

OTTIMIZZAZIONE E DIMENSIONAMENTO DI UNA RETE DI POZZI DRENANTI MEDIANTE ANALISI DI FILTRAZIONE 3D.

F. Aloi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Università degli Studi di Napoli Federico II

ferdinando.aloi@unina.it

G. Urciuoli

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Università degli Studi di Napoli Federico II

gianfranco.urciuoli@unina.it

Sommario

In questa nota è analizzato il comportamento di un sistema drenante formato da una rete di pozzi di medio diametro. A tal proposito sono riportati i risultati di alcune analisi condotte mediante un codice numerico 3D scritto ad hoc in ambiente MATLAB2010. Con tale strumento è dapprima calcolata l'efficienza del sistema al variare della forma della maglia definita dalla distribuzione di pozzi, a parità di area della maglia stessa; è poi stata redatta una serie di abachi per il dimensionamento del sistema drenante. Tali abachi sono relativi al caso di maglie quadrate, condizione questa per cui risultano massime le prestazioni dell'opera. Il comportamento del sistema è analizzato in condizioni stazionarie nell'ipotesi di: sotto-sistema idraulico disaccoppiato da quello meccanico, terreno saturo, omogeneo ed isotropo nei confronti della permeabilità ed apporto di acqua continuo in superficie tale da determinare la presenza di una lama d'acqua. Per l'analisi della condizione transitoria è stato considerata una condizione iniziale con moto di filtrazione parallelo al piano campagna.

1. Introduzione

Tra le tecniche maggiormente utilizzate per la stabilizzazione dei versanti in frana vi è sicuramente l'utilizzo di opere di drenaggio. Tali interventi producono una riduzione delle pressioni interstiziali che garantisce un incremento di tensioni efficaci e quindi di resistenza a taglio sulla potenziale superficie di scorrimento. Le prestazioni del drenaggio sono di norma quantificate attraverso una funzione adimensionale del tempo e delle coordinate del punto detta *efficienza* (E), definita dal rapporto fra la variazione di pressione neutra (Δu) indotta dal drenaggio e il valore iniziale della pressione neutra (u_0).

La grande maggioranza dei metodi per il dimensionamento dei drenaggi si basa su soluzioni teoriche del processo di filtrazione indotto nel terreno. Tali soluzioni sono spesso proposte in termini di efficienza e riportate in abachi; si ricordano a titolo di esempio quelli esistenti per le trincee drenanti e i dreni tubolari (Desideri et al. 1997, Pun & Urciuoli 2008).

Per il sistema di pozzi di medio diametro, oggetto della presente nota, in letteratura sono disponibili diverse pubblicazioni nelle quali la tecnologia costruttiva è descritta compiutamente, mentre le argomentazioni di natura teorica risultano carenti. Spesso sistemi di pozzi posti ad interassi di 5-6 volte il diametro sono stati assimilati a trincee continue. Tuttavia è noto (Aloi et al. 2014) dal confronto tra le diverse soluzioni tecnologiche, che per l'intervallo di interassi di cui si è detto l'assunzione di uno "schermo drenante" continuo non è adatta a rappresentare il comportamento dei pozzi.

In altri casi, i sistemi di pozzi drenanti sono stati dimensionati basandosi su ipotesi generalmente adottate nel dimensionamento dei pozzi da emungimento. Tuttavia tali ipotesi sono molto lontane da quelle che più realisticamente bisognerebbe assumere nel caso dei drenaggi. Ad esempio, la teoria di Dupuit per i pozzi da emungimento assume che la componente di flusso verticale sia trascurabile. Tale ipotesi è nettamente in contrasto con quanto avviene in un sottosuolo drenato con pozzi, soprattutto quando si assume la presenza di una lama d'acqua a p.c., ipotesi usata da molti autori nello studio dei drenaggi. Quest'ultima condizione presuppone un apporto continuo d'acqua dal piano campagna, realistica nei lunghi periodi umidi quali potrebbero essere quelli invernali. Sebbene si tratti di una condizione comunque cautelativa, la lama d'acqua è certamente l'ipotesi più adatta al dimensionamento dei drenaggi, soprattutto quando la loro funzione è di evitare picchi di pressione neutra dovuti all'infiltrazione di acqua piovana (in questi casi i vettori di flusso hanno una importante componente verticale).

Lo scopo del presente studio è di elaborare anche per il caso dei pozzi drenanti un approccio di progetto basato su condizioni teoriche, così come attualmente avviene per i pozzi e le altre tecnologie di drenaggio. A tal proposito, come si è scritto, è stato realizzato, validato e calibrato un codice numerico ad hoc in grado risolvere il problema della filtrazione in regime 3D.

Dopo una breve descrizione della geometria e del modello considerato, viene riportato uno studio relativo all'effetto forma della maglia della rete di pozzi. Infine viene proposta una serie di abachi per il dimensionamento di un sistema formato da una rete dei pozzi a maglie quadrate.

2. Schema geometrico e modello di calcolo

Lo schema geometrico studiato è illustrato in figura 1. Si considera una porzione di pendio indefinito inclinato di un angolo “ α ”, ipotizzando l'esistenza del substrato impermeabile ad una profondità dal piano campagna pari ad “ H ”. Tale pendio viene drenato da pozzi disposti in file parallele alla linea di massima pendenza del pendio. Lungo ogni fila di pozzi, anch'essa considerata indefinita, gli elementi drenanti sono distanziati dell'interasse “ i ” e raggiungono la profondità H_0 . Si suppone inoltre che anche il numero stesso delle file sia infinito e che esse siano tutte mutuamente parallele e distanziate di un interasse “ s ” nella direzione delle curve di livello. In altre parole un pendio indefinito viene drenato da una rete di pozzi disposti secondo maglie di dimensioni “ i ” x “ s ”, rispettivamente nella direzione di massima pendenza e nella direzione trasversale (figura 1c).

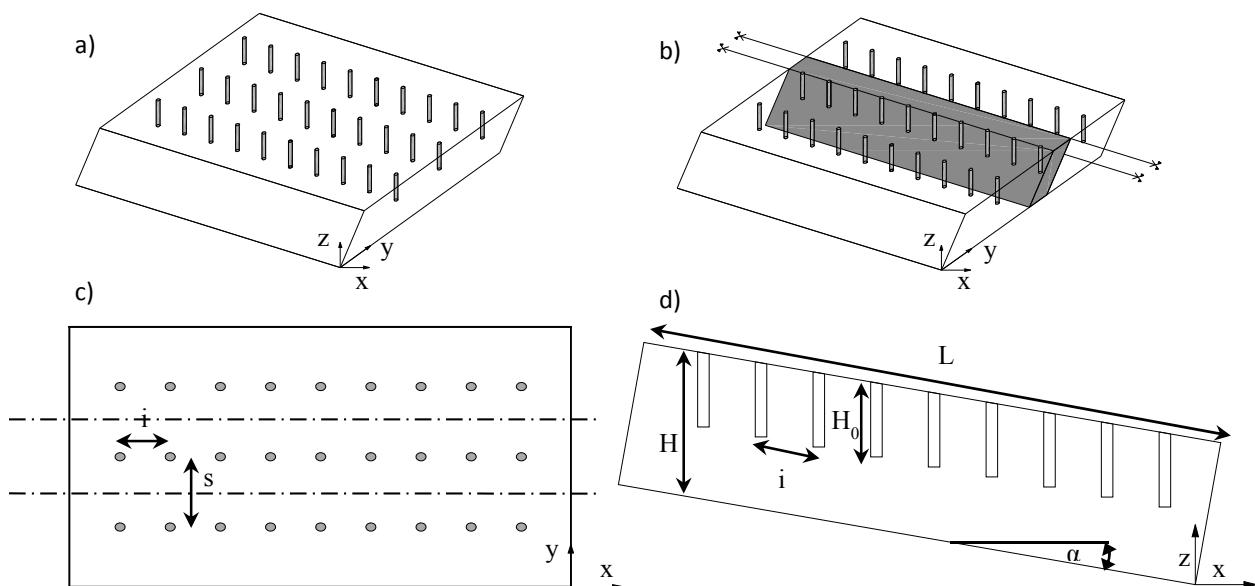


Figura. 1: a) Geometria 3D. b) dominio di riferimento. c) pianta. d) sezione longitudinale.

2.1 Equazioni e metodo utilizzato

Come si è scritto più volte il problema è analizzato in condizioni di moto 3D. La quota piezometrica h è fornita dalla nota equazione di Terzaghi-Rendulic (il problema idraulico è stato considerato disaccoppiato da quello meccanico, imponendo variazioni nulle dello stato tensionale totale durante la consolidazione; in condizioni stazionarie ciò è ovvio). Nelle ipotesi di mezzo sastro, omogeneo e isotropo nei confronti della permeabilità l'equazione reggente è la (1):

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \gamma_w \frac{3 \cdot (1 - 2\nu')}{E'} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

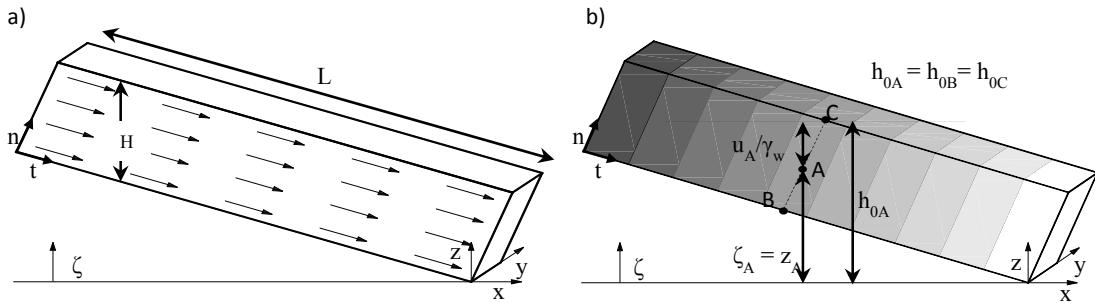


Figura 2: Condizioni iniziale $h=h_0$: a) vettori filtrazione paralleli al piano campagna; b) contorni di quota piezometrica.

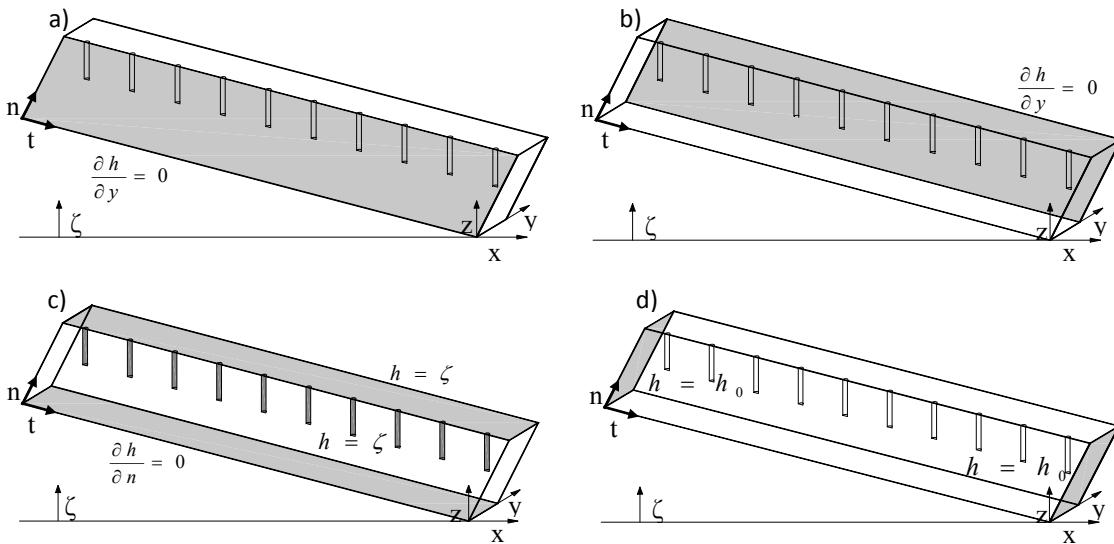


Figura 3: Condizioni al contorno: a) piano passante per i pozzi; b) piano di simmetria fra due file; c) piano campagna, superficie dei pozzi, substrato inferiore; d) superfici di monte e di valle.

E' stato scritto ad hoc un codice di calcolo capace di integrare l'eq.(1) mediante il metodo numerico alle differenze finite in ambiente MatLab. Nello specifico è stato utilizzato il metodo di Eulero esplicito (D'Acunto 2012) ed è stata usata un'approssimazione alle differenze centrali per le derivate seconde nello spazio e un'approssimazione alle differenze in avanti per la derivata prima rispetto al tempo. Il metodo è consistente e la soluzione converge una volta che risulta garantita la condizione di stabilità.

2.2 Dominio analizzato

La configurazione scelta permette da un lato di considerare geometrie generali, dall'altro di individuare una serie di piani di simmetria (figura 1b): in questo modo è possibile isolare un volume molto più piccolo rispetto a quello globale a cui restringere l'analisi, in modo tale da ridurre al minimo il numero di punti in cui viene discretizzato il dominio e quindi l'onere computazionale necessario per il soddisfacimento della condizione di stabilità. La lunghezza del dominio e il numero di pozzi sono stati scelti tramite un processo di calibrazione in maniera tale che l'efficienza, calcolata nella zona centrale del dominio, non risenta delle condizioni assegnate su bordi di monte e di valle.

2.3 Condizione iniziale e al contorno.

In condizioni iniziali il moto è uniforme con superficie libera coincidente con il piano campagna (figura 2) e vettori di filtrazione diretti da monte verso valle parallelamente alla linea di massima pendenza. In queste condizioni ogni piano normale al piano campagna rappresenta una superficie isopiezica ed il valore della quota piezometrica, espresso rispetto al riferimento $t-n$ di figura 3, è dato dall'equazione (2):

$$h_0(t) = (L-t) \cdot \text{sen}(\alpha) + H \cdot \cos^2(\alpha) \quad (2)$$

I simboli L ed H sono definiti graficamente in figura 2a. Le condizioni al contorno assunte sono:

- $\partial h / \partial y = 0$ per $y=0$ e $y=s/2$: queste superfici sono piani di simmetria e si comportano come superfici impermeabili in quanto non può esserci flusso che li attraversi, essendo la quota piezometrica uguale da entrambi i lati;
- $\partial h / \partial n = 0$ per $n=0$: alla base del dominio viene ipotizzata la presenza di una formazione rocciosa impermeabile;
- $h=h_0$ per $t=0$, $t=L$: sulle superfici di monte e di valle è assegnata una condizione di carico idrostatico; per effetto della lunghezza del dominio scelta durante la fase di calibrazione, questa condizione non influenza la soluzione nella zona centrale del pendio, dove viene calcolata l'efficienza ed è pertanto automaticamente assegnata dal software;
- $h=\zeta$ per $n=H \cdot \cos(\alpha)$, sui dreni: sul piano campagna e sui dreni è assegnato un carico pari alla quota geodetica, corrispondente ad una pressione neutra nulla.

3 Influenza della forma della maglia di pozzi

Al fine di individuare la geometria che ottimizza l'effetto stabilizzante dei drenaggi, massimizzandone l'efficienza, sono state condotte alcune analisi in cui viene mantenuto costante il prodotto $i \cdot s$ facendone variare il solo rapporto. In altre parole è stata valutata l'efficienza del sistema su una assegnata superficie a parità di area della maglia di pozzi, quindi al variare della forma.

Osservando in figura 4 l'andamento dell'efficienza media in funzione del rapporto i/s si evince che il valore massimo dell'efficienza media si ottiene per maglie quadrate. Si osserva inoltre una consistente riduzione dell'efficienza man mano che la maglia di pozzi si allunga (a parità di area racchiusa) fino a raggiungere, presumibilmente, il valore minimo per il caso corrispondente ad una serie di linee parallele. Un'ulteriore osservazione è che l'efficienza non dipende dalla direzione in cui viene disposta la maglia di pozzi; ovvero si possono scambiare i valori di i ed s senza turbare la soluzione.

# Analisi	L	H_0	H	d	i	s	i/s	$i \cdot s$	$E_\infty D=10m$
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m ²]	[%]
1	120	10	10	1	16,66	3	5,55	50	55,2
2	120	10	10	1	3	16,66	0,18	50	55,5
3	120	10	10	1	7,14	7,14	1	50	67,8
4	120	10	10	1	10	5	2	50	66,1

Tabella 1: Dati utilizzati nelle analisi per valutare l'effetto forma di una rete di pozzi con area delle maglie pari a 50 m².

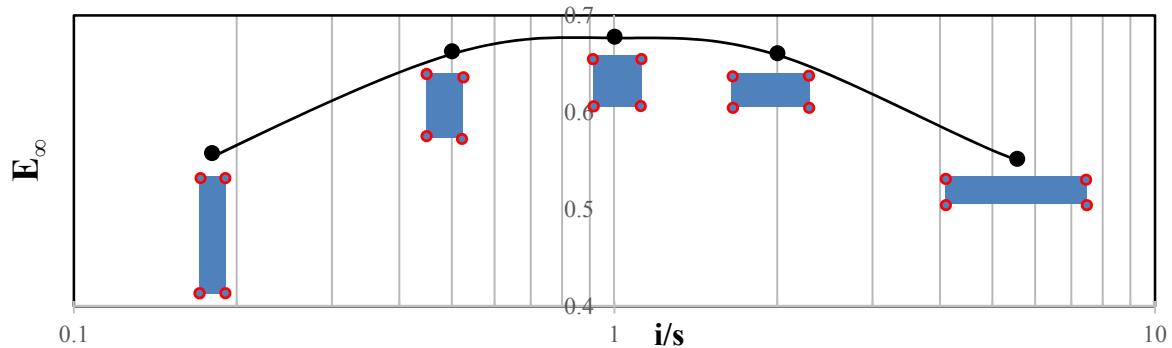


Figura 4: Andamento dell'efficienza in funzione del rapporto i/s (dati in tabella 1).

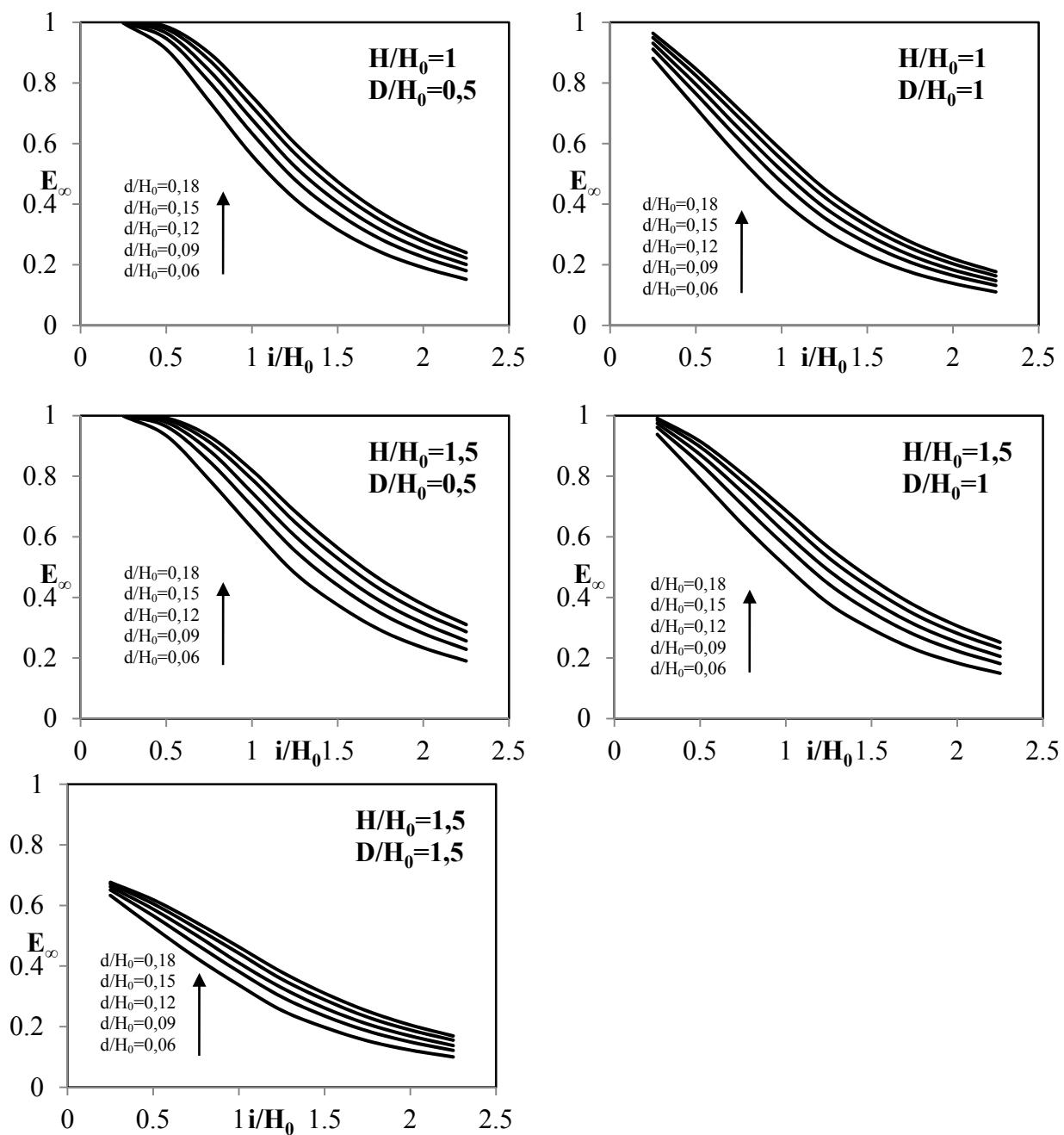


Figura 5: Abachi per il progetto di sistemi di pozzi drenanti a rete (maglie quadrate).

Quest'ultimo risultato si presta ad un'interessante riflessione: poiché i indica l'interasse fra i pozzi lungo la massima pendenza ed s lungo le curve di livello, il fatto che essi siano interscambiabili equivale a dire che la pendenza α non condiziona il problema.

4 Abachi per il dimensionamento del sistema di pozzi a maglie quadrate

Sulla base dei risultati ottenuti sono state eseguite analisi parametriche volte alla redazione di alcuni abachi di progetto per il caso del sistema con maglie quadrate (figura 5). Ogni abaco fornisce il valore dell'efficienza in condizioni stazionarie in funzione del valore dell'interasse adimensionalizzato rispetto alla profondità del pozzo. Ognuno di essi presenta diverse curve per diversi rapporti tra il diametro e la profondità del pozzo. Gli altri parametri analizzati sono: profondità del substrato impermeabile e del piano su cui si valuta l'efficienza media (ovvero la profondità della superficie critica). Analizzando i risultati, l'aspetto più evidente è la riduzione dell'efficienza all'aumentare del lato, e quindi dell'area, della generica maglia di pozzi. Quasi in tutti i casi il gradiente delle curve è massimo per valori di i/H_0 compresi tra 0.5 e 1. Probabilmente questi sono i valori che ottimizzano l'effetto dei pozzi nel processo di filtrazione tridimensionale. Non appare casuale, tra l'altro, il fatto che per i/H_0 pari a 1 si ottiene un volume di terreno compreso tra 4 pozzi esattamente corrispondente ad un cubo. La massima differenza di efficienza tra pozzi più o meno snelli si ottiene in corrispondenza delle massime concavità delle curve: per valori di i/H_0 compresi tra 1 e 2. Passando dal limite inferiore a quello superiore dell'intervallo di variazione del parametro d/H_0 (0.06 – 0.18) si verificano incrementi di efficienza fino al 20%.

Gli effetti degli altri parametri in gioco: H e D , sono gli stessi che si verificano nel caso di trincee drenanti già analizzati da altri autori (Desideri et al 1997). L'efficienza si riduce quando viene calcolata su superfici più profonde ed in particolare su superfici poste al di sotto della quota raggiunta dai drenaggi. Per quanto riguarda l'effetto del substrato impermeabile, l'aspetto più significativo è l'aumento di efficienza che si ottiene incrementandone la profondità H .

5 Conclusioni

L'analisi della letteratura ha evidenziato la carenza di trattazioni teoriche esaustive adatte al dimensionamento del sistema drenante composto da pozzi di medio diametro. La natura chiaramente tridimensionale del processo ha reso necessaria la scrittura di un codice di calcolo ad-hoc per lo studio del fenomeno, in cui viene integrata l'equazione di Terzaghi-Rendulic. Una volta realizzato, calibrato e validato il modello, sono state condotte analisi parametriche per la realizzazione di abachi di progetto che forniscono l'efficienza media in condizioni stazionarie per sistemi formati da una rete di pozzi a maglie quadrate. Tale forma è stata scelta sulla base di alcune analisi preliminari che ne hanno evidenziato i vantaggi: la maglia quadrata massimizza l'efficienza del sistema.

Il prossimo obiettivo della ricerca è integrare lo studio effettuato con analisi che tengano conto della fase transitoria di ingresso in esercizio dei pozzi. Infine si intende realizzare un'interfaccia grafica semplice per il software, compendiando anche altre tipologie di opere di drenaggio in modo da realizzare uno strumento semplice, intuitivo e completo per il progetto dei drenaggi.

Bibliografia

- Alo F., Pirone M. (2014). "Confronto fra l'azione di trincee e pali drenanti". Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici 2014 - IAGIG 2014, 11-12 Aprile 2014, L'Aquila (Italy).
- D'acunto. (2012). "Computational Partial Differential Equations for Engineering Science". Nova science publishers, New York.
- Desideri A., Miliziano S., RampelloS. (1997). "Drenaggi a Gravità per la Stabilizzazione dei Pendii". Hevelius Edizioni, Benevento.
- Pun W.K., Urciuoli G. (2008). "Soil nailing and subsurface drainage for slope stabilization". Proc. X IX Int. Symp. on Landslides: Landslides and Engineering Slopes, 2, 85-125.