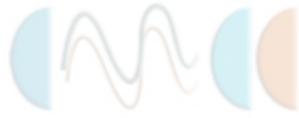


Modellazione dei processi di filtrazione nel suolo tramite codici di calcolo

Guido Rianna

Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici (CMCC)



Modellazione dei processi di filtrazione nel suolo tramite codici di calcolo

Sommario

Nel presente lavoro, sono mostrati i principali risultati ottenuti nello studio dei terreni in condizioni di parziale saturazione (ossia qualora l'acqua non riempia completamente i pori all'interno del suolo) tramite il software agli elementi finiti di modellazione dei processi di filtrazione, SEEP/W (Geo-Slope International LTD, 2004).

Keywords: SEEP/W, terreno parzialmente saturo, terreno piroclastico

JEL Classification:

Address for correspondence:

Guido Rianna

Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici

E-mail: g.rianna@cira.it

1 Introduzione

1.1 Obiettivo

Nel presente lavoro, sono mostrati i principali risultati ottenuti nello studio dei terreni in condizioni di parziale saturazione (ossia qualora l'acqua non riempia completamente i pori all'interno del suolo) tramite il software agli elementi finiti¹ di modellazione dei processi di filtrazione, SEEP/W (*Geo-Slope International LTD, 2004*).

Nel paragrafo 2, è mostrata l'equazione di governo risolta all'interno del codice numerico e quali sono le equazioni e le ipotesi di partenza necessarie alla sua definizione.

Nel paragrafo 3 invece, è esposto a grandi linee il lavoro svolto in collaborazione col Dipartimento di Ingegneria Geotecnica (DIG) dell'Università di Napoli "Federico II" (partner di AMRA a sua volta operante nell'ambito della divisione di ricerca del CMCC "Impatti sul suolo e sulle coste"); i risultati di tale lavoro sono stati presentati allo IARG (Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica) 2007 tenutosi all'Università di Salerno dal 4 al 6 luglio 2007 e al workshop "Cambiamenti climatici e dissesto idrogeologico: scenari futuri per un programma nazionale di adattamento" svoltosi a Napoli il 9 e 10 luglio (in allegato è riportata la copia del Poster presentato).

Nel paragrafo 4 infine, è presentato il lavoro svolto sempre in collaborazione col DIG, nell'ambito del progetto di ricerca MUSE (maggiori informazioni su tale progetto sono riportate nel paragrafo) per lo studio dei terreni parzialmente saturi nell'ambito dell'ingegneria civile.

1.2 Riferimenti

Centro funzionale per la previsione meteorologica e il monitoraggio idropluviometrico e delle frane. "Rapporto d'evento 4-5 marzo 2005 nel territorio della Regione Campania"

GEO-SLOPE International, Ltd "Seep/W ver. 1.01 User's Guide". Alberta, Canada

Gitirana, G. Fredlund, M.D. Fredlund, D.G. (2004). "Infiltration Runoff Boundary conditions in seepage analysis". 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th Joint IAH-CGS Conference, September 19-21, 2005 Saskatoon, SK, Canada.

¹ Gli elementi finiti costituiscono un metodo numerico per la risoluzione approssimata delle equazioni differenziali; data infatti, ad esempio, la funzione incognita $f(\bar{x}, t)$ è possibile considerare che essa possa essere approssimata mediante funzioni ad andamento noto (polinomiali, esponenziali) assumendo come nuove incognite del problema il valore delle funzioni approssimanti in un numero limitato di punti interni al dominio, i *nodi*; essi restano definiti una volta discretizzato il dominio continuo (costituzione di una *mesh*) tramite un determinato numero di elementi finiti



1.3 Definizioni, acronimi e abbreviazioni

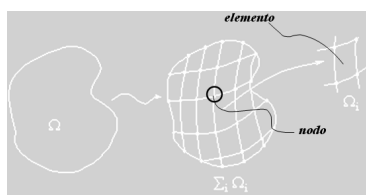
AMRA	Analisi e Monitoraggio Rischio Ambientale
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici
DIG	Dipartimento di Ingegneria Geotecnica
IARG	Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica
MUSE	Mechanics of Unsaturated Soils for Engineering

1.4 Lista delle figure

Figura 1 risultati delle analisi per la valutazione dei parametri idraulici del suolo	7
Figura 2 andamento della suzione al piano campagna nel periodo agosto 2004-marzo2005	8
Figura 3 andamento della suzione ad un metro di profondità nel periodo agosto 2004-marzo2005 ...	9
Figura 4 andamento della suzione a 2 metri di profondità nel periodo agosto 2004-marzo2005	9
Figura 5 andamento della suzione ad un metro di profondità nel periodo agosto 2002-marzo 2003; la linea rossa rappresenta il picco di suzione raggiunto in corrispondenza del 4 marzo 2005	10
Figura 6 Evoluzione di suzione associata al solo evento scatenante(curva in basso) confrontata con l'evoluzione associata all'intera serie storica di piogge.....	11
Figura 7Evoluzione di suzione associata alle piogge degli ultimi 40 giorni (curva in basso) confrontata con l'evoluzione associata all'intera serie storica di piogge.....	11
Figura 8Evoluzione di suzione associata alle piogge degli ultimi 75 giorni (curva in basso) confrontata con l'evoluzione associata all'intera serie storica di piogge.....	12
Figura 9 andamento della pressione neutra a varie profondità in funzione del tempo	15
Figura 10 andamento della pressione neutra lungo la colonna per vari istanti temporali.....	15

1.5 Glossario

c'	coesione efficace	$[kPa]$
F_s	coefficiente di sicurezza	$[-]$
F_{s_limite}	coefficiente di sicurezza limite	$[-]$
H	$= \frac{u_w}{\gamma_w} + z$ carico totale	$[m]$





k_i	permeabilità idraulica nella direzione i – sima ($i = x, y, z$)	$\left[\frac{m}{s} \right]$
m_w	pendenza della curva di ritenzione	$\left[\frac{1}{kPa} \right]$
n	porosità	$[-]$
Q	flusso puntuale applicato al contorno	$\left[\frac{1}{s} \right]$
s	suzione	$[kPa]$
S_r	grado di saturazione	$[-]$
t	tempo	$[s]$
u_a	pressione dell'aria	$[kPa]$
u_w	pressione neutra	$[kPa]$
u_{w0}	pressione neutra iniziale	$[kPa]$
σ	tensione totale	$[kPa]$
τ_{limite}	massima resistenza a taglio esplicabile dal terreno.	$[kPa]$
$\tau_{resistente}$	resistenza a taglio esplicata in un istante dal terreno	$[kPa]$
η	contenuto volumetrico d'acqua	$[-]$
φ	angolo di attrito	$[-]$



2. Equazioni di governo del codice SEEP/W

L'espressione dell'equazione di *Richards (1931)* accoppiata alla formulazione di Darcy generalizzata (valida cioè per flussi di acqua in terreni in condizione di parziale saturazione), assume la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{eq. 1}$$

- k_i permeabilità idraulica nella direzione i – sima ($i = x, y, z$)
- $H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y$ (eq. 2) carico totale
- Q flusso puntuale applicato al contorno
- η contenuto volumetrico d'acqua; dato dal prodotto della porosità n per il grado di saturazione S_r

in termini pratici, essa esprime il bilancio di acqua all'interno di un volume elementare di terreno per il quale la differenza algebrica tra i flussi entranti ed uscenti è uguale alla variazione di liquido immagazzinato in esso; tale relazione può interpretarsi anche come l'uguaglianza tra la somma delle variazioni puntuali di flusso più il flusso esterno applicato e la variazione istantanea del contenuto volumetrico d'acqua.

Al secondo membro dell'eq.1, assumendo che la tensione totale σ e la pressione dell'aria u_a restino costanti, la variazione del contenuto volumetrico d'acqua η risulta dipendente dalla sola variazione della pressione della fase liquida u_w ; il legame tra η e u_w è rappresentato dall'equazione di ritenzione:

$$\partial \eta = m_w \partial u_w = m_w \gamma_w \partial (H - y) \quad \text{eq. 3}$$

- m_w pendenza della curva di ritenzione

Sostituendo l'eq.3 nell'eq.1 e considerando che la quota geodetica y non vari nel tempo, si giunge all'equazione differenziale generale di governo risolta in *Seep/W*:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{eq. 4}$$



3. Interpretazione delle piogge per la costruzione di soglie d'allarme

I depositi piroclastici che ricoprono quasi totalmente i versanti dei rilievi dell'area nocerina sono stati a più riprese interessati da fenomeni di colate rapide². (8 dicembre 1960, 6 marzo 1972, 10 gennaio 1997, 4 marzo 2005).

Se si considera la relazione con la quale è espressa la condizione di stabilità per resistenza al taglio nei mezzi non saturi, quali sono le colate piroclastiche:

$$F_s = \frac{\tau_{resistente}}{\tau_{limite}} = \frac{c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi}{\tau_{limite}} \quad \text{eq. 5 [vedi nota 3]}$$

si può verificare come il principale fattore d'innescò di fenomeni di tal genere sia sicuramente l'azione delle acque meteoriche; infatti, l'acqua in un mezzo non saturo produce dei legami definiti *apparenti* che consentono al mezzo di essere stabile anche su versanti molto acclivi (superiori anche all'angolo di naturale acclivio o di attrito); al sopraggiungere della pioggia però, la pressione della fase liquida u_w aumenta, riducendo i legami apparenti fino ad attingere la condizione di instabilità ($F_s \leq F_{s_limite}$).

Col presente lavoro, si mira quindi essenzialmente:

- ad indagare il legame che intercorre tra evoluzione temporale delle precipitazioni ed evoluzione temporale delle variabili associabili al quantitativo d'acqua immagazzinato nel suolo (suzione, grado di saturazione) le quali regolano, come detto, la resistenza al taglio e quindi la possibilità d'innescò dei fenomeni di colata;
- a definire valori di suzione di soglia validi per i versanti piroclastici dell'area di Nocera Inferiore;
- a valutare se l'innescò delle colate possa essere addebitabile ai soli eventi scatenanti verificatisi a ridosso della frana o possa essere interpretato considerando una più lunga storia di precipitazioni.

² le colate rapide possono definirsi come movimenti franosi nei quali il terreno coinvolto si muove come un fluido viscoso, con velocità diverse tra i punti della massa in movimento.

L'innescò delle colate è generalmente caratterizzato da due fasi:

- la prima nella quale si verifica la rottura per taglio (scorrimento traslativo o rotazionale)
- nella seconda caratterizzata dalla fluidificazione della massa

³ In tale relazione:

F_s coefficiente di sicurezza; $\tau_{resistente}$ resistenza a taglio esplicita in un istante dal terreno; τ_{limite} massima resistenza a taglio esplicitabile dal terreno.

c' coesione efficace e φ angolo di attrito sono funzione della composizione granulometrica, della storia tensionale, dell'indice dei vuoti; dello stato tensio-deformativo del terreno



L'intervallo temporale totale considerato per la traduzione dei dati di pioggia in valori di suzione è il periodo compreso tra il novembre 1999 e il maggio 2005; per tale intervallo infatti, è possibile disporre di dati a cadenza oraria, rilevati da una stazione meteorologica situata all'interno dell'area di interesse; si considera inoltre, per ogni biennio, l'intervallo compreso tra l'agosto di un anno e il maggio dell'anno successivo; tale scelta si giustifica considerando, da un lato, che tutti i fenomeni di colata rilevati nell'area di Nocera si concentrano nel periodo dicembre-marzo e, dall'altro, che non vi sono dati di suzione rilevati da assumere come condizioni iniziali ma che per essi è necessario ricorrere a valori stimati e quindi, per ridurre il peso dell'eventuale errore associato a tale stima, è necessario allontanarci dal periodo di interesse, dando inizio all'analisi da agosto.

periodo	periodo di osservazione	pioggia cumulata	data (max val. giornal.)	max val. giornal.
1999/2000	1/11-31/5	731.8mm	16/12/1999	59.2mm
2000/2001	1/8-31/5	1198.6mm	27/12/2000	111.6mm
2001/2002	1/8-31/5	826mm	15/09/2001	54.2mm
2002/2003	1/8-31/5	1408.6mm	09/01/2003	87mm
2003/2004	1/8-31/5	1530.2mm	07/03/2004	73.4mm
2004/2005	1/8-31/5	1522.5mm	04/03/2005	204.8mm

Tabella 1 riepilogo principali dati di pioggia per il periodo 1999-2005

Il massimo valore di pioggia giornaliera rilevato nel biennio 2004/2005 coincide con l'ultimo degli eventi di frana (4 marzo 2005) verificatisi nella zona; in tale circostanza, la colata, innescatasi sulle pendici del monte Albino (località Vescovado) a circa 400m s.l.m., è giunta fino a 83m s.l.m. travolgendo durante il moto un'abitazione (108m s.l.m.) e provocando danni anche alle condutture dell'acquedotto dell'Ausino (103m s.l.m.).

Al fine di ridurre l'onere computazionale e di ottenere uno strumento che sia capace di fornire risultati in tempi compatibili con quelli necessari per l'allertamento della popolazione, nel presente lavoro, l'equazione di governo risolta in SEEP/W:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{eq. 6}$$

è ulteriormente semplificata considerando un processo d'infiltrazione monodimensionale con direzione puramente verticale⁴ (in tal modo, il primo termine al primo membro dell'equazione si annulla).

La risoluzione dell'equazione esige la definizione delle condizioni al contorno e dei parametri idraulici. Al contorno superiore, si utilizza una condizione tramite la quale si possa simulare la

precipitazione su pendio; in particolare, si assume come primo tentativo una velocità di infiltrazione pari all'intensità di pioggia proiettata lungo la normale al pendio, qualora, però, questa condizione produca un valore di $u_w > 0$, si assume come condizione quella di lama d'acqua $u_w = 0$; al contorno inferiore invece, è assunta la presenza di una superficie libera di filtrazione.

Data l'ipotesi di stratigrafia semplificata con una sola tipologia di terreno presente, la definizione dei parametri idraulici invece, si traduce essenzialmente nella definizione di una sola equazione di ritenzione e di permeabilità.

Esse sono state desunte da prove di laboratorio condotte su campioni indisturbati prelevati dal sito. È stata quindi valutata l'attendibilità di tali parametri; infatti, si sono rese disponibili le rilevazioni di una stazione di monitoraggio ubicata nei pressi del sito dove è avvenuta la frana; in tale stazione, sono effettuate misure sia di pioggia che di suzione ed è stato quindi possibile prevedere, attraverso il modello, la suzione introducendo in input le piogge per poi confrontare i dati di suzione prevista e misurata.

Tale confronto evidenzia l'ottimo accordo tra previsione e realtà e quindi da ciò può desumersi l'affidabilità del modello e la rappresentatività dei parametri desunti dalle prove di laboratorio

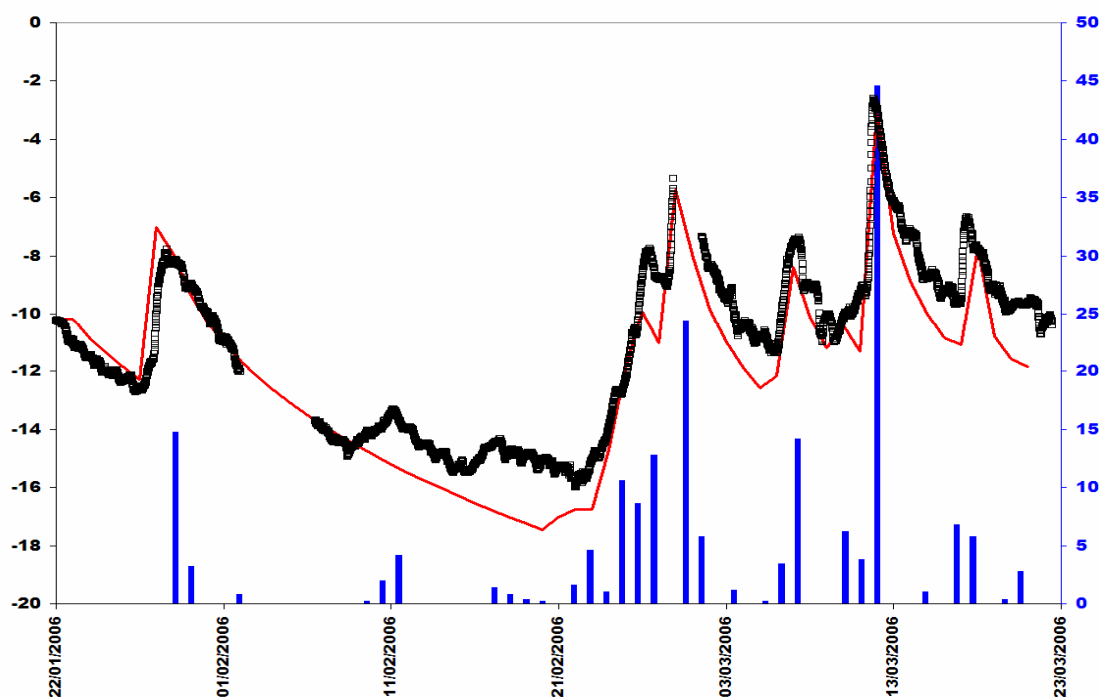


Figura 1 risultati delle analisi per la valutazione dei parametri idraulici del suolo
(in blu sono riportate le piogge giornaliere, in rosso la suzione stimata ed in nero la suzione misurata)

⁴ il tempo di analisi nel caso 1D è di circa 20 minuti mentre sarebbe dell'ordine dei 100 minuti per analisi 2D.

Costruito il modello e tarati i parametri, sono state quindi previste le evoluzioni temporali di suzione a partire dalle evoluzioni temporali delle piogge.

Sono state prese in considerazione le evoluzioni a tre diverse profondità (piano campagna $y = 0m$, $y = 1m$, $y = 2m$); in tutte le analisi è assunta una distribuzione iniziale di suzione idrostatica con *water table* a $4m$ di profondità.

Confrontando gli andamenti ottenuti, a parità di profondità, nelle varie analisi, si ritrovano andamenti molto simili; a piano campagna infatti, in tutte le analisi svolte, l'andamento della pressione neutra risulta molto sensibile ai valori di precipitazione oraria tanto da registrare il raggiungimento del valore minimo ($u_w = 0kPa$) in corrispondenza dei picchi di precipitazione oraria rilevati; gli andamenti a profondità maggiori invece, non risentono in alcun modo dei picchi orari ma risultano sensibili ai valori cumulati dell'ordine delle 24 ore; tale sensibilità appare tanto più accentuata al diminuire dei valori di suzione ai quali corrisponderanno valori più alti della conducibilità idraulica, k_y .

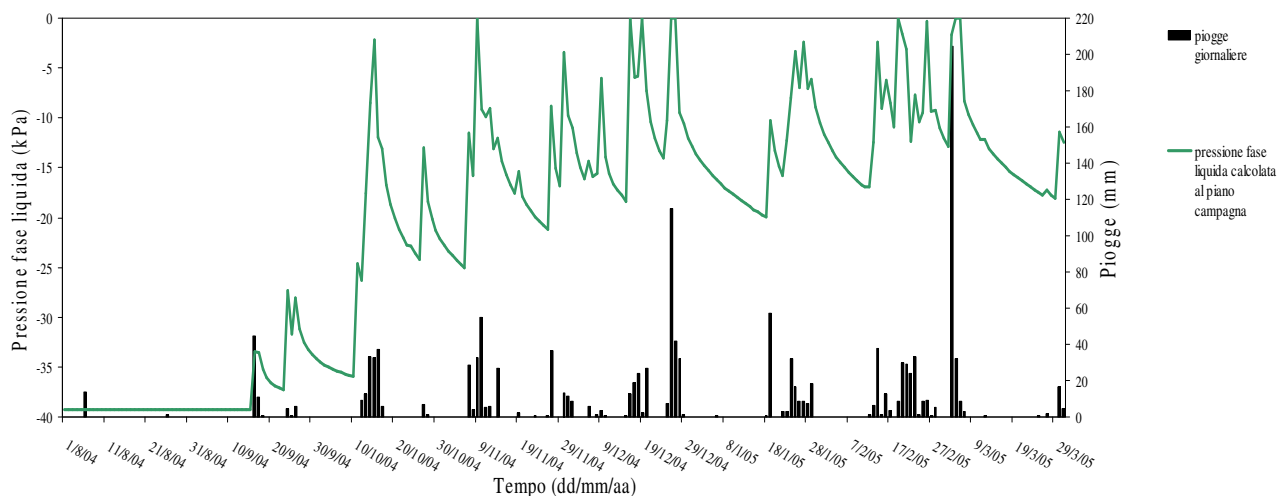


Figura 2 andamento della suzione al piano campagna nel periodo agosto 2004-marzo2005

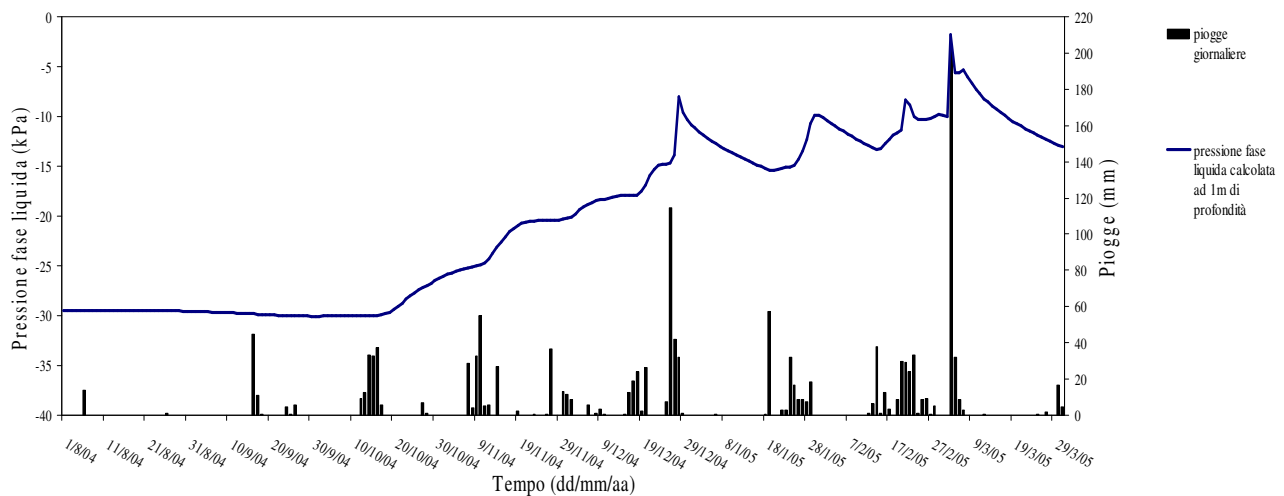


Figura 3 andamento della suzione ad un metro di profondità nel periodo agosto 2004-marzo2005

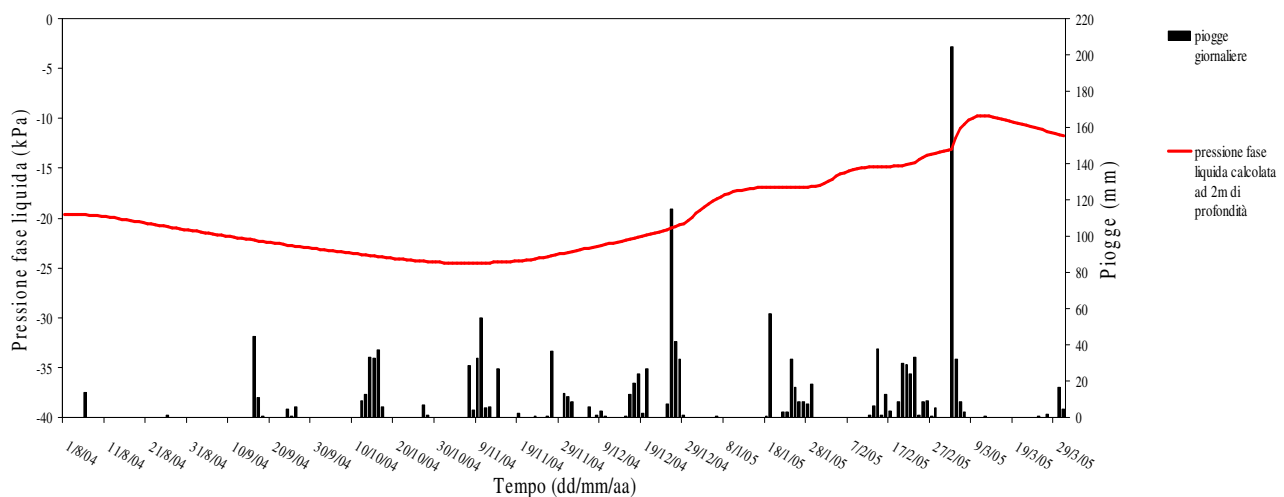


Figura 4 andamento della suzione a 2 metri di profondità nel periodo agosto 2004-marzo2005

I valori di suzione ottenuti dalla simulazione in corrispondenza dell'evento di frana del 4 marzo 2005 possono inoltre essere assunti come valori di soglia d'allarme e confrontati con gli andamenti di suzione ritrovati nel periodo 1999-2004 (e.g. **Figura 5**); tale confronto mostra come questi ultimi si mantengano sempre inferiori rispetto al valore stimato in corrispondenza dell'evento franoso, in accordo con la constatazione che nel periodo 1999-2004, non si sono verificati fenomeni di dissesto.

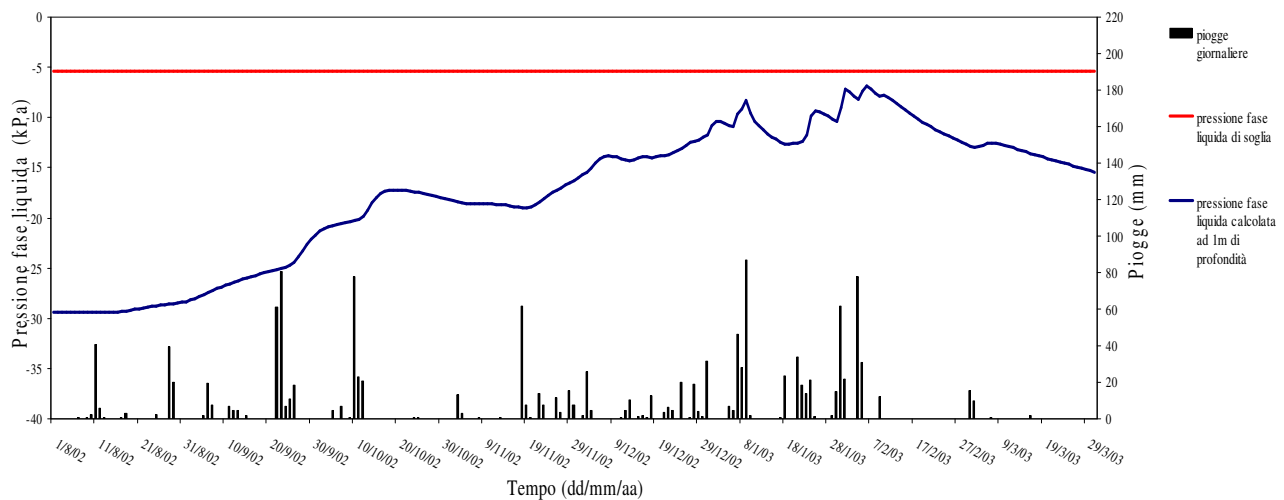


Figura 5 andamento della suzione ad un metro di profondità nel periodo agosto 2002-marzo 2003; la linea rossa rappresenta il picco di suzione raggiunto in corrispondenza del 4 marzo 2005

Il confronto tra i dati di precipitazione misurati e i risultati delle simulazioni effettuate per il periodo agosto 2004-marzo 2005, inoltre, può servire da esempio per la comprensione del ruolo giocato dalle piogge cadute nelle settimane precedenti sul possibile innesco di fenomeni di colata; infatti l'analisi dei valori di pioggia giornaliera e cumulata relativa al periodo che va dall'agosto 2004 alle ore 17 del 4 marzo 2005 (momento in cui ha avuto inizio il movimento franoso) mostra che dei 1350mm registrati in tale periodo, circa 300mm sono rilevati in corrispondenza di due soli eventi, l'uno verificatosi il 26 dicembre (164mm), l'altro proprio il 4 marzo (161mm); agli eventi di dicembre e marzo che ora si è visto, sono confrontabili come intensità, sono però associabili valori di suzione sostanzialmente diversa con la conseguenza che l'evento di dicembre, al contrario di quello di marzo, non ha provocato alcun dissesto.

A parità di intensità del valore di pioggia giornaliera, la differenza tra i valori di suzione è quindi da ricercare essenzialmente valutando la significatività delle piogge pregresse; per valutarne l'importanza, quindi, sono state condotte ulteriori serie di simulazioni. Nella prima di esse, sono stati investigati gli effetti indotti in termine di suzione dalle sole piogge del 4 marzo 2005, ipotizzando che in precedenza non ci fosse stato alcun evento di pioggia; l'andamento così ritrovato mostra come i valori di suzione così ottenuti siano molto diversi da quelli precedentemente ricavati con l'intera storia di piogge e come pertanto le precipitazioni pregresse siano estremamente significative.

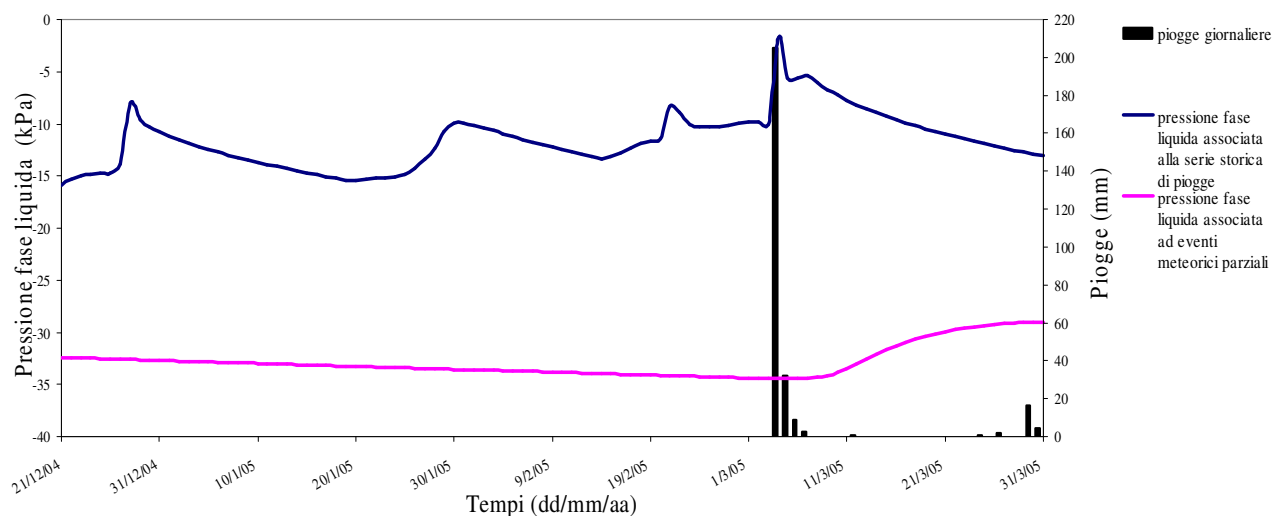


Figura 6 Evoluzione di suzione associata al solo evento scatenante(curva in basso) confrontata con l'evoluzione associata all'intera serie storica di piogge

Successivamente, ripercorrendo a ritroso il periodo marzo-agosto, sono state introdotte progressivamente nelle analisi le altezze di pioggia verificatesi nella realtà fino a riottenere il valore di suzione associato all'intera serie di dati di pioggia.

Il periodo di piogge che si è dovuto considerare per raggiungere tale obiettivo è di poco superiore ai due mesi.

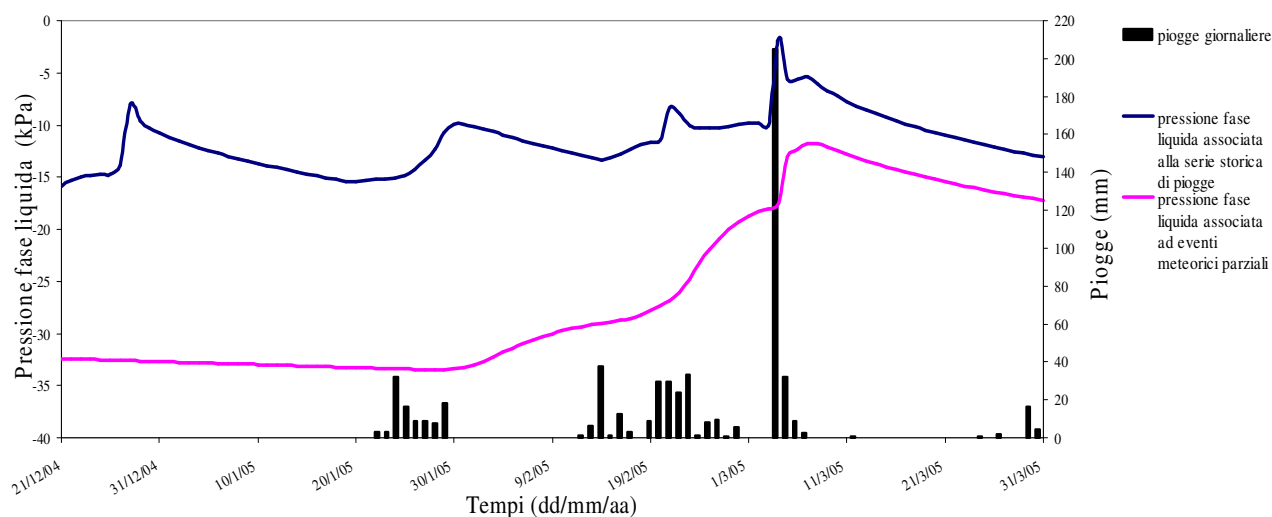


Figura 7 Evoluzione di suzione associata alle piogge degli ultimi 40 giorni (curva in basso) confrontata con l'evoluzione associata all'intera serie storica di piogge

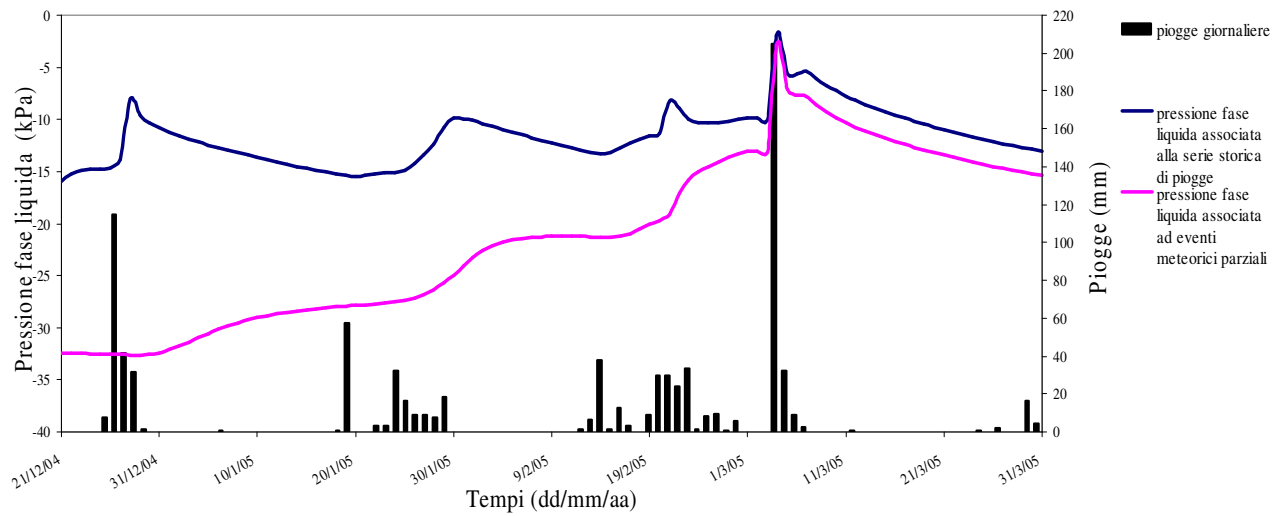


Figura 8 Evoluzione di suzione associata alle piogge degli ultimi 75 giorni (curva in basso) confrontata con l'evoluzione associata all'intera serie storica di piogge



4. Simulazione dei processi di wetting monodimensionale per una colonna di terreno

La seconda simulazione svolta rientra nell'ambito delle attività del progetto MUSE (Mechanics of Unsaturated Soils for Engineering).

Il MUSE è un progetto finanziato dalla Comunità Europea (con durata quadriennale, iniziato nel Dicembre 2004) per lo studio dei terreni parzialmente saturi nell'ambito dell'ingegneria civile.

Esso coinvolge attualmente sei università:

- *Durham University*, Durham, UK
- *Università degli Studi di Trento*, Trento, Italia
- *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Parigi, Francia
- *Universitat Politècnica de Catalunya*, Barcellona, Spagna
- *Glasgow University*, Glasgow, UK
- *Università degli Studi di Napoli Federico II*, Napoli, Italia

mentre sono cinque i partner industriali associati:

- *Geomod*, Svizzera
- *Geotechnical Observations*, UK
- *Provincia di Bolzano*, Italia
- *Terrasol*, Francia
- *Wykeham Farrance Ltd*, UK

Uno delle attività più importanti del progetto è sicuramente il “benchmarking” ad esempio delle tecniche per l'esecuzione dei test di laboratorio e dei codici numerici usualmente utilizzati per lo studio dei terreni parzialmente saturi; nello specifico, tale attività comporta la conduzione in parallelo da parte dei diversi team, di test relativi ad un problema assegnato e il successivo confronto degli output ottenuti. La seconda serie di simulazioni condotte col codice SEEP/W, quindi, ricade nell'ambito di tale attività di “benchmarking” e consiste nella verifica della capacità di un codice numerico di simulare un problema idraulico semplice ossia il wetting di una colonna rigida di terreno con condizione di pressione neutra nulla alla base.

Vengono fissati in fase di definizione del problema:

- la geometria $\Rightarrow$ colonna di terreno rigida di lunghezza $15m$
- la curva di ritenzione idrica (con l'assunzione di un andamento lineare del grado di saturazione in funzione della pressione neutra)



$$S_r = 1 + 0.0045u_w \quad \text{eq. 7}$$

- il valore di permeabilità $k = 10^{-9} m/s$ (assunto quindi in tal caso costante, mentre nella realtà per terreni non saturi è funzione del grado di saturazione e quindi della suzione)
- la porosità $n = 0.46$
- la durata della simulazione pari a $4 * 10^9$ sec *ondi* ≈ 46296 *giorni*
- la condizione iniziale pari a $u_{w0} = 200kPa$ per l'intera colonna.

L'implementazione di tale simulazione tramite il software SEEP/W ha comportato nell'ordine:

- definizione della mesh tramite elementi quadrati ($0.25m * 0.25m$) tutti di uguali dimensioni (ulteriori simulazioni condotte *a latere* hanno mostrato che l'infittimento degli elementi in prossimità del fondo della colonna, in cui è imposta pressione neutra nulla, non comporta sostanziali variazioni nei risultati);
- assegnazione delle caratteristiche idrauliche sopra esposte per il materiale della colonna
- assegnazione delle condizioni al contorno: sul fondo $u_w = 0kPa$, superiormente e ai lati condizione di flusso nullo.

data l'estensione del periodo di analisi, si è reputato opportuno condurre simulazioni separate della durata di un miliardo di secondi ciascuna e per le quali è assunta la condizione finale di un periodo come iniziale per il successivo mentre la condizione iniziale a ($t = 0$) è fornita come risultato di un'analisi stazionaria nella quale a tutti gli elementi della mesh è assegnato un valore di pressione neutra $u_{w0} = 200kPa$ e condizioni ai quattro lati di flusso nullo.

I risultati delle analisi condotte vengono mostrati di seguito; nel primo è riportato l'andamento della pressione neutra nel tempo a quattro altezze fissate:

- $x = 0m$, fondo della colonna;
- $x = 5m$;
- $x = 10m$;
- $x = 15m$, sommità della colonna.

mentre nel secondo si riporta l'andamento della pressione neutra lungo la colonna per istanti temporali fissati (in tale diagramma, con la linea verde è rappresentata l'andamento di pressione neutra per l'ultimo step temporale considerato)

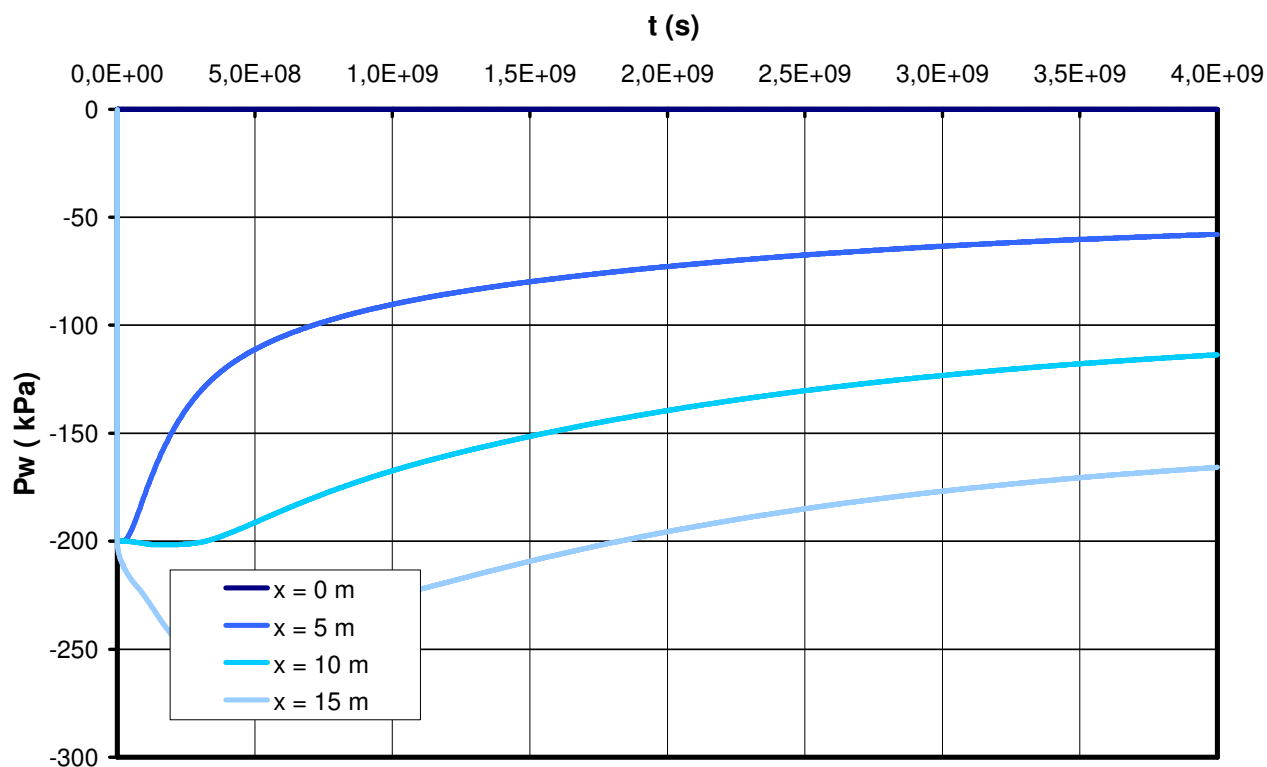


Figura 9 andamento della pressione neutra a varie profondità in funzione del tempo

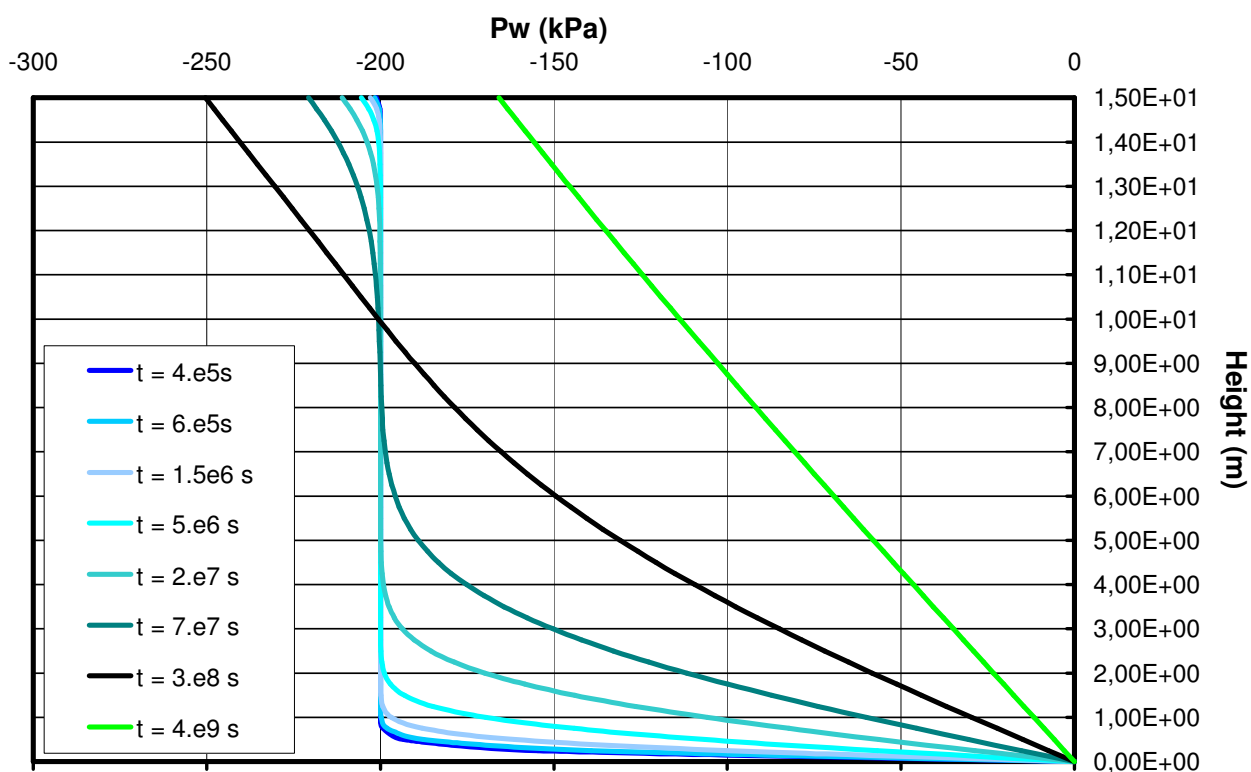


Figura 10 andamento della pressione neutra lungo la colonna per vari istanti temporali



Conclusioni

Le simulazioni, come detto, sono state effettuate tramite il software agli elementi finiti SEEP/W.

I principali vantaggi riscontrati nell'utilizzo del codice sono:

- interfaccia utente di estrema semplicità ed immediato utilizzo per tutte le fasi di implementazione dell'analisi (definizione della mesh, assegnazione delle condizioni al contorno e iniziale, caratterizzazione del mezzo costituente il dominio);
- tempi di calcolo contenuti e possibilità di utilizzo su personal computer di comuni prestazioni;
- essendo parte della suite software **GeoStudio 2004** che integra tutti i prodotti Geo-Slope in un unico ambiente di lavoro (SLOPE/W, CTRAN/W, SEEP/W, SIGMA/W, TEMP/W, QUAKE/W, VADOSE/W) possibilità di effettuare in contemporanea sullo stesso dominio diversi tipi di analisi: trasporto di sostanze nel suolo, modellazione dei processi di filtrazione, analisi dinamica e studio dei terreni sismici, calcolo dei fattori di sicurezza e stabilità dei pendii, analisi dei problemi geotermici e analisi integrata dei problemi riguardanti l'ambiente, la superficie del terreno, il regime delle acque sotterranee e della zona non-satura;

d'altro canto, esso mostra però:

- problemi di gestione dell'analisi qualora i periodi d'analisi siano particolarmente estesi (come nel caso delle simulazioni presentate nel paragrafo 4)
- scarsa capacità di adattamento a specifiche esigenze dell'utente (non è possibile ad esempio introdurre condizioni al contorno diverse da quelle preimpostate); tale limite è frutto essenzialmente della natura commerciale del codice.