

UTILIZZO DI MISURE IN SITO NELLA STIMA DELLA FUNZIONE DI PERMEABILITÀ DI TERRENI PIROCLASTICI

Marianna Pirone, Raffaele Papa, Marco Valerio Nicotera, Gianfranco Urciuoli
Università di Napoli 'Federico II', Dipartimento di Ingegneria edile, civile ed ambientale
marianna.pirone@unina.it; rafpapa@unina.it; nicotera@unina.it; gianurci@unina.it

Sommario

Un'affidabile previsione dell'innesco di colate di fango in pendii parzialmente saturi è fortemente dipendente dalla bontà della caratterizzazione idraulica dei terreni: curva di ritenzione e funzione di permeabilità. In questa nota è proposta una nuova metodologia di stima della curva di permeabilità in pendii di piroclastiti parzialmente sature mediante misure in sito. A tal fine sono stati utilizzati i dati di contenuto d'acqua volumetrico e suzione di matrice registrati nel sito sperimentale di Monteforte Irpino (AV) durante quattro anni di monitoraggio. In particolare stime di permeabilità non satura sono state calcolate applicando l'equazione di bilancio d'acqua in direzione normale ad una colonna stratigrafica semplificata del sito sperimentale. Inoltre la funzione di distribuzione log-normale è stata applicata sia alle permeabilità sature stimate dai dati in sito che a quelle ottenute in laboratorio, già disponibili nell'ambito di un precedente lavoro. Dal confronto delle due distribuzioni si evince che i valori mediani calcolati in sito per tutti i terreni della colonna stratigrafica risultano sempre maggiori di quelli stimati in laboratorio. Pertanto la determinazione della permeabilità satura in laboratorio non è rappresentativa delle reali condizioni idrauliche agenti in sito.

1. Introduzione

E' ben noto che in pendii parzialmente saturi l'infiltrazione sia la principale causa di innesco di colate rapide producendo una diminuzione della resistenza a taglio. La modellazione numerica rappresenta un valido strumento per l'interpretazione dell'innesco e la successiva elaborazione di soglie fisicamente basate a patto che sia disponibile una corretta caratterizzazione idraulica dei terreni.

In questa nota è proposta una nuova metodologia di stima della funzione di permeabilità in pendii di piroclastiti parzialmente sature mediante misure in sito. A tal fine sono stati utilizzati i dati di contenuto d'acqua volumetrico e suzione di matrice registrati nel sito sperimentale di Monteforte Irpino (AV) durante quattro anni di monitoraggio. In particolare stime di permeabilità non satura sono state calcolate applicando l'equazione di bilancio d'acqua in direzione normale ad una colonna stratigrafica semplificata del sito sperimentale. Le funzioni stimate dall'elaborazione di dati in sito sono state confrontate con quelle ricavate da un'analisi inversa delle curve di ritenzione in principale essiccamento ottenute in laboratorio utilizzando il software di calcolo Hydrus 1D (Nicotera et al. 2010). Dal confronto si evince che, specialmente per i terreni superficiali, sussiste una differenza tra le permeabilità in sito rispetto a quelle misurate in laboratorio di poco meno di un ordine di grandezza.

Pertanto, a valle di una breve descrizione del sito sperimentale, sono per prima introdotte le funzioni di permeabilità stimate a partire dalle curve di ritenzione di laboratorio e le permeabilità sature misurate in permeametro saturo. Successivamente è discusso il metodo di stima dei valori di permeabilità in sito e le misure di permeabilità satura effettuate a Monteforte Irpino mediante prove di infiltrazione (ASTM D5126-90, 2004). Infine è effettuato il confronto tra i valori delle mediane delle distribuzioni log-normali rispettivamente dei valori di permeabilità satura stimati in sito e quelli misurati in

laboratorio ed un metodo è suggerito per ottenere funzioni di permeabilità appropriate utilizzando risultati di prove di laboratorio (più facilmente eseguibili) e informazioni provenienti dal monitoraggio in sito.

2. Sito sperimentale

Il sito sperimentale di Monteforte Irpino è ubicato a 40 km ad est di Napoli ($40^{\circ} 54'13.11''N$, $14^{\circ}40'24.21''E$), fu scelto perché inserito nel contesto geologico del Pizzo D'Alvano a cui appartengono i versanti colpiti dagli eventi calamitosi del 1998. Fu investigata un' area di 140 m^2 su un versante di pendenza media pari a 28° (Papa et al., 2013; Pirone et al., 2015); mediante numerosi sondaggi e trincee profonde fu possibile ricostruire un profilo stratigrafico medio costituito da una coltre piroclastica di spessore medio pari a 3,5m su calcare fratturato. La zona fu strumentata lungo 20 verticali disposte su tre allineamenti longitudinali (sez. A-A', B-B', C-C'); tensiometri per la misura della suzioni di matrice furono installati lungo tutte le verticali, sonde TDR per la misura del contenuto d'acqua volumetrico furono disposte alla stessa profondità dei tensiometri soltanto lungo le verticali della sezione centrale. Sul sito sperimentale fu anche installata una stazione meteorologica per la registrazione delle variabili meteorologiche: temperatura ed umidità dell'aria, pioggia, velocità e direzione del vento, radiazione netta. La colonna stratigrafica semplificata, le proprietà fisiche dei terreni e la strumentazione installata lungo le verticali appartenenti alla sezione B-B' del sito sono mostrati in Figura 1.

3. Stima delle curve di permeabilità mediante prove di laboratorio

Nicotera et al., 2010 misurarono in laboratorio le permeabilità sature degli strati cineritici della coltre mediante prove in permeametro e ricavarono le funzioni di permeabilità da curve di ritenzione di principale essiccamento ottenute in laboratorio con una procedura di inversione utilizzando il software Hydrus 1D. In Figura 2 sono riportate: le funzioni di permeabilità per i terreni 1-2, 4, 6 ed 8 nel piano $k-\theta$ (permeabilità-contenuto d'acqua volumetrico), e le permeabilità sature misurate. Le permeabilità sono modellate con la funzione di Mualem –Van Genuchten (Van Genuchten 1980) i cui parametri sono riassunti in Tabella 1.

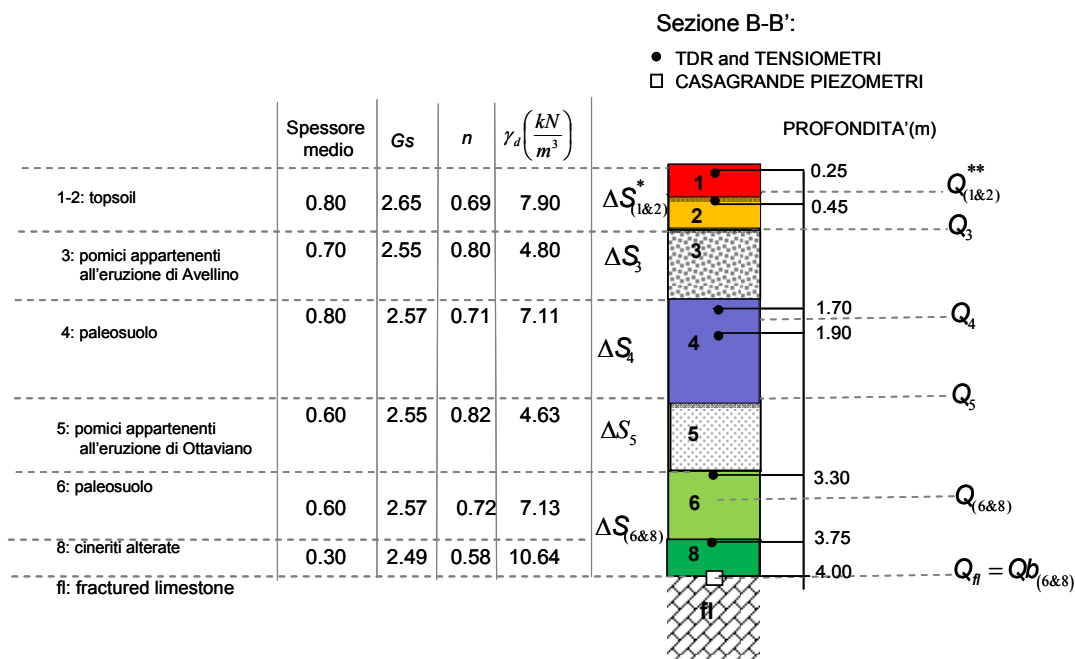


Fig 1. Profilo stratigrafico semplificato, strumentazione installata e proprietà fisiche medie.

Tabella 1. Parametri del modello di Mualem Van Genuchten (da Nicotera et al., 2010)

terreno	θ_{sat}	θ_r	a^{-1}	n	ℓ	K_{sat}
			(kPa)			(m/s)
1	0.565	0.135	8.08	1.716	-1.052	2.13×10^{-6}
2	0.617	0.143	8.72	1.602	-1.054	3.04×10^{-6}
4	0.659	0.164	9.30	1.495	-2.850	6.85×10^{-7}
6	0.669	0.198	13.10	1.645	-2.698	3.08×10^{-7}
8	0.508	0.120	12.20	1.390	-5.707	1.08×10^{-7}

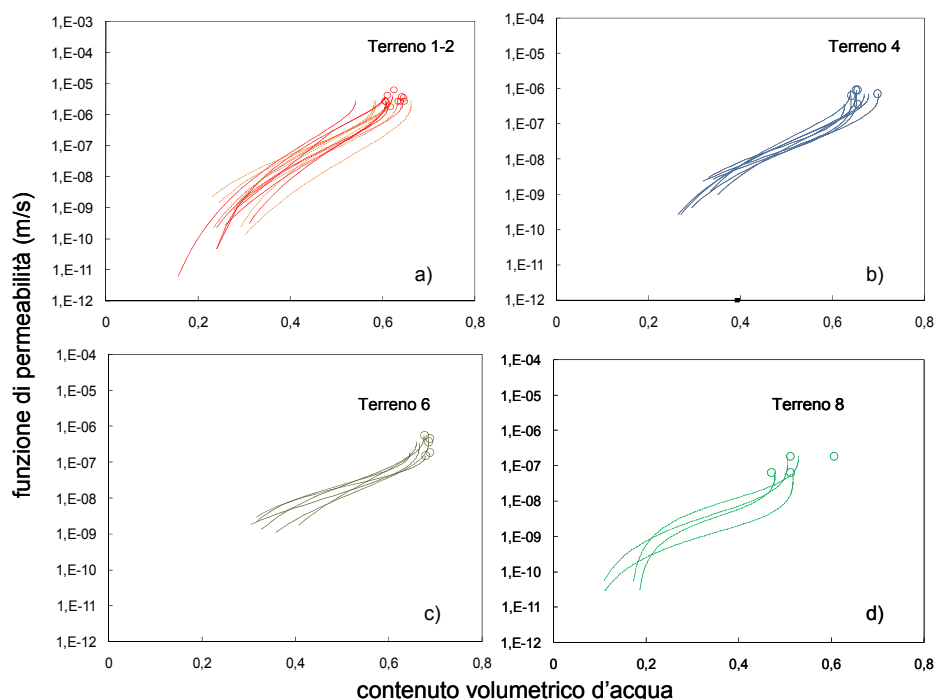


Fig 2. Funzione di permeabilità ottenute mediante analisi inversa delle curve di ritenzione misurate in laboratorio lungo percorsi di principale essiccazione e misure di permeabilità satura in permeametro (simboli vuoti) nei terreni 1-2 (a); nel terreno 4 (b), nel terreno 6(c), nel terreno 8 (d).

3.1 Distribuzione log-normale della permeabilità satura misurata in laboratorio

In accordo con Fenton e Griffiths 2008, i valori di permeabilità satura nel terreno risultano distribuiti secondo una funzione di probabilità log-normale. Tale funzione densità di probabilità è stata applicata alle permeabilità sature misurate in laboratorio (Fig. 4) e i parametri: numero di determinazioni, deviazione standard, media aritmetica, moda e mediana sono riassunti in Tabella 2 per tutti i terreni cineritici della coltre. La moda e la mediana risultano molto simili tra loro specialmente nei terreni 4 e 6; inoltre la mediana diminuisce di un ordine di grandezza nel passare dai terreni superficiali (1-2) a quelli profondi (6-8).

4. Stima delle curve di permeabilità mediante dati in sito

Per la stima delle funzioni di permeabilità in sito sono state utilizzate misure di suzione e contenuto d'acqua registrate alla stessa profondità lungo l'allineamento centrale del campo sperimentale nel periodo autunnale (Fig. 1). Il bilancio d'acqua applicato in direzione normale a ciascun strato della

coltre è stato utilizzato per la stima dei valori permeabilità del terreno in condizioni di parziale saturazione; di seguito, nella sezione 4.1 è discusso in dettaglio il metodo utilizzato.

4.1 Applicazione del bilancio d'acqua

L'equazione di bilancio d'acqua applicata a tutta la colonna di piroclastici in direzione normale (Fig.1) risulta:

$$I - ET_c = \sum_{i=1}^{n_L} \Delta S_i + Q_n \quad (1)$$

in cui: I è l'infiltrazione, ET_c l'evapotraspirazione, ΔS_i , variazione di volume d'acqua nello strato i -esimo nell'intervallo Δt , Q_n il flusso uscente dal bordo inferiore dell'intera coltre.

Nel periodo autunnale, da ottobre a metà novembre, il flusso d'acqua al fondo della coltre è diretto parallelamente al pendio (Pirone et al., 2015), da metà novembre a fine dicembre, la componente normale del flusso al fondo della coltre è diversa da zero, ma è ragionevole assumere che contribuisca quasi interamente all'incremento di contenuto d'acqua interno allo strato stesso. In ogni caso la bontà di quest'ultima assunzione, e quindi la robustezza del metodo di seguito discusso, è verificata in Pirone et al., 2015. A valle di queste considerazioni, Q_n in eq. (1) può essere assunto nullo e l'infiltrazione in autunno provvede prevalentemente un incremento di contenuto d'acqua dell'intera coltre. Pertanto l'eq. (1) diventa:

$$I - ET_c = \sum_{i=1}^{n_L} \Delta S_i \quad (2)$$

Nel generico strato k -esimo in corrispondenza della j -esima verticale di misura il flusso entrante, Q_{kj} , risulta:

$$Q_{kj} = \sum_{i=k}^{n_L} [S_{ij}(t + \Delta t) - S_{ij}(t)] \quad (3)$$

in cui S_{ij} è il volume d'acqua calcolato integrando il contenuto d'acqua volumetrico cumulato nel terreno a partire da una data di riferimento ($t=0$) lungo lo spessore dello strato d_{ij} :

$$S_{ij} = [\theta_{ij}(t) - \theta_{ij}(0)] \cdot d_{ij} \quad (4)$$

Dall'eq. (3) è possibile ricavare la permeabilità non satura per una fissata data di misura e profondità dal piano campagna in funzione delle misure di contenuto d'acqua volumetrico e suzione relative il periodo autunnale:

$$k_{kj} \approx -\frac{1}{i_{kj}^n} \cdot \frac{Q_{kj}}{\Delta t} \quad (5)$$

in cui i_{kj}^n è la componente normale del gradiente nel k -esimo strato in corrispondenza della j -esima verticale (Pirone et al., 2015). Quest'ultima è stata calcolata a partire dalla conoscenza della direzione totale del vettore gradiente idraulico e del modulo della componente verticale ottenuto dalle misure di suzioni in sito in ogni strato lungo ciascuna verticale strumentata. In Figura 3 sono riportati con simboli differenti per ogni verticale strumentata i valori di permeabilità ottenuti dall'eq. (5) rispettivamente nel terreno 1-2, 4, 6 e 8 in funzione del contenuto d'acqua medio misurato nello strato al tempo t e a $t+\Delta t$ (in cui Δt è l'intervallo di tempo tra due misure successive, circa 10 giorni). Osservando la Figura 3, i valori di permeabilità stimati corrispondono ad un intervallo di misure di contenuto d'acqua sicuramente ridotto rispetto a quello investigato in laboratorio; inoltre si rileva una maggiore dispersione delle stime di permeabilità nei terreni superficiali, ciò a causa di possibili fessure superficiali ed irregolarità topografiche che provocano un comportamento del terreno in sito sensibilmente diverso da quello dell'elemento di volume investigato in laboratorio. Anche in questo caso è possibile applicare ai dati con buona approssimazione il modello di Mualem - Van Genuchten, utilizzando i parametri medi ricavati in laboratorio (Tab.1) ma una permeabilità satura evidentemente maggiore.

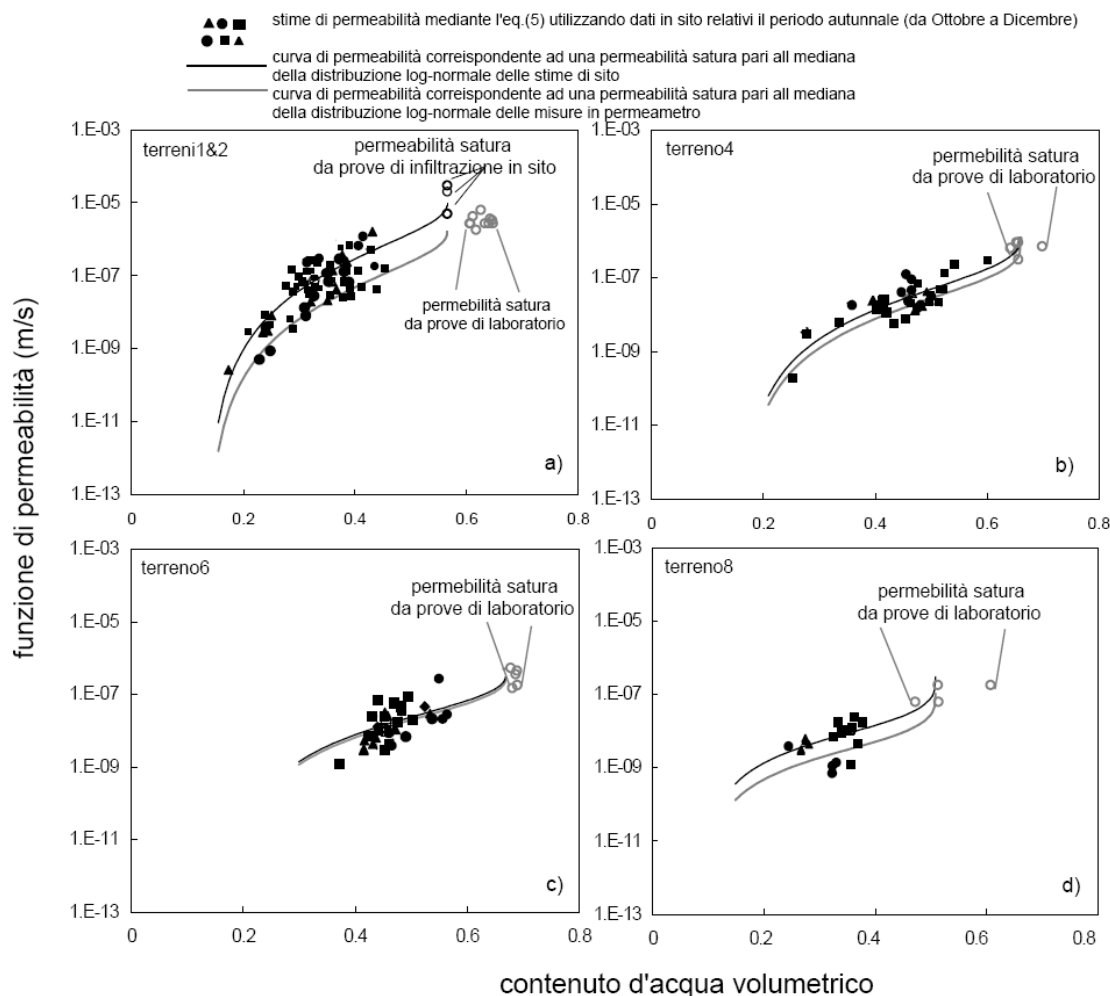


Fig 3. Valori di permeabilità stimati in sito (simboli pieni), permeabilità sature misurate in laboratorio ed in sito (simboli vuoti), funzioni di permeabilità corrispondenti al valore mediano della permeabilità satura stimata in sito (linea nera) ed al valore mediano di quella misurata in laboratorio (linea grigia) nei terreni 1-2 (a), nel terreno 4 (b), nel terreno 6 (c) e nel terreno 8 (d).

4.2 Distribuzione log-normale della permeabilità satura stimata in sito

Una stima di permeabilità satura, k_{sat} , è stata ricavata per ogni valore di permeabilità, k_{ij} , ottenuto dall'eq. (5) imponendo l'appartenenza di ciascun valore k_{ij} ad una funzione di Mualem Van Genuchten i cui parametri sono stati assunti pari ai valori medi misurati in laboratorio (tab. 1). La funzione di distribuzione log-normale è stata applicata alle stime di permeabilità satura sopra citate e i parametri della distribuzione sono riportati rispettivamente in Figura 4 ed in Tabella 2. La deviazione standard e la mediana delle distribuzioni delle permeabilità sature stimate in sito risultano maggiori in tutti i terreni di quelle delle distribuzioni delle misure di laboratorio. In particolare la permeabilità satura di sito nei terreni 1 e 2 è maggiore di quella di laboratorio di 4 volte, di due volte nel terreno 4, di 1.2 per il terreno 6 e di 3 per il terreno 8. Questo evidenzia che prove di laboratorio in evaporazione ed essiccamento non sono sufficienti per ricavare una funzione di permeabilità che realmente caratterizza il comportamento idraulico dei terreni in sito, dal momento che la permeabilità satura di laboratorio sottostima quasi certamente quella reale.

4.3 Misura in sito della permeabilità satura

In sito sono state effettuate misure di permeabilità satura nei terreni superficiali 1-2 mediante prove d'infiltrazione in un infiltrometro a doppio anello (ASTM D5126-90, 2004). I valori misurati sono

riportati in Figura 3 mediante simboli circolari neri vuoti; il valore mediano della distribuzione log-normale delle permeabilità stimate dalle misure in sito è contenuto nell'intervallo individuato dalle misure in sito ($5 \cdot 10^{-6}$ - $3 \cdot 10^{-5}$)(Fig.4). Questo conferma, almeno per i terreni superficiali, che le permeabilità sature stimate in sito mediante il metodo discusso al paragrafo 4.1 risultano affidabili. In Tabella 3 sono riassunti gli intervalli di permeabilità satura stimati per gli strati cineritici della coltre ed i metodi utilizzati.

Tabella 2. Parametri della distribuzione log-normale della permeabilità satura

		N (#)	σ (m/s)	μ (m/s)	moda (m/s)	mediana (m/s)
terreno 1&2	Lab.	10	0.94	2.9E-06	9.0E-07	2.3E-06
	Sito	73	1.04	1.6E-05	2.7E-06	9.6E-06
terreno 4	Lab.	5	0.39	7.2E-07	6.0E-07	6.8E-07
	Sito	36	0.75	1.6E-06	6.2E-07	1.2E-06
terreno 6	Lab.	5	0.56	3.4E-07	2.2E-07	3.0E-07
	Sito	36	0.83	5.2E-07	1.9E-07	3.6E-07
terreno 8	Lab.	4	0.60	1.2E-07	7.0E-08	1.1E-07
	Sito	21	0.99	4.20E-07	1.1E-07	3.00E-07

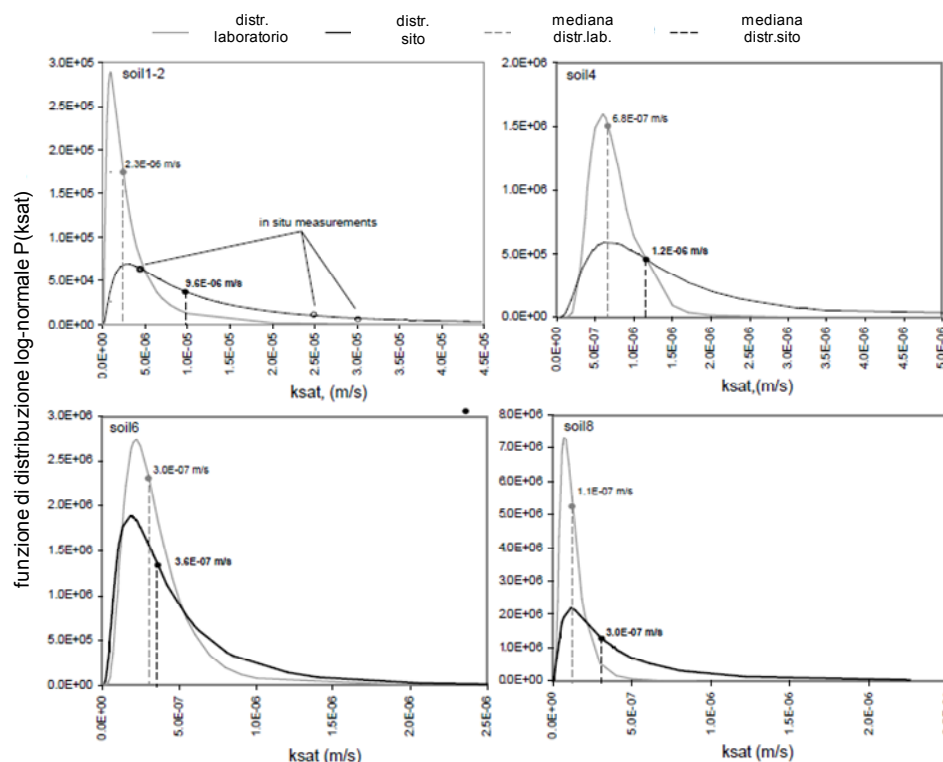


Fig 4. Funzione di distribuzione log-normale della permeabilità satura misurata in laboratorio e stimata dai dati di sito nei terreni 1-2 (a); terreno 4 (b); terreno 6 (c); terreno 8 (d).

5. Conclusioni

I valori di permeabilità del terreno in condizioni di parziale saturazione ottenuti mediante l'elaborazione di misure in sito risultano collocati sempre al di sopra delle funzioni di permeabilità determinate in laboratorio. In particolare dal confronto delle distribuzioni log-normali applicate ai valori di permeabilità satura misurate in laboratorio ed ai valori stimati in sito, si evince che il valore mediano calcolato in sito nei terreni 1 e 2 è 4 volte maggiore di quello di laboratorio, nel terreno 4 è

due volte maggiore, nel terreno 6, 1.2 e nel terreno 8, 3 volte. Pertanto la misura della permeabilità satura sull'elemento di volume non rappresenta il reale comportamento idraulico del terreno in sito e non può essere utilizzata in modelli numerici per ottenere previsioni affidabili dell'innescò di colate di fango in pendii di piroclastiti parzialmente sature. Per una stima corretta della curva di permeabilità, potrebbe essere utilizzato il modello di Mualem Van Genuchten attribuendo ai parametri i valori medi ricavati in laboratorio mentre alla permeabilità satura una misura in sito mediante prove di infiltrazione.

Tabella 3. Intervalli di permeabilità satura e metodi di stima

terreno	metodo	descrizione	K_{sat} ($10^{-7}m/s$)
1&2	misura in laboratorio	Intervallo tra la misura minima e massima	1.82-63.7
	stima da misure in sito	Intervallo tra i valori corrispondenti al valore di distribuzione log-normale cumulata del 5% e del 95%	15.80-580
	Test di infiltrazione in sito	Intervallo tra la misura minima e massima	50.00-300
4	misura in laboratorio	Intervallo tra la misura minima e massima	3.64-9.08
	stima da misure in sito	Intervallo tra i valori corrispondenti al valore di distribuzione log-normale cumulata del 5% e del 95%	3.40-41.00
6	misura in laboratorio	Intervallo tra la misura minima e massima	1.52-5.47
	stima da misure in sito	Intervallo tra i valori corrispondenti al valore di distribuzione log-normale cumulata del 5% e del 95%	0.92-14.00
8	misura in laboratorio	Intervallo tra la misura minima e massima	0.64-1.82
	stima da misure in sito	Intervallo tra i valori corrispondenti al valore di distribuzione log-normale cumulata del 5% e del 95%	0.58-15.00

Bibliografia

- ASTM D5126-90 (2004). Standard Guide for Comparison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in the Vadose Zone. DOI: 10.1520/D5126-90R04.
- Fenton G.A, Griffiths D.V. (2008). Risk Assessment in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons.
- Nicotera M.V., Papa R., Urciuoli G., (2010). An experimental technique for determining the hydraulic properties of unsaturated pyroclastic soils. *Geotech.Test. J* 33, 4, 263-285.
- Papa R., Pirone M., Nicotera M.V., Urciuoli G., (2013). Seasonal groundwater regime in an unsaturated pyroclastic slope. *Geotechnique* 63, 5, 420-426.
- Pirone M., Papa R., Nicotera M.V., Urciuoli G. (2015). In situ monitoring of the groundwater field in an unsaturated pyroclastic slope for slope stability evaluation. *Landslides*, 12, 2 (2015), 259-276 .Doi: 10.1007/s10346-014-0483-z.
- Pirone M., Papa R., Nicotera M.V., Urciuoli G. (2015). Soil water balance in an unsaturated pyroclastic slope for evaluation of soil hydraulic behaviour and boundary conditions. *Journal of Hydrology*, in press.
- Van Genuchten M. T., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils , *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 892-898.