

## INDAGINE SPERIMENTALE SULLE MISURE DI SITO ED IN LABORATORIO DELLE CARATTERISTICHE DI RITENZIONE DEI TERRENI ARGILLOSI

Carmine Gerardo Gragnano

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[carmine.gragnano2@unibo.it](mailto:carmine.gragnano2@unibo.it)

Guido Gottardi

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[guido.gottardi2@unibo.it](mailto:guido.gottardi2@unibo.it)

Marco Bittelli

*Dipartimento di Scienze Agrarie, Università di Bologna*  
[marco.bittelli@unibo.it](mailto:marco.bittelli@unibo.it)

### Sommario

Un accurato studio sperimentale è stato condotto sulla base dei risultati di prove di laboratorio e delle misure raccolte in un sito opportunamente strumentato al fine di indagare le proprietà di ritenzione tipiche di terreni argillosi aventi caratteristiche espansive. In particolare, tale studio si inserisce nel contesto dell'analisi delle variazioni volumetriche associate a cambiamenti del contenuto naturale d'acqua in terreni argillosi nella coltre attiva di terreno (active zone), che sono spesso causa dell'insorgere di cedimenti differenziali delle fondazioni superficiali e delle conseguenti manifestazioni di fessurazioni e dissesti, anche gravi. Nella nota sono presentate le metodologie adottate a supporto dell'indagine, descrivendo le tipologie di prove di laboratorio condotte ed il sistema di monitoraggio posto in opera in un campo prove avente le finalità di studiare la risposta volumetrica di terreni argillosi parzialmente saturi; è inoltre illustrato un confronto tra dati e misure raccolte nello studio sperimentale finora condotto in laboratorio ed in sito.

### 1. Introduzione

Lo studio del comportamento deformativo delle argille espansive è di fondamentale importanza nella previsione e nella prevenzione dell'insorgenza di cedimenti differenziali che frequentemente interessano strutture fondate su tali tipologie di terreni (McKeen et al. 1990); variazioni del contenuto naturale d'acqua nella coltre attiva di terreno, che assume caratteristiche variabili a seconda delle specifiche condizioni geotecniche-ambientali e può localmente raggiungere profondità fino a 5/6 metri (e.g. Nelson et al., 2001, Carbonella et al., 2011), dovute a cambiamenti climatici di carattere stagionale possono innescare fenomeni di ritiro-rigonfiamento che hanno un significativo impatto sulla funzionalità delle opere di fondazione ed infrastrutture coinvolte e sono potenziale causa di manifestazioni dannose sia per la stabilità che per la manutenzione di tali opere. Per un accurato inquadramento del fenomeno è indispensabile un'attenta caratterizzazione delle proprietà di ritenzione dei terreni ed una chiara comprensione della relativa risposta meccanica in condizioni di parziale saturazione.

Ciò premesso, un'approfondita analisi sperimentale delle caratteristiche idrauliche e meccaniche delle argille espansive nel campo del non saturo è stato intrapreso con l'obiettivo di apportare un contributo di conoscenza al problema, di validare il funzionamento delle attuali tecnologie di indagine e di testare adeguate strategie di consolidamento di tali terreni. Un sito sperimentale ubicato in un terreno

dell’Azienda Agraria dell’Università di Bologna, ad Ozzano dell’Emilia (provincia di Bologna, figura 1) è stato specificatamente selezionato ed opportunamente strumentato per studiare in dettaglio il problema; si tratta di un’area di circa 4000 m<sup>2</sup>, con piano campagna sufficientemente regolare per permettere la costruzione materiale del campo prove.

Un diffuso sistema di monitoraggio è già in funzione in campo da un periodo maggiore di un completo ciclo stagionale; tale sistema include delle sonde di misura del contenuto d’acqua e di suzione a diverse profondità, oltre che di temperatura del terreno. In particolare, per la misura del contenuto d’acqua del terreno sono state poste in situ sonde FDR (Sentek EnviroSCAN) e TDR, mentre per la misura della suzione sono state installate sonde HD e Tensiometri (Jet Fill). Un rilievo topografico è stato effettuato in diversi momenti del periodo di monitoraggio per la valutazione degli spostamenti superficiali e profondi del terreno. In parallelo, prove di laboratorio sono state condotte per investigare le caratteristiche fisiche, meccaniche, idrauliche e di ritenzione dello strato di argilla superficiale individuato in situ. I risultati ottenuti dall’esecuzione di tali prove sono necessari al fine di assicurare un’opportuna calibrazione della strumentazione di sito e per garantire un’opportuna caratterizzazione del terreno indagato.



Figura 1 – Ubicazione del sito, località Cà del Rio, Ozzano dell’Emilia (BO): 44°26'06.67''N; 11°28'56.19''E. le sezioni indicate in figura 1 fanno riferimento al modello geotecnico riportato nel seguito in figura 3.

## 2. Materiali indagati

Una diffusa campagna di indagine geotecnica basata sull’esecuzione di sondaggi e prove penetrometriche statiche con piezocono è stata condotta per la caratterizzazione delle successioni stratigrafiche del sottosuolo del campo prove. Campioni di terreno rimaneggiati sono stati usati per ricavarne le principale proprietà tessiturali e fisiche. Provini di terreno indisturbati ottenuti con l’ausilio di un campionatore Shelby e conservati in camera ad umidità controllata sono stati destinati all’esecuzione di prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche meccaniche, idrauliche e di ritenzione. I dati di contenuto d’acqua e di suzione discussi nella presente nota provengono da misure di sito e da prove di laboratorio effettuate sullo stesso tipo di terreno, un’argilla limosa inorganica di elevata plasticità. In Tabella 1 sono riportate le principali proprietà fisiche e tessiturali di tale terreno; la distribuzione granulometrica è stata costruita sulla base della classificazione USCS. Il modello geotecnico del sottosuolo del sito sperimentale è costituito da uno strato abbastanza omogeneo di tale materiale avente spessore fino a 6-8 metri, con locale presenza di sottili lenti di materiale limo-sabbioso; la falda è stata individuata ad una profondità media di 5 metri dal p.c..

Tabella 1. Proprietà fisiche e tessiturali del terreno indagato

Soil sample	Profile depth	Unit dry weight	SL	PL	LL	IP	G <sub>S</sub>	G	S	M	C	O
#	(m)	kN/m <sup>3</sup>	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	3,05 - 3,09	16,13										
2	3,09 - 3,11	15,56										
3	3,11 - 3,14	15,65	10,5	24,0	79,4	55,4	2,76	1,7	2,8	35,5	60,0	4,2
4	3,14 - 3,17	15,59										
5	3,17 - 3,20	15,58										

### 3. Metodologie sperimentali

Le proprietà di ritenzione dei terreni oggetti del nostro studio sono state determinate sulla base dei dati provenienti dalle prove di laboratorio condotte su provini indisturbati prelevati ad una profondità compresa tra 3,20 e 3,50 m dal p.c.; i risultati ottenuti sono confrontati con le misure accoppiate di contenuto d'acqua e di suzione provenienti dalla strumentazione di monitoraggio messa in opera nel sito sperimentale.

#### 3.1 Sperimentazione di laboratorio

La sperimentazione di laboratorio è stata condotta mediante due disintre tipologie di test che si basano rispettivamente sull'utilizzo del metodo di evaporazione e del punto di rugiada.

In particolare, il metodo di evaporazione, per la cui esecuzione si è utilizzata l'apparecchiatura HYPROP (figura 2), si basa sulle misure in continuo ed in contemporanea di suzione e contenuto d'acqua di un provino di terreno portato a saturazione e poi lasciato evaporare liberamente attraverso la superficie superiore. I risultati di tale prova, introdotta inizialmente da Wind (1968) e di cui sono state proposte modifiche da diversi autori (e.g. Tamari et al., 1996), sono usati per la stima della curva di ritenzione in prossimità della saturazione e per bassi livelli di suzione (fino 60-80 kPa).

Per un'accurata determinazione delle proprietà di ritenzione del terreno ad alti livelli di suzione, si è utilizzato il metodo del punto di rugiada, che consiste nella misura dell'umidità relativa alla quale si raggiunge il punto di rugiada all'interno di una camera chiusa in cui è contenuto il provino di terreno; alla temperatura di equilibrio, l'umidità relativa è in diretta relazione con il livello di suzione totale. Tale metodo è stato utilizzato per la determinazione della parte secca della curva di ritenzione, per valori di suzione fino a 50-70Mpa, mediante l'apparecchiatura WP4-T. Accoppiando i risultati ottenuti da questi due esperimenti è stato possibile ottenere un set di dati sufficiente alla determinazione completa della curva di ritenzione del materiale studiato.

Preliminarmente all'esecuzione di tali prove, la misura della curva di ritenzione idrica è stata effettuata anche tramite l'uso dei metodi tradizionali dei Letti di Stackman (per i punti della curva più vicini alla saturazione) e le piastre in pressione di Richards (per i punti intermedi della curva). Il modello adottato per la stima della curva di ritenzione è quello di van Genuchten (1980), largamente diffuso nella pratica ingegneristica, che fornisce il valore del grado di saturazione,  $S_e$ , in funzione della suzione,  $s$ , tramite la seguente formulazione:

$$S_e(s) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \cdot s)^n} \right]^m$$

dove  $\theta$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  sono rispettivamente il contenuto volumetrico d'acqua attuale, residuo e saturo, mentre

$\alpha$ ,  $n$  ed  $m$  sono i parametri di forma della curva, dipendenti dal punto di inflessione e dalla pendenza; si sottolinea che in questa nota si è assunta tra i parametri  $n$  ed  $m$  la seguente relazione di dipendenza:

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Le misure ottenute con la procedura descritta precedentemente sono state dunque interpolate con l'equazione proposta da van Genuchten per la determinazione dei parametri della curva di ritenzione. L'algoritmo di fitting usato è stato scritto in linguaggio Python basandosi sulla minimizzazione della somma dei minimi quadrati (Bittelli, 2015). In tabella 2 sono riportati i valori dei parametri medi della curva di van Genuchten ottenuti dalle diverse prove di evaporazione e di punto di rugiada eseguite su provini provenienti da profondità comprese tra 3,20 e 3,50 m.



Figura 2 – Apparecchiatura HYPROP: il dispositivo, costituito dal sensore di pressione (nero) sormontato dal campione di suolo contenuto nell’anello di acciaio, in cui sono inseriti i tensiometri (a sx), poggia sulla bilancia da laboratorio (a dx); i risultati delle misure sono esposti in forma grafica e tabellare su PC attraverso il software tensioVIEW.

Tabella 2. Parametri della curva di van Genuchten ottenute dai dati delle prove di evaporazione e del punto di rugiada

Set dati	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$m$
#	( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	( $\text{kPa}^{-1}$ )	(-)	(-)
Media	0,696	0,000	0,147	1,135	0,119

### 3.2 Misure in situ di suzione e di contenuto d’acqua

Nel sito sperimentale di Ozzano dell’Emilia (BO) è stato posto in opera un sistema di monitoraggio in grado di misurare varie grandezze fisiche a differenti profondità. Sonde FDR e sonde TDR sono state utilizzate per la misura del contenuto volumetrico d’acqua a profondità comprese tra 1,0 e 3,5 metri dal p.c.; il principale vantaggio dell’utilizzo delle sonde FDR Sentek EnviroSCAN consiste nel fornire dati in continuo a diverse profondità per una medesima verticale, a fronte di una tecnologia di installazione relativamente semplice, risultando dunque molto versatili. Le sonde TDR garantiscono, invece, un risultato più affidabile, avendo già trovato grande utilizzo in numerosi casi di studio ed essendo le equazioni di calibrazione proposte in letteratura (Topp et al., 1984) di comprovata precisione; per tale motivo, si è anche deciso di sovrapporre due stazioni di misura FDR e TDR. Per la misura della suzione si sono utilizzati Tensiometri di tipo Jet Fill, operanti a profondità di 1,0 m dal p.c., e sonde a dissipazione di calore HD, installate a profondità di 2,5 m e 3,5 m dal p.c. ed in prossimità dei punti di misura delle sonde FDR e TDR. Per ognuna delle sonde HD è stata effettuata specifica calibrazione. In figura 3 è mostrato il modello geotecnico del sito sperimentale ricostruito per due sezioni, per la cui individuazione si fa riferimento alla figura 1.

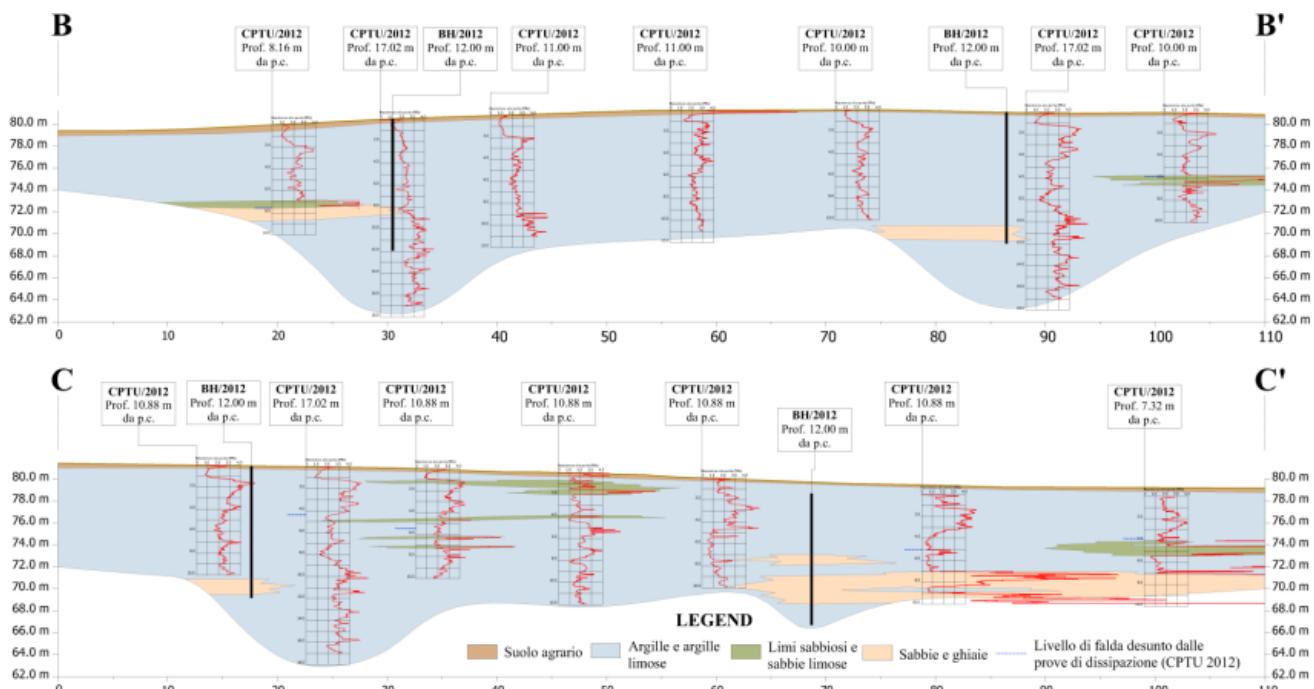


Figura 3 –Modello geotecnico del sottosuolo ricostruito per il campo prove a partire da due sezioni indagate (posizionate come indicato in figura 1).

In figura 4 sono mostrati i dati di contenuto d'acqua e di suzione misurati da due sonde TDR e due sonde a dissipazione di calore HD e installate alla profondità di 2,5 metri dal p.c. e da un sensore di una sonda FDR ed un tensiometro installati alla profondità di 1,0 m dal p.c.; ciascuna misura di contenuto d'acqua e di suzione relative alla medesima profondità fanno riferimento ad una specifica verticale di installazione. Le coppie suzione-contenuto d'acqua misurate allo stesso punto sono state successivamente plottate insieme con la curva di essiccamento principale ottenuta dai risultati delle prove di laboratorio eseguite su provini dello stesso tipo di terreno. L'interpretazione dei dati in situ deve necessariamente tener conto che i diversi strumenti utilizzati in campo non sono installati esattamente lungo la stessa verticale, che operano con differenti tempi di risposta ed, inoltre, che localmente la tessitura e le proprietà di ritenzione del terreno indagato in situ potrebbero differire da quello di laboratorio. Tali condizioni, già osservate da diversi autori (Papa et al., 2013) rendono le misure in situ di utile confronto con quelle di laboratorio, ma non consentono un'univoca individuazione dei percorsi di imbibizione-essiccamento a cui è soggetto il terreno ne una precisa caratterizzazione delle sue proprietà di ritenzione ed idrauliche.

#### 4. Discussione dei risultati

Nella presente nota vengono discussi i dati ottenuti da prove di laboratorio e monitoraggio di sito con lo scopo di stimare le caratteristiche di ritenzione di un terreno argilloso; l'individuazione della curva di essiccamento principale è stata effettuata accoppiando i risultati delle prove di evaporazione e di punto di rugiada, condotte entro intervalli di suzione appropriati, ottenendo grazie alla loro sovrapposizione una metodologia valida ed accurata. Dall'analisi dei risultati si è potuto osservare che le coppie di valori suzione-contenuto d'acqua relative alle misure di sito ricadono quasi sempre al di sotto della curva principale di essiccamento. È inoltre possibile ricondurre a rami di umidificazione alcuni dei percorsi individuati in situ, a riprova del fatto che il terreno monitorato ha già subito continui cicli di umidificazione ed essiccamento e pertanto i valori di suzione e di contenuto d'acqua si collocano su rami di scansione. Le proprietà di ritenzione associate alla definizione dei parametri del

modello di van Genuchten tramite le prove di laboratorio, invece, fanno riferimento esclusivamente ai percorsi di essiccamento principali; indicazioni relative ai processi di imbibizione ed, in generale, all'isteresi idraulica possono essere parzialmente dedotte dalle informazioni ricavate dalle misure di sito, che tuttavia sono affette da incertezze legate alle prestazioni degli strumenti ed alle disomogeneità locali che ne impediscono un'univoca e corretta interpretazione, come peraltro si è visto da alcune coppie di valori suzione-contenuto d'acqua misurati in sito che ricadono al di sopra della curva di essiccamento principale di laboratorio.

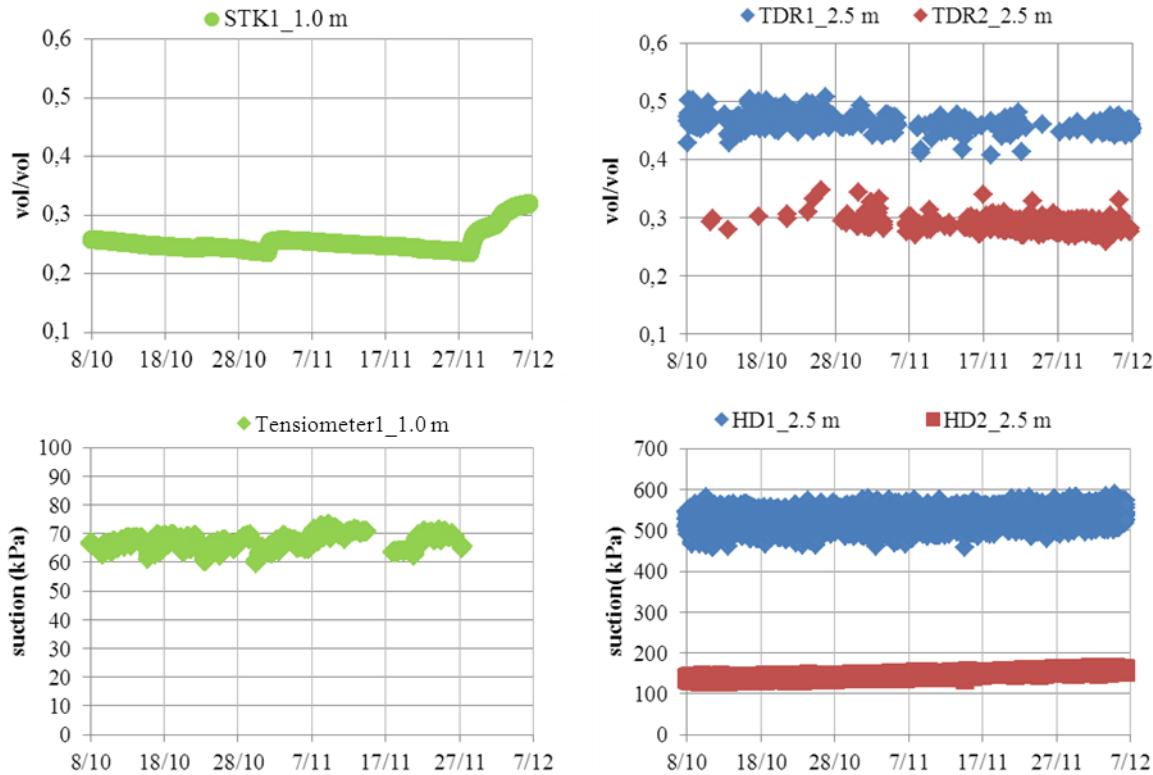


Figura 4 – Misure di contenuto d'acqua (grafici in alto) e di suzione (grafici in basso) effettuate in situ tramite sonde FDR (a sx), TDR (a dx), tensiometro (a sx) ed HD (a dx).

## Bibliografia

Bittelli M., Campbell G.S., Tomei F. (2015), Soil physics with Python, Transport in the Soil-Plant-Atmosphere system, Oxford University Press.

Carbonella R., Cenni G., Franceschini M., (2011), Stabilizzazione di terreni argillosi soggetti a fenomeni di ritiro e rigonfiamento: un intervento eseguito su un fabbricato dissestato sito a Bologna, XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica – AGI (Napoli).

McKeen R.G., Johnson L.D. (1990), Climate-Controlled Soil Design Parameters for Mat Foundation, J. Geotech. Eng., 116(7):1073-1094.

Nelson J.D., Overton D.D., Durkee D.B. (2001), Depth of wetting and the active zone, Proc. Conf. Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundation, 95-109.

Papa R., Pirone M., Nicotera M.V., Urciuoli G., (2013), Seasonal groundwater regime in unsaturated pyroclastic slope, Geotechnique 63, No. 5:420-426.

Tamari S., Bruckler L., Halbertsma J., Chadoeuf J., (1993), A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory, Soil sci. Soc. Am. J., 57:642-651.

Topp G.C., Davis J.L., Bailey W.G., Zebchuck W.D., (1984), The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe, Can. J. Soil Sci., 64:313-321.

van Genuchten, M. Th. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 4(5):892-898.

Wind G.P., (1968), Capillary conductivity data estimated by a simple method, Water in Unsat. Zone, 1:181-191.