *Hydraulic efficiency versus hydraulic conductivity for case T.A and different drain spacing (S)*

3.2 Caso T.B

Si intende indagare il ruolo del drenaggio nel caso lo spessore dei terreni più superficiali e permeabili ($k_s = 1E-6 \div 1E-8$ m/s) sia ridotto (1 m). Al di sotto troviamo terreni a bassa permeabilità ($k_s = 1E-9$ m/s). Si ricorda che il punto di riferimento per la misura delle pressioni neutre si trova all'interno di questi ultimi (5 m da p.c.). In questo caso si parte da condizioni iniziali (stazionarie) che vedono il terreno a bassa permeabilità invariabilmente saturo e superficie libera via via più prossima alla superficie per minori valori di k_s dei terreni superficiali (Fig. 3b). Se non venissero considerate le proprietà di compressibilità del terreno, si verificherebbe un immediato aumento delle pressioni in profondità e il massimo valore di pressione in assenza di dreno verrebbe sovrastimato (Fig. 6). In realtà, invece, l'impulso transitorio produce un lento incremento del valore di pressione alla profondità monitorata (Fig. 7). In assenza di dreno, l'aumento prosegue anche oltre la fine dell'impulso piovoso mentre, in presenza del dreno, la dissipazione inizia poco dopo e la crescita è minore. Per $k_s < 1E-7$ m/s le condizioni iniziali in presenza di dreno risultano già sature lungo l'intero profilo, e non si nota perciò nessuna forma di picco di pressione. Nel complesso, i risultati indicano che la presenza del dreno non produce abbassamenti significativi della superficie libera dell'acqua se non nelle immediate vicinanze dello stesso. Ad oltre 10 m di distanza, il solo effetto è quello di modificare la direzione di filtrazione in condizioni di stato stazionario (iniziale) raggiungendo valori di efficienza idraulica ridotti

durante la fase transitoria: i valori di $\Delta H\%$ risultano compresi tra 5 e 10% nel caso di interdistanza pari a 26 m e pressoché nulli nel caso di interdistanza doppia (Fig. 8). La presenza di uno strato superficiale a maggiore permeabilità non incrementa significativamente l'efficienza del dreno che rimane limitata soprattutto a causa della bassa permeabilità del secondo strato. I risultati ottenuti per il caso T.A. vengono, in linea generale, confermati: per $k_s < 1E-7$ m/s, un sistema drenante della profondità di 5m ha raggio d'influenza ridotto (<10m) nei confronti di un impulso di precipitazione di durata stagionale.

3.3 Implicazioni per la stabilità dei versanti

Nel caso T.A (Fig. 9a) la variazione di F_s rispetto a k_s presenta un andamento analogo a $\Delta H\%$ (Fig. 5): un aumento significativo di ΔF_s si registra per $k_s > 1E-7$ per interdistanza $S=26$ m e per $k_s > 5E-7$ per interdistanza $S=50$ m. I valori massimi si raggiungono per la massima permeabilità considerata ($k_s = 1E-6$ m/s) e corrispondono a ΔF_s pari 0.5 e 0.3 rispettivamente.

Nel caso T.B, ΔF_s presenta valori molto bassi (compresi tra 0.04 e 0.01) e non si nota alcuna significativa variazione in rapporto ai valori di permeabilità dello strato di terreno superficiale (Fig. 9b).

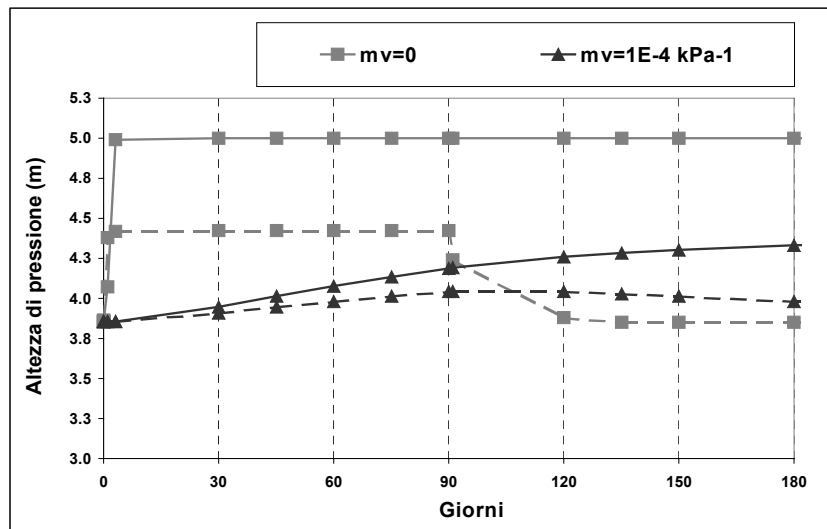


Fig. 6: Andamento dell'altezza di pressione nel punto monitorato (5 m da p.c. a distanza $S/2=13$ m dal dreno) per il caso T.B. ($k_s = 1E-6$ m/s) nel caso di terreno incompressibile ($m_v=0$) e compressibile ($m_v=1E-4$ kPa⁻¹) (linea continua: assenza di dreno, linea tratteggiata: presenza di dreno)

Variation of pressure height with time for the case T.B ($k_s = 1E-6$ m/s), curves refer to compressible ($m_v=1E-4$ kPa⁻¹) and uncompressible ($m_v=0$) soil (solid line: without drain, dashed line: with drain)

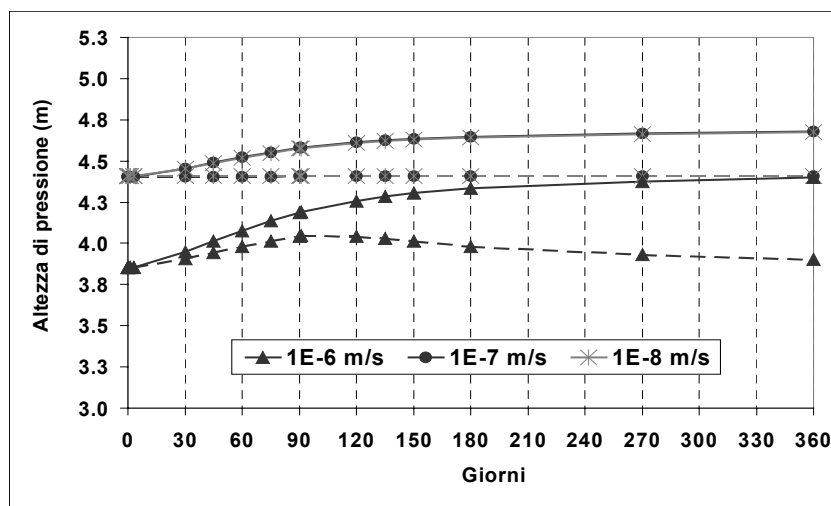


Fig. 7: Variazione di altezza di pressione nel caso T.B (linea continua: assenza di dreno, linea tratteggiata: presenza di dreno). Numerical simulation of the hydraulic response for case T.B (solid line: without drain, dashed line: with drain).

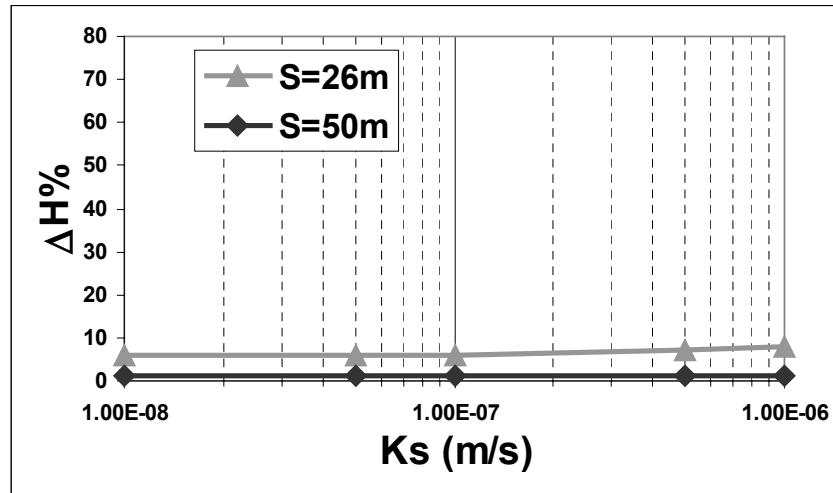


Fig. 8: Valori di efficienza idraulica al variare della permeabilità nel caso T.B per due casi di spaziatura tra i dreni (S) considerati *Hydraulic efficiency versus hydraulic conductivity for a k_s layered and compressible soil (T.B analysis)*

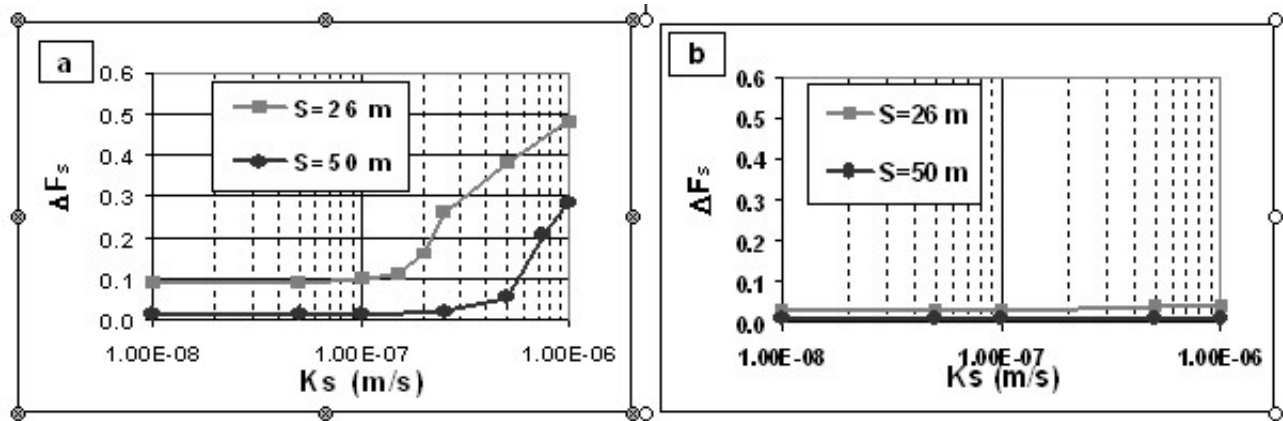


Fig. 9: Incremento del fattore di sicurezza che si ottiene, nel caso di precipitazione stagionale, a seguito della realizzazione del dreno. Casi T.A (a) e T.B (b) *Factor of safety increase induced by the drains in case of seasonal precipitation. Cases T.A (a) and T.B (b)*

4. Discussioni e conclusioni

La valutazione dell'efficacia delle trincee drenanti è un problema complesso nel quale intervengono numerose variabili che vanno dalla geometria del problema alle caratteristiche dell'impulso meteorico di progetto. Le analisi sono state prevalentemente indirizzate all'indagine dell'effetto delle proprietà idrauliche dei terreni sul problema, cercando di limitare la variabilità degli altri fattori. Dato che l'intervallo di permeabilità indagato comprende valori medio-bassi, la precipitazione di progetto è stata scelta con durata stagionale (3 mesi) in modo da ottenere risultati che possano definirsi conservativi nella stima dell'efficienza dei dreni in rapporto alla permeabilità. Minori scale temporali, infatti, non saranno sufficienti per instaurare significativi fenomeni di flusso verso il dreno o, perlomeno, produrranno risposte caratterizzate da maggiore transitorietà, associate a minore efficienza del dreno.

L'analisi della variazione dell'efficienza delle trincee

drenanti al variare della permeabilità, nel caso più semplice di terreno omogeneo (caso T.A), ha evidenziato come esista per k_s un limite (k_{soglia}) al di sotto del quale l'efficienza ($\Delta H\%$ o ΔF_s) sia costante ed indipendente dal valore della permeabilità stessa. Per $k_s > k_{soglia}$, $\Delta H\%$ aumenta rapidamente fino a raggiungere i valori massimi associati alla massima permeabilità indagata (1E-6 m/s). k_{soglia} dipende dal rapporto tra la portata di acqua in entrata dal piano campagna e la portata in uscita dal dreno. La portata in ingresso dalla superficie è regolata dal tasso di precipitazione, dalla spaziatura dei dreni e dalle proprietà idrauliche del terreno, mentre l'aliquota di acqua in uscita dipende dalla profondità del dreno e da k_s . Mantenendo la profondità del dreno costante, k_{soglia} risulta circa 3 volte il valore di q_{in} (portata specifica in ingresso) per $S/D=5$, e raddoppia per $S/D=10$ (Fig. 5 e 9a). Sebbene ulteriori serie di analisi sarebbero richieste per definire con precisione tale proporzionalità, appare evidente come, al di sotto di k_{soglia} ,

la risposta in termini di pressioni neutre è prevalentemente legata ai fenomeni di flusso verticale, il terreno si satura fino al p.c. ed il flusso diretto verso il dreno non è sufficiente a produrre alcun abbassamento della superficie piezometrica. I risultati indicano che solo con valori di permeabilità superiori a $1E-7$ m/s, le trincee drenanti raggiungono valori di efficienza apprezzabili nei confronti di una precipitazione di durata stagionale. Come anticipato, tale valore di soglia può ridursi proporzionalmente alla spaziatura dei dreni ma rapporti S/D inverosimilmente bassi ($\ll 5$) sarebbero necessari per ridurre di sole 2 o 3 volte il valore proposto.

Il primo caso analizzato, si riferisce ad una situazione schematica ed omogenea che vede il terreno mantenere costante il valore di permeabilità con la profondità. La realtà dei versanti costituiti da terreni fini si presenta tipicamente più complessa: caratterizzata da diminuzioni, anche di vari ordini di grandezza, della permeabilità nei primi metri di terreno e da valori di k_s che possono raggiungere, in termini assoluti, i valori prossimi a k_{soglia} solo negli orizzonti più superficiali (Alonso et al., 2003; Picarelli et al., 2005). Per questo motivo, la seconda serie di analisi ha considerato un sistema a doppio strato con ridotto spessore dell'orizzonte permeabile più superficiale. Nemmeno per i valori massimi considerati ($k_s=1E-6$ m/s), l'efficienza del dreno mostra incrementi sostanziali (Fig. 8). Non si osserva una variazione di $\Delta H\%$ con il variare del valore di k_s poiché il forte contrasto di permeabilità tra i due strati (almeno di un

ordine di grandezza) fa sì che l'acqua intercettata dal dreno provenga quasi esclusivamente dallo strato superiore mentre le pressioni neutre alla profondità monitorata (5 m) risultino scarsamente influenzate. In generale, il ridotto spessore limita fortemente la portata verso il dreno dell'orizzonte più permeabile determinando una risposta ancora più lenta del sistema. L'introduzione delle caratteristiche di compressibilità del terreno (caso T.B) ha messo in luce come l'efficienza idraulica risulti ulteriormente ridotta rispetto all'ipotesi di mezzo incompressibile.

Analogamente all'andamento di $\Delta H\%$, l'aumento del fattore di sicurezza risulta indipendente dal valore di permeabilità e si presenta sempre inferiore a 0.04 (Figura 9b).

In fase di progettazione, le difficoltà maggiori rimangono probabilmente legate alla definizione del modello geologico ed alla sua traduzione in un modello idrologico rappresentativo. Ciononostante, l'insieme dei risultati indica come le condizioni di stabilità non vengano apprezzabilmente migliorate, nei confronti di un impulso piovoso stagionale, dalla realizzazione di trincee drenanti, se non per valori della permeabilità media dei terreni attraversati dal dreno superiori a $1E-7$ m/s. Tale condizione non è normalmente associata a pendii argillosi instabili, nei quali l'azione stabilizzante dei dreni rimane teoricamente confinata alle ridotte modificazioni prodotte alla rete di flusso in condizioni di stazionarietà.

Bibliografia

- Airò Farulla, C., Valore, C., 1994. Evoluzione delle condizioni di sicurezza di pendii stabilizzati mediante gallerie drenanti. Atti del convegno: Il ruolo dei fluidi nei problemi di ingegneria geotecnica, Mondovì (CN) 1, 3-21.
- Alonso, E.E., Gens, A., Delahaye, C.H., 2003. Influence of rainfall on the deformation and stability of a slope in overconsolidated clays: a case study. *Hydrogeology Journal* 11, 174-192.
- Baum, R.L., Reid, M.E., 1995. Geology, Hydrology and mechanics of a slow-moving, clay-rich landslide, Honolulu, Hawaii. Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology* 10, 79-105.
- Burghignoli, A., Desideri, A., 1986. Efficienza dei drenaggi. AGI, XVI Convegno Nazionale Di Geotecnica, Bologna 3, 293-298.
- Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sciences* 117, 311-313.
- Cotecchia, F., Chandler, R.J., 2000. A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Geotechnique* 50 (4), 431-447.
- Di Maio, C., Santagata, P., Viggiani, C., 1986. Analisi del processo di consolidazione indotto da un sistema di trincee drenanti. AGI XVI Convegno Nazionale Di Geotecnica, Bologna 1, 283-289.
- Donnan, W.W., 1946. Model tests of a tile spacing formula. *Soil Sciences Society American Proceedings* 2, 131-136.
- Freeze R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604 pp.
- Ho, K.K.S., 2004. Recent advances in geotechnology for slope stabilization and landslide mitigation – perspective from Hong Kong. *Proceedings of IX International Symposium On Landslides, Rio de Janeiro 1507-1560*.
- Hooghoudt, S.B., 1940. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, 7, Algemeene beschouwing van het probleem van de detail ontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten, en kanalen. *Versl. Llandbouwk. Ond.* 46, 515-407.
- Hutchinson, J.N., 1977. Assessment of the effectiveness of corrective methods in relation to geological conditions and types of slope movements. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 16, 131-155.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research* 36 (7), 1897-1910.
- Iverson, R.M., Major, J.J., 1987. Rainfall, ground-water flow, and seasonal movement at minor Creek landslide, northwestern California: physical interpretation of empirical relations. *Geological Society of America Bulletin* 99, 579-594.
- Krahn, J., 2004. Seepage modelling with Seep/W. *GeoSlope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada*, 412 pp.
- Malet, J.-P., van Asch, Th.W.J., van Beek, R., Maquaire, O., 2005. Forecasting the behaviour of complex landslide with a spatially distributed hydrological model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 71-85.
- Picarelli, L., Urciuoli, G., Ramondini, M., Comegna, L., 2005. Main features of mudslides in tectonised highly fissured clay shales. *Landslides* 2 (2), 15-30.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics* 1, 318-333.
- Simoni, A., Berti, M., Generali, M., Elmi, C., Ghirelli, M., 2004. Preliminary result from pore pressure monitoring on an unstable clay slope. *Engineering Geology* 73, 117-128.