

**FRANE SUPERFICIALI INNEScate DA PIOGGE INTENSE:
ANALISI NUMERICA CON MODELLI BASATI SULL'EQUAZIONE
DI RICHARDS**

Gabriele Mercurio & Riccardo Berardi

DICAT – Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio

Università degli Studi di Genova

gabriele.mercurio@unige.it, riccardo.berardi@unige.it

Sommario

Il lavoro presenta alcuni risultati di un'estesa analisi numerica su un semplice modello di interpretazione dei fenomeni di infiltrazione e di innesco di dissesti superficiali, basato sull'Equazione di Richards, applicato ad un caso di pendio stratificato. Lo studio permette di approfondire l'influenza di differenti fattori nei meccanismi di predisposizione ed innesco dei dissesti. In particolare è stato possibile trarre alcune indicazioni sul ruolo delle condizioni iniziali di umidità e delle variazioni di permeabilità del suolo.

I modelli fisicamente basati: l'equazione di Richards

Recenti contributi (p.es. Iverson, 2000) dimostrano l'imprescindibile necessità di descrivere i fenomeni di dissesto superficiale attraverso approcci accoppiati che non solo permettano di contemporaneamente gli aspetti idrologici e geotecnici del problema, ma che tengano anche in debita considerazione la condizione di parziale saturazione del terreno, nelle sue implicazioni meccaniche e della dinamica del processo.

Aspetti idrologici

In genere la soluzione del problema dell'infiltrazione della pioggia negli strati superficiali di suolo insaturo e delle modifiche, che essa determina in termini di contenuto d'acqua e pressioni interstiziali, viene affidata all'Equazione di Richards (1931). Secondo questo approccio, il fronte umido si propaga per effetto della composizione di un'azione diffusiva e di un'azione gravitativa, con una legge che è soluzione di un'equazione differenziale alle derivate parziali del II ordine non lineare, avente, nel semplice caso monodimensionale, la seguente forma:

$$\partial / \partial z [k(\psi)(\partial \psi / \partial z - 1)] = \partial \theta / \partial t + S$$

dove: z è la profondità misurata perpendicolarmente dal piano di campagna, t è il tempo, ψ è l'altezza di suzione con $\psi = -(u_a - u_w) / \gamma_w$, u_a è la pressione relativa dell'aria, u_w è la pressione relativa dell'acqua, θ è il contenuto d'acqua, $k(\theta)$ è la conducibilità idraulica, S è il termine sorgente e la relazione $\psi = \psi(\theta)$ è definita curva di ritenzione.

Aspetti geotecnici

Nell'approccio parzialmente saturo la compiuta descrizione della dinamica del contenuto d'acqua riveste un ruolo fondamentale per le dirette implicazioni sulla resistenza del terreno. Riferendosi al tradizionale approccio proposto da Fredlund è possibile definire condizioni

limite di resistenza a mezzo di un'espressione che rappresenta l'estensione del criterio di Mohr-Coulomb al caso del terreno parzialmente saturo:

$$\tau = c' + c_{app} + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi'$$
$$c_{app} = (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi_b$$

ove la coesione apparente può essere definita a partire dal carico di suzione ($u_a - u_w$) attraverso una relazione di proporzionalità diretta a mezzo di una costante ($\tan \varphi_b$), con φ_b =angolo di incremento di resistenza dovuto alla suzione.

Limiti ed applicazioni dei modelli basati sull'Equazione di Richards

Il fatto che l'Equazione di Richards, peraltro sotto ipotesi piuttosto forti, descriva la fisica del processo, rende l'approccio, da un lato limitato da una descrizione del suolo e delle condizioni al contorno articolata su molte variabili, ma dall'altro assai interessante nelle capacità di riproduzione fenomenologica di eventi reali. In questo ambito, l'applicazione, fondata su un'approfondita conoscenza sperimentale delle caratteristiche del mezzo e delle condizioni al contorno, fornisce risultati in accordo con la dinamica degli eventi reali e conferma le potenzialità dello strumento nel descrivere le condizioni sature e parzialmente sature che governano i fenomeni di infiltrazione e, quindi, di innesco dei dissesti (Scotto di Santolo et al., 2005; Cascini et al., 2006).

Simulazioni numeriche

Le evidenze sopra menzionate paiono autorizzare, seppur nel rispetto dei limiti teorici dettati dalle ipotesi da cui discende l'approccio, un primo approfondimento volto a chiarire quali siano i limiti applicativi del metodo. E' lecito, quindi, domandarsi in quale misura e a quale prezzo, in termini di stima di un così elevato numero di parametri e di variabili, la sintesi proposta da Richards possa fornire un risultato significativo ed adeguato a descrivere le evidenze macroscopiche del fenomeno indagato. Un risultato, cioè, affetto da un'approssimazione che permetta un discernimento dei quesiti posti al modello stesso. Peraltro, assunto che l'approccio descriva in modo sufficientemente fedele il processo fisico, un'analisi di sensitività sui parametri permette di disporre di indicazioni utili a chiarire il ruolo dei vari fattori nella predisposizione e nell'innesco del fenomeno, a beneficio anche di successivi studi sperimentali e numerici.

Descrizione del modello

Le simulazioni sono state condotte utilizzando il modello agli elementi finiti HYDRUS 1D (Simunek et al., 1998), alle cui soluzioni è stata associata l'analisi geotecnica del pendio indefinito, applicato ad un semplice modello di pendio stratificato con presenza di substrato. La geometria ed il campo di variabilità delle caratteristiche idrauliche e geotecniche del terreno e delle condizioni al contorno, riassunti nella Figura 1, sono stati valutati in ragione dell'analisi di alcune centinaia di fenomeni avvenuti nella provincia di Genova.

Condizioni iniziali di contenuto d'acqua nel suolo

Lo studio, come è possibile osservare nell'esempio riportato in Figura 2, evidenzia una significativa sensitività della risposta del regime delle pressioni interstiziali nel terreno in funzione del profilo iniziale di suzione. In particolare nel caso di condizioni di parziale saturazione la rapidità di approfondimento del fronte umido aumenta all'aumentare del contenuto d'acqua all'inizio dell'evento di pioggia. La variazione del campo di pressioni è

ancora più repentina in presenza di falda interessante lo strato di coltre.

Tale comportamento determina un campo di variabilità per il coefficiente di sicurezza affetto da un'incertezza molto ampia che rende inutilizzabile il risultato. La condizione iniziale sembra costituire un fattore di predisposizione importante per la comprensione del fenomeno.

Forma della pioggia

L'influenza della forma dello ietogramma è stata studiata confrontando le risposte dei profili di pressione a piogge aventi la medesima altezza cumulata e differente distribuzione delle intensità (Figura 3). Nel caso di strato di terreno omogeneo si può osservare una sensibilità della risposta del profilo di pressione alle caratteristiche della pioggia che si riduce gradatamente con la profondità. Negli strati più profondi si perde memoria della forma dello ietogramma, mentre negli strati più superficiali le variazioni di pressione risentono fortemente dei picchi di intensità. Queste considerazioni non possono però essere estese al caso di suolo stratificato, nel quale le variazioni di permeabilità inducono un comportamento assai sensibile all'intensità di pioggia sul breve periodo. Questa osservazione, approfondita nel paragrafo seguente, può costituire un'interessante indicazione nello studio dei fattori di innesco del fenomeno.

Variazioni della permeabilità del suolo

Attraverso le simulazioni è stata indagata l'influenza delle variazioni della permeabilità del suolo con la profondità (Figura 4). L'interazione fra intensità del picco di pioggia e riduzione della permeabilità del suolo con la profondità, condizione assai ricorrente nei pendii, può determinare l'insorgenza transitoria di pressioni interstiziali positive in spessori limitati interni allo strato superficiale di terreno. Questa condizione di pressione può risultare critica nei confronti della stabilità di tale strato. La presenza di uno spessore a bassa permeabilità pare costituire un elemento di vulnerabilità del pendio rispetto ad eventi pluviometrici particolarmente intensi sul breve periodo. Lo stesso terreno può non risentire di piogge assai più consistenti in termini di altezza cumulata, ma con picchi più contenuti. Questo risultato è in accordo con l'analisi degli ietogrammi degli eventi di dissesto diffuso più significativi avvenuti negli ultimi 15 anni in provincia di Genova (Berardi et al., 2005).

Bibliografia

- Berardi, R., Mercurio, G., Bartolini, P., Cordano, E. 2005. Dynamics of saturation phenomena and landslide triggering by rain infiltration in a slope. International Conference on Landslide Risk Management, 31 May /4 June, Vancouver, Canada.
- Cascini, L., Gullà, G., Sorbino, G. 2006. Groundwater modelling of a weathered gneissic cover. *Can Geotech. J.* 43(11): 1153-1166.
- Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resource Research* 36: 1897-1910.
- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1: 318-333.
- Scotto di Santolo, A., Nicotera, M.V., Evangelista, A. 2005. Monitoring matric suction profiles in partially saturated pyroclastic topsoil slopes. EXPERUS, 27/29 June, Trento, Italy.
- Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M.Th. 1998. The HYDRUS 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. IGWMC-TPS-53, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, p. 251.

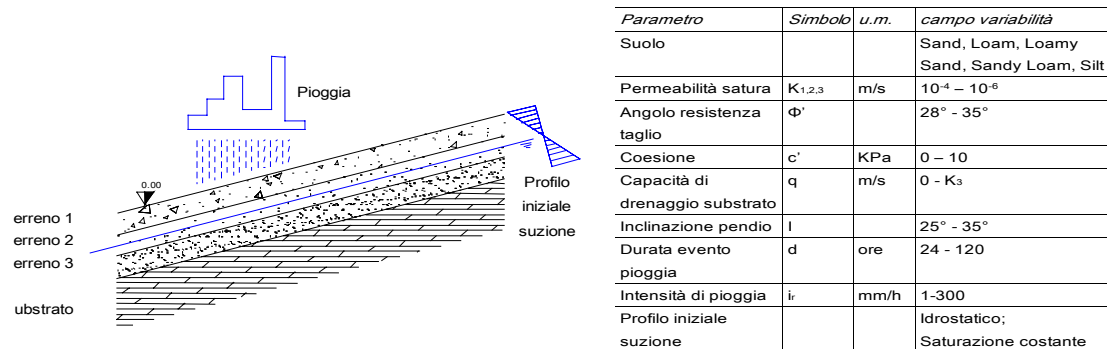


Figura 1. Schema di pendio modello per le simulazioni e campo di variabilità dei parametri

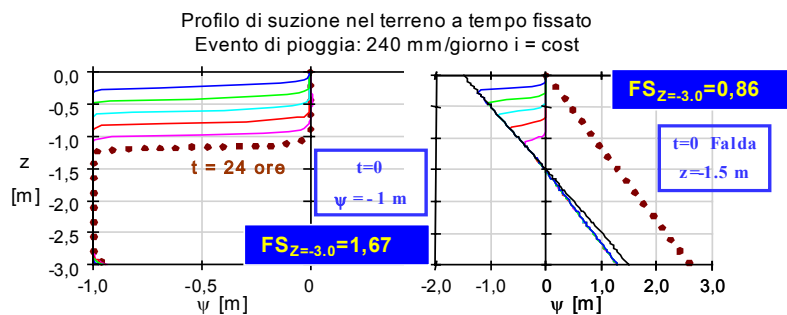


Figura 2. Influenza della condizione iniziale su un terreno omogeneo (Sandy Loam: $\phi' = 35^\circ$, $c' = 5$ KPa, $\phi_b = 30^\circ$, $k = 10^{-5}$ m/s)

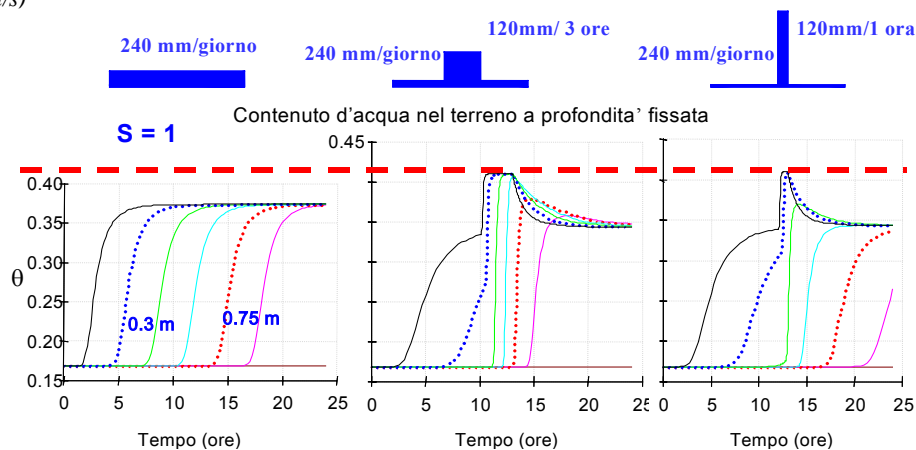


Figura 3. Influenza della forma della pioggia su un terreno omogeneo (Sandy Loam: $\phi' = 30^\circ$, $c' = 0$, $\phi_b = 30^\circ$, $k = 10^{-5}$ m/s, condizione iniziale $S = 0.5$)

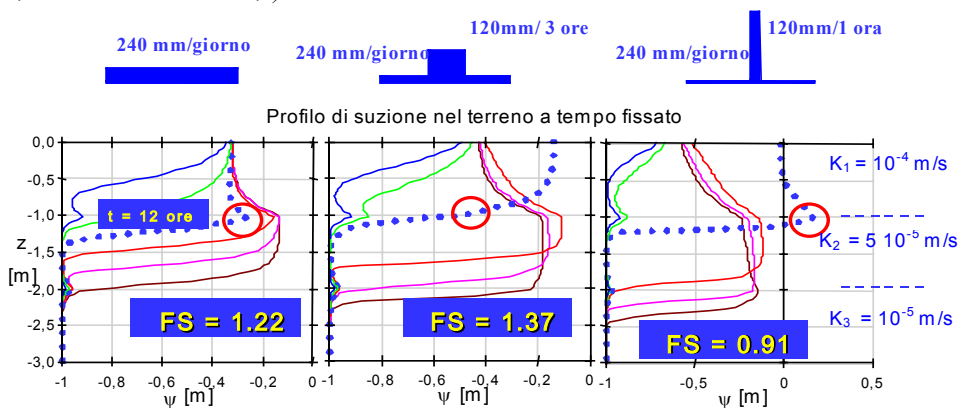


Figura 4. Influenza delle variazioni di permeabilità nel terreno stratificato sotto differenti eventi di pioggia (Sandy Loam/Loamy Sand: $\phi' = 30^\circ$, $c' = 0$, $\phi_b = 30^\circ$, condizione iniziale $S = 0.5$).