

## **STIMA DELLA COESIONE APPARENTE IN UN RILEVATO ARGINALE DA PROVE SCPT**

Francesca Ceccato  
*DICEA – Università di Padova*  
*Francesca.ceccato@dicea.unipd.it*

Marco Uzielli  
*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze*  
*Georisk Engineering S.r.l., Firenze*  
*marco.uzielli@unifi.it*

Paolo Simonini  
*DICEA – Università di Padova*  
*paolo.simonini@unipd.it*

### **Sommario**

L'interpretazione delle prove penetrometriche statiche (CPT) eseguite nei rilevati arginali è complicata dal fatto che i terreni sono parzialmente saturi e le comuni formule empiriche adottate per la determinazione dei parametri di resistenza non sono applicabili. Questo articolo presenta una procedura per stimare la coesione in terreni parzialmente saturi a partire da prove CPT e ne illustra l'applicazione alle misure ottenute da 16 prove SCPT condotte su un argine del fiume Panaro. Si applica inoltre una regressione sui quantili, che permette di ottenere stime del parametro  $c$  per diversi valori di probabilità di superamento. I risultati di questo studio possono quindi offrire un supporto per il miglioramento della caratterizzazione dei terreni e la valutazione della sicurezza delle strutture arginali.

### **1 Introduzione**

La prova penetrometrica statica (CPT) è un eccellente strumento per la caratterizzazione dei terreni perché offre indiscutibili vantaggi di rapidità d'esecuzione, ripetibilità, costo contenuto e affidabilità. Numerose correlazioni sono state proposte per la determinazione del tipo di materiale e la stima dei parametri meccanici, ma esse sono prevalentemente ottenute analizzando depositi naturali saturi. Il numero di studi che hanno esplicitamente considerato l'effetto della parziale saturazione nell'interpretazione delle prove CPT è limitato.

La resistenza alla punta dipende, oltre che dalle proprietà meccaniche del terreno, anche dallo stato tensionale, che a sua volta è influenzato dalla suzione, ovvero dal contenuto d'acqua e dal grado di saturazione. Trascurare l'effetto della parziale saturazione può portare ad una scorretta interpretazione del tipo di terreno e stima dei parametri meccanici, si veda ad es. Giacheti et al. (2019) e Lo Presti et al. (2016). Questo ha un evidente impatto sulla successiva valutazione dei fattori di sicurezza dei rilevati costruiti con questi materiali.

In prima approssimazione, si può assumere che l'effetto della suzione sia quello di incrementare la resistenza del terreno con una coesione apparente ( $c''$ ), che dipende dalle caratteristiche del materiale e dallo stato di saturazione. Nei rilevati arginali, tale parametro può variare su intervalli piuttosto ampi a causa dell'eterogeneità dei materiali e della variabilità del grado di saturazione che spesso caratterizzano queste strutture. Di conseguenza, valori molto cautelativi vengono spesso adottati per le analisi di stabilità, ma senza una valutazione quantitativa della variabilità medesima.

In questo articolo, viene presentata una procedura per stimare la coesione totale ( $c=c'+c''$ , somma della coesione efficace  $c'$  e di quella apparente  $c''$ ) a partire dalla resistenza alla punta ( $q_c$ ) basata sulla teoria della capacità portante secondo l'approccio di Durgunoglu and Mitchell (1973) (Sez. 2). Tale procedura viene poi applicata alle misure ottenute da 16 prove penetrometriche condotte su un argine del fiume Panaro interessato da una rotta nel dicembre 2020 (Sez. 3). Le prove sono molto ravvicinate fra loro al fine di valutare l'eterogeneità del materiale su scala ridotta. I valori di coesione ottenuti sono stati elaborati mediante una regressione sui quantili, che permette di ottenere stime del parametro  $c$  per diversi livelli di probabilità di superamento. Tale approccio è affine al concetto di valore caratteristico introdotto dalla normativa ed ha un'evidente importanza dal punto di vista ingegneristico.

I risultati di questo studio possono quindi offrire un supporto per il miglioramento della caratterizzazione dei materiali e la valutazione della sicurezza delle strutture arginali.

## 2 Effetto della coesione apparente sulla resistenza alla punta

In letteratura sono stati proposti diversi modelli costitutivi per simulare il comportamento dei terreni parzialmente saturi, uno dei più utilizzati è l'approccio di Vanapalli et al. (1996), che esprime la resistenza al taglio come

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c' + sS_{eff} \tan \varphi \quad (1)$$

Dove  $\sigma$ =tensione totale,  $s$ =suzione,  $\varphi$ =angolo d'attrito,  $S_{eff} = (S_r - S_{res}) / (S_{sat} - S_{res})$ =grado di saturazione effettivo,  $c'$ =coesione efficace. In questo modello, la parziale saturazione introduce essenzialmente una coesione apparente corrispondente al termine  $c'' = sS_{eff} \tan \varphi$ .

Nel caso delle arginature del fiume Panaro, l'angolo d'attrito varia in un intervallo ridotto (fra 30° e 32°), ma il prodotto  $sS_{eff}$  mostra un'ampia variabilità poiché dipende dal contenuto d'acqua del terreno, fortemente influenzato dalle condizioni ambientali, e dalla curva di ritenzione del materiale, che cambia a seconda dei cicli di imbibizione-essiccamento e dipende fortemente dalla granulometria, mineralogia e grado di compattazione del materiale. Ne risulta un'ampissima variabilità di  $c''$ , per cui, a favore di sicurezza, valori molto bassi della coesione vengono di norma utilizzati per le analisi di stabilità coi metodi all'equilibrio limite. È quindi evidente che una migliore conoscenza della distribuzione di questo parametro risulta di grande aiuto.

Sono disponibili molte correlazioni per la stima dell'angolo d'attrito nei terreni a grana grossa e della coesione non drenata nei terreni a grana fine, ma pochissimi studi hanno considerato l'effetto di coesione e attrito in condizioni di parziale saturazione su  $q_c$ . Tra i diversi approcci teorici applicati per modellare la resistenza alla punta, uno dei più semplici è quello basato sulla teoria della capacità portante, che, nonostante trascuri la compressibilità del terreno, appare un solido punto di partenza per indagare l'effetto della parziale saturazione. Secondo l'approccio di Durgunoglu and Mitchell (1973) la resistenza alla punta in un terreno dotato di coesione e attrito è data dalla relazione

$$q_c = cN_c \xi_c + \gamma B N_{\gamma q} \xi_{\gamma q} \quad (2)$$

dove  $c=c'+c''$  è la coesione totale,  $N_c$  e  $N_{\gamma q}$  sono i coefficienti di capacità portante,  $\xi_c$  e  $\xi_{\gamma q}$  sono fattori di forma,  $B$ =diametro del cono,  $\gamma$ =peso di volume del terreno. I coefficienti di capacità portante dipendono dall'angolo d'attrito del terreno ( $\varphi$ ), dall'angolo d'attrito all'interfaccia cono-terreno ( $\delta$ ), dal coefficiente di spinta laterale ( $K$ ) e dalla profondità relativa ( $m=z/B$ ).

Dall'Eq. 2 è possibile ricavare la coesione totale assumendo dei valori ragionevoli degli altri parametri coinvolti.

### 3 Descrizione delle indagini geotecniche

Nell'ambito delle indagini geotecniche svolte per l'individuazione delle cause della rotta dell'argine del fiume Panaro nel dicembre 2020, sono stati eseguiti nelle immediate vicinanze della breccia: 7 stendimenti geoelettrici (ERT), 12 CPTU, 2 SCPTU, 2 DMT e 2 sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di 11 campioni indisturbati dei quali 4 nel corpo arginale (profondità 1m e 4m) e 7 in fondazione (Fig 1). Su tali campioni sono state eseguite prove di laboratorio per la caratterizzazione dei terreni, la stima dei parametri di resistenza meccanica, la misura della permeabilità e, per i materiali soggetti a parziale saturazione, la determinazione delle curve di ritenzione e di conducibilità idraulica. Inoltre, al fine di investigare più nel dettaglio l'eterogeneità della struttura arginale, in un tratto a circa 200m di distanza sono state eseguite 16 SCPT distanziate fra loro solo 2.50m, profonde 5m e con misura della velocità delle onde di taglio ogni 0.25m. Nello stesso tratto di argine sono stati eseguiti stendimenti ERT e FDEM per una ricostruzione tridimensionale della struttura arginale. In questo articolo, l'attenzione è focalizzata sull'analisi della resistenza alla punta.

Il corpo arginale è costituito da una miscela di sabbia e limo con quasi totale assenza di frazione argillosa plastica. Le percentuali di sabbia variano dal 23% al 64% mentre quelle di limo variano dal 30% ad un massimo del 72%. I pesi di volume variano fra 16.4 e 19.2kN/m<sup>3</sup> con saturazioni fra 20% e 80%. La fondazione è anch'essa costituita da sabbie limose e limi sabbiosi fino ad una profondità di circa 15m dalla sommità arginale oltre la quale si trova uno strato di limo argilloso.

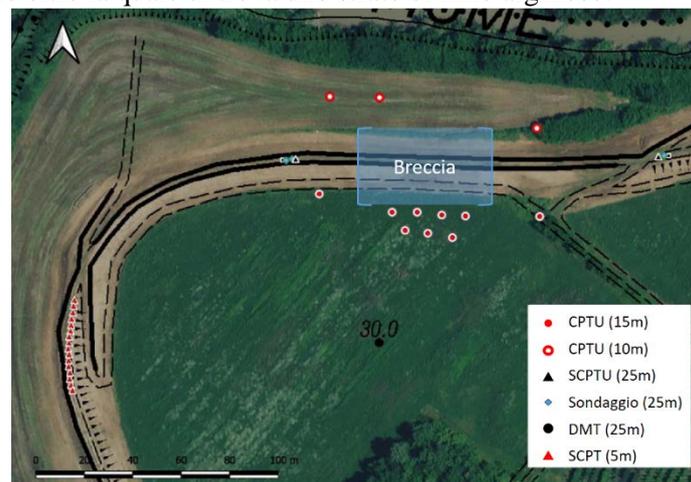


Fig 1 Ubicazione delle indagini geotecniche

### 4 Elaborazione dei dati

I risultati delle prove SCPT sono mostrati in Fig 2 a-c, in cui la linea continua rappresenta il valore medio del parametro e le bande grigie definiscono una deviazione standard dalla media. L'elaborazione dei dati è stata effettuata attraverso il software Matlab® (Mathworks 2020) e si è articolata nei seguenti punti, meglio descritti in seguito:

1. Pulizia dei dati con rimozione dei valori ottenuti per velocità di avanzamento non comprese nel range  $2.0 \pm 0.5$  cm/s. Questo passaggio è necessario perché l'avanzamento del cono si interrompe per effettuare la misura di  $V_s$ .
2. Lisciatura (smoothing) dei dati applicando una media mobile con una finestra di 40cm
3. Identificazione delle unità stratigrafiche omogenee (USO) con la procedura descritta nel paragrafo 4.1
4. Stima della coesione come descritto nel paragrafo 4.2
5. Determinazione dei valori di coesione corrispondenti a prefissate probabilità di non superamento come illustrato nel paragrafo 4.3

#### 4.1 Identificazione unità omogenee

Volendo identificare le unità omogenee che costituiscono il rilevato, si è anzitutto calcolata la resistenza media alla punta per ciascuna profondità sulle 16 verticali, e da queste si è ricavata la resistenza alla punta normalizzata  $Q_m$  (Fig 2d); successivamente è stato calcolato il coefficiente di variazione ( $COV=\sigma/\mu$ , rapporto fra la deviazione standard  $\sigma$  e la media  $\mu$ ) su una finestra mobile di 40cm per la resistenza alla punta normalizzata  $Q_m$  (Fig 2e). All'interfaccia fra diverse unità omogenee ci si attende un picco di COV (Uzielli and Vannucchi 2005); il valore di soglia considerato per individuare tale interfaccia è stato posto a 0.15.

$Q_m$  è calcolato con l'Eq. 3, dove l'esponente  $n$  è funzione dell'indice di materiale  $I_c$  come illustrato da (Robertson 2009),  $\sigma_{v0}$ =tensione verticale totale,  $p_a$  = pressione atmosferica e  $\sigma'_{v0}$ = tensione verticale efficace, in cui si tiene conto della suzione attraverso l'Eq. 4

$$Q_{tn} = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{p_a} * \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (3)$$

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} + sS_{eff} \quad (4)$$

Nell'Eq. 4 la suzione  $s$  è calcolata assumendo distribuzione lineare sopra la quota di falda freatica e  $S_{eff}$  è stimata assumendo una tipica curva di ritenzione per questi materiali come ricavata dalle prove di laboratorio.

Sono state identificate due USO (Fig 2e):

- Unità A: compresa fra 0.30 e 1.80m, costituisce un ringrosso arginale formato da sabbia limosa ben compattata
- Unità B: compresa fra 2.40 e 5.00m, costituisce il corpo arginale di sabbia limosa e limo sabbioso meno compatto dell'unità A.

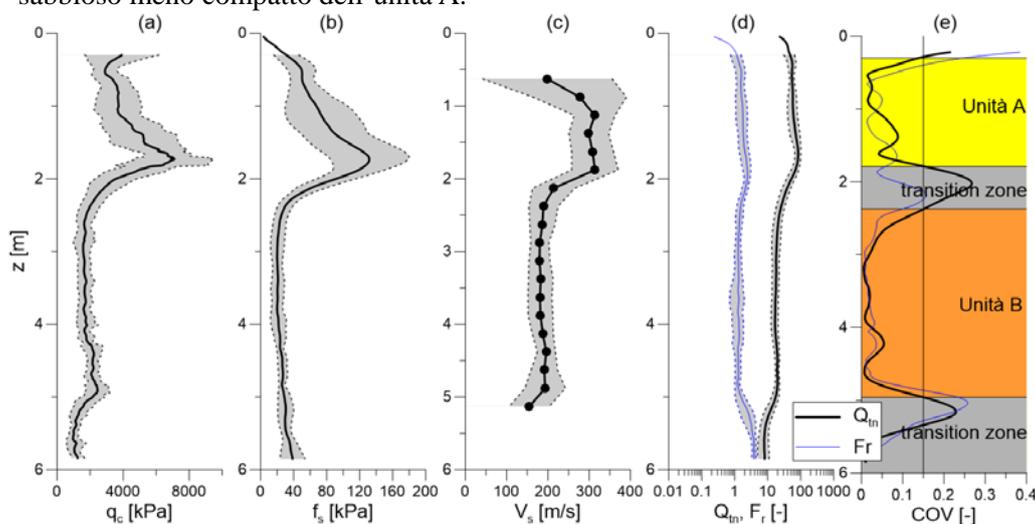


Fig 2 Risultati delle prove SCPT e identificazione USO. L'area grigia compresa fra le linee tratteggiate indica l'intervallo di valori a meno di  $\sigma$  dalla media  $\mu$

#### 4.2 Stima della coesione

Noti  $\phi$ ,  $\delta\phi$ ,  $K$ , e  $\gamma$ , dalla misura di  $q_c$  è possibile ricavare una stima della coesione totale  $c$  risolvendo l'Eq. 2. I valori assunti come riferimento per le USO A e B sono riportati in Tabella 1, e sono stati ricavati dalle prove di laboratorio sui campioni indisturbati ( $\phi$ ,  $\gamma$ ), dai risultati del dilatometro ( $K$ ) e da stime di letteratura ( $\delta\phi$ ).

Bisogna osservare che con questo approccio non si tiene conto dell'errore del modello, né dell'incertezza nella stima dei suoi parametri di ingresso. Di conseguenza, si ottengono anche valori negativi della coesione, che però non hanno significato fisico. Tali punti sono quindi dati dalla combinazione

dell'errore di misura, dell'errore del modello e dei valori parametri assunti come deterministici. Valori di coesione negativi vengono comunque considerati nell'elaborazione successiva per non alterare artificialmente la distribuzione dei dati.

Tabella 1 Parametri deterministici assunti nell'Equazione 2

	$\varphi$ [°]	$\delta/\varphi$ [-]	$K$ [-]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Unità A	32	0.3	0.8	18.7
Unità B	30	0.3	0.5	17.5

### 4.3 Caratterizzazione probabilistica della coesione

La caratterizzazione probabilistica della coesione viene svolta mediante regressione sui quantili, una tecnica di regressione che consente la stima dei coefficienti di un modello arbitrariamente assegnato corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza senza assumere per essa una particolare distribuzione condizionata. Tale approccio è evidentemente affine al concetto di valore caratteristico introdotto dalla normativa, tuttavia la sua applicazione in ambito geotecnico è limitata (Uzielli et al. 2019b; a; Uzielli and Mayne 2019). Considerando un modello di risposta per la variabile coesione scritto come

$$c = g(\theta, x) \quad (5)$$

Dove  $\theta$  è il vettore dei parametri del modello,  $c$  è il vettore delle  $N$  osservazioni della variabile dipendente (coesione) e  $x$  è il vettore delle  $N$  osservazioni della variabile indipendente (profondità), la regressione per il quantile  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) è definita come la soluzione del problema di minimizzazione

$$\min \sum_{i=1}^N f_{LP} \cdot \lambda \quad (6)$$

con

$$f_{LP}(\lambda_i) = \frac{|\lambda_i| + (2\omega - 1)\lambda_i}{2} \quad (7)$$

$$\lambda_i = c_i - g(\theta_\alpha, x_i) \quad (8)$$

Sono stati considerati tre tipi di modello:

- Costante:  $c_\alpha = a_{0\alpha}$
- Lineare:  $c_\alpha = a_{0\alpha} + a_{1\alpha}z$
- Parabolico:  $c_\alpha = a_{0\alpha} + a_{1\alpha}z + a_{2\alpha}z^2$

e per ciascuno sono state calcolate tre probabilità di non-eccedenza  $\alpha = 5\%$ ,  $50\%$  e  $95\%$ . I coefficienti ottenuti dall'analisi sono riportati in Tabella 2 e i risultati sono plottati in Fig 2.

Tabella 2 Risultati dei coefficienti dei modelli di regressione sui quantili

Modello		Unità A			Unità B		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%
Costante	$a_0$	32.0	58.53	117.7	-2.2	10.3	30.8
Lineare	$a_0$	17.5	34.9	60.2	14.2	15.7	55.2
	$a_1$	17.2	26.0	41.6	-4.3	-1.5	-7.2
Parabolico	$a_0$	56.2	58.6	56.2	76.8	83.1	165.1
	$a_1$	52.0	-32.8	52.0	-40.8	-38.9	-68.5
	$a_2$	-4.8	29.5	-4.83	5.2	4.9	8.2

Dai 4 campioni indisturbati prelevati nel corpo arginale durante i sondaggi alle profondità di 1m e 4m, sono state ricavate le curve di ritenzione e misurato il grado di saturazione dei campioni, da cui si può ottenere una stima della coesione apparente noto l'angolo d'attrito ( $c'' = sS_{eff} \tan \varphi$ ). I valori ottenuti

in questo modo sono inseriti in Fig 2 con rombi blu. Si può notare che la stima è ragionevolmente concorde coi valori ottenuti dal piezocono.

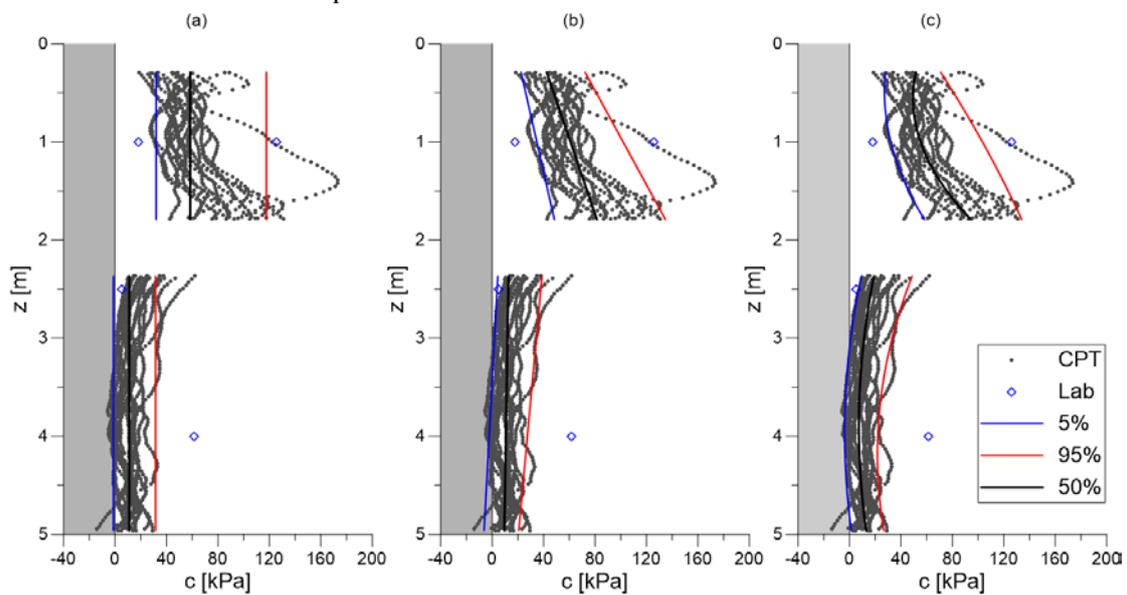


Fig 3 Stima della coesione con la profondità e regressione sui quantili per funzione costante (a), lineare (b) e parabolica (c)

## 5 Conclusioni

L'interpretazione dei risultati delle prove CPT sui rilevati arginali non è semplice perché i terreni si trovano in condizioni di parziale saturazione e l'applicazione delle usuali formule empiriche per la determinazione dei parametri meccanici non è raccomandabile, infatti la suzione introduce una coesione apparente nel materiale. La stima della coesione può essere fatta applicando l'Eq. 2 i cui coefficienti possono essere calcolati assumendo valori ragionevoli  $\varphi$ ,  $\delta/\varphi$ ,  $K$ , e  $\gamma$ , questo richiede l'uso di altre indagini o valori di letteratura.

Questa procedura è stata applicata ai dati provenienti dall'arginatura del fiume Panaro, dove i risultati appaiono in accordo anche con la stima della coesione apparente ottenuta dal laboratorio.

Nel caso in esame era disponibile una significativa quantità di dati che ha permesso anche l'applicazione della regressione dei quantili determinando valori di coesione corrispondenti a specifiche probabilità di non-eccedenza. Questi valori sono di grande utilità nella scelta dei parametri da utilizzare per le analisi di stabilità delle arginature stesse.

## 6 Bibliografia

- Durgunoglu, H. T., and Mitchell, J. K. (1973). *Static penetration resistance of soil. For NASA Grant NGR 05-003-406: Lunar Soil Properties and Soil Mechanics, Space Sciences Laboratory Series.*
- Giacheti, H. L., Bezerra, R. C., Rocha, B. P., and Rodrigues, R. A. (2019). "Seasonal influence on cone penetration test: An unsaturated soil site example." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Elsevier Ltd, 11(2), 361–368.
- Lo Presti, D. C. F., Giusti, I., Cosanti, B., Squeglia, N., and Pagani, E. (2016). "Interpretation of CPTu in 'unusual' soils." *Rivista Italiana di Geotecnica*, 50(4).
- Robertson, P. K. (2009). "Interpretation of cone penetration tests — a unified approach." *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337–1355.
- Uzielli, M., and Mayne, P. W. (2019). "Probabilistic assignment of effective friction angles of sands and silty sands FROM CPT using quantile regression." *Georisk*, Taylor & Francis, 13(4), 271–275.
- Uzielli, M., and Vannucchi, G. (2005). "Investigation of correlation structures and weak stationarity using the CPT soil behavior classification index." *Earthquake*, 5(1), 925–930.
- Uzielli, M., Zei, M., Facciorusso, J., and Madiati, C. (2019a). "Probabilistic Estimation of Linear and Volumetric Strain Thresholds for Italian Clays." *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference*, 4300–4307.

- Uzielli, M., Zei, M., and J. Cassidy, M. (2019b). “Probabilistic Assignment of Design Undrained Shear Strength Using Quantile Regression.” *Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, 188–193.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W. (1996). “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction.” *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392.