

La valutazione dei parametri di progetto dei terreni sulla base dei risultati di prove in sito: metodologie a confronto.

Claudio Cherubini¹, Giovanna Vessia^{1*}

¹Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Bari, c.cherubini@poliba.it

¹Autore corrispondente. Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Bari, (Campus Universitario) - Via Orabona, 4 – 70125 Bari, FAX: 080 5963675, g.vessia@poliba.it

Estimation of soil parameters in geotechnical design by means of field tests: methodologies in comparison

ABSTRACT: Physical and mechanical characterization of soils and rocks is affected by natural heterogeneity which can be detected in space and time. This occurrence is responsible of lack in representativeness of design parameter values for geotechnical structures which rely on soil and rock resistance. It is worth noticing that, on such basis, another variable should be taken into account in geotechnical designing that is variability of parameter. This means that mechanical and physical properties can be treated as random variable whose probabilistic characterization should be undertaken. Such approach should recognize the following issues: investigated volume of soil/rock by in situ and laboratory experimental campaigns is often limited respect to the volume involved by design; uncertainties related to the testing procedure and transformation model from measured data to design parameter should be quantified. In this paper the most relevant tools of probabilistic approach to soil and rock characterization are presented.

Key terms: Random variable, soil characterization, probabilistic approach.

Termini chiave: Variabilità, caratterizzazione dei terreni, approcci probabilistici.

Riassunto

I terreni e le rocce, essendo materiali naturali sono caratterizzati da significativa variabilità spaziale e per i terreni finì anche da variazioni temporali che ne condizionano la risposta. A causa di queste variabilità l'uso dei valori nominali dei parametri di progetto delle opere a contatto con il terreno risulta inadeguato a cogliere l'incertezza della risposta del complesso terreno-struttura prevalentemente in termini di resistenze. È opportuno quindi introdurre un nuovo approccio nella determinazione dei parametri di progetto delle opere geotecniche che tenga conto delle seguenti considerazioni: i dati che vengono tratti da prove in sito, ed ancora più da quelle di laboratorio, sono relativi ad una parte molto piccola dell'insieme di terreno che viene interessato dall'opera; le incertezze dovute alle procedure di prova ed alle leggi di trasformazione che consentono di passare dai dati rilevati a parametri significativi del terreno devono essere quantificate. Nel lavoro presentato si riportano alcuni importanti risultati degli approcci probabilistici che consentono di spiegare come il tenere conto della variabilità possa dare maggior qualità alla progettazione, su basi di affidabilità.

Introduzione

I terreni e le rocce sono caratterizzati da significativa variabilità spaziale dovuta al naturale processo di

formazione ed eventualmente di degradazione. La conseguenza di questa variabilità è che spesso i parametri di progetto delle opere a contatto con il terreno, tenendo conto solo dei valori nominali delle proprietà dei terreni, danno risultati inadeguati.

La prima considerazione che da svolgere è relativa al fatto che i dati che vengono tratti da prove in sito, ed ancora più da quelle di laboratorio, sono relativi ad una parte molto piccola dell'insieme di terreno che viene interessato dall'opera. Il secondo riguarda le incertezze dovute alle procedure di prova ed alle leggi di trasformazione che consentono di passare dai dati misurati ai parametri di progetto del terreno. In modo sintetico si può dire che la variabilità, che è possibile leggere dall'esame dei risultati di una serie di prove su un terreno considerato litologicamente omogeneo, è dato dalla somma della variabilità intrinseca, degli errori di misura e dell'incertezza del modello di trasformazione. All'interno di ogni sottoclasse è possibile svolgere alcuni approfondimenti che, se non conosciuti, possono portare ad una caratterizzazione non corretta.

Un cenno agli approcci probabilistici consentirà di spiegare come il tenere conto della variabilità possa dare maggior qualità alla progettazione, su basi di affidabilità e non sulla base di un coefficiente di sicurezza onnicomprensivo di tutte le variabilità ed incertezze in maniera indistinta.

Campionamento

In ogni processo conoscitivo delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, il volume di terreno campionato è molto piccolo rispetto al cosiddetto “volume significativo”. Tale rapporto (Cherubini e Orr, 1999) può essere considerato variabile da 10^{-4} a 10^{-6} . Evidentemente ciò è legato ai problemi di costi e di tempo, ma troppo spesso tali problemi condizionano in maniera preponderante le scelte di numerosità e posizione dei punti di misura che dovrebbero condurre ad una migliore caratterizzazione dell'ammasso. Per dirlo con altre parole è come se volessimo conoscere le opinioni di 50 milioni di italiani intervistandone da 50 (minimo) a 5000 (massimo). Appare quindi evidente come questa fase di indagine sia oltremodo delicata e quindi tale da richiedere un'attenzione che spesso viene negata.

Variabilità ed incertezza

Sulla base di quanto introdotto, per i terreni naturali, è possibile operare una distinzione fra variabilità ed incertezza.

Si definisce incertezza epistemica la non perfetta conoscenza di una qualsivoglia proprietà del terreno dovuta, ad esempio, ad un campionamento limitato, a possibili errori nelle procedure, all'imprecisione degli strumenti, ad errori aleatori di misura, a modelli di trasformazione che, nella interpretazione dei risultati delle prove in sito, sono affetti da errori di interpolazione ed approssimazione. Questo tipo di incertezza, con campagne di indagini e prove adeguate per quantità e qualità, si può ridurre anche se non è possibile eliminarla.

Si definisce variabilità naturale o intrinseca la circostanza che in un materiale naturale e quindi non sottoposto a processi per così dire “di confezionamento standardizzato” le proprietà fisico-meccaniche variano più o meno sensibilmente da punto a punto.

Questa variabilità non solo non può essere ridotta, ma presenta una struttura che viene spesso ignorata sebbene si adottino modelli di calcolo spesso troppo sofisticati rispetto alla ridotta qualità dei dati di input. In questo processo di caratterizzazione dei terreni le tecniche statistiche e probabilistiche assumono un ruolo fondamentale. Nel seguito si cercherà di evidenziarne gli aspetti peculiari.

Il trattamento dei dati

Nel trattamento dei set di dati ottenuti dalle misure condotte in laboratorio ed in sito è necessario puntualizzare le differenze in termini di incertezze:

- Le prove di laboratorio possono risentire degli effetti di campionamento e confezionamento del provino, ma producono dati in condizioni, per così dire, “controllate”. Un inconveniente è legato alla limitata numerosità dei dati.
- Le prove in sito sono certamente più rapide

nell'esecuzione e possono produrre misure praticamente continue (ad es. le CPT) ma risentono in modo notevole del già citato “modello di trasformazione” quando da un dato di lettura si vuol pervenire ad un parametro operativo (ad es. per passare dalla misura di resistenza alla punta q_c alla stima della resistenza a taglio non drenata s_u). Uno dei vantaggi però delle prove in sito è che risulta possibile, con procedure opportune, individuare strati da considerare litologicamente e geotecnicamente omogenei fornendo un valido aiuto ad un riconoscimento stratigrafico spesso svolto su basi visive (basato sulla esperienza del consulente).

Avendo a disposizione un certo numero di misure di un dato parametro e assumendo di aver ridotto al minimo le incertezze in modo che dai dati si possa ricostruire correttamente la variabilità dei terreni, come operare?

Volendo riferirci ad un tratto di terreno litologicamente omogeneo lungo una verticale, la variazione di una data proprietà geotecnica ε può essere espressa come somma di due termini:

$$\varepsilon(z) = t(z) + w(z) \quad (1)$$

dove z rappresenta la coordinata spaziale (spesso la profondità); t rappresenta il trend deterministico e w è la componente fluttuante.

Riguardo alla variazione del valore medio di una grandezza con la profondità ($t(z)$) essa può essere adeguatamente valutata attraverso la detrendizzazione della misura $\varepsilon(z)$. In casi in cui $t(z)$ è costante con la profondità, tale valore assume il ruolo di media. Sia con $t(z)$ costante che con un definito trend con la profondità, espresso attraverso leggi di variazione deterministica della misura di tipo lineare, parabolica, etc., si possono isolare i residui $w(z)$ che invece sono caratterizzati da una struttura di variabilità da valutare.

I residui, indicati anche come fluttuazioni, possono in via generale essere individuati mediante un indicatore statistico della dispersione intorno alla media (o al trend) che generalmente è costituito dallo scarto quadratico medio. Tuttavia vanno puntualizzati due aspetti:

- Sia la media (o trend) che lo scarto quadratico medio sono, in virtù del sempre limitato numero dei campioni a disposizione, degli stimatori più o meno distorti (biased) della media e dello scarto quadratico medio veri.
- La possibile presenza di valori cosiddetti anomali (Barnett e Lewis, 1984; Cherubini et al., 1986) può condurre non solo ad ulteriori effetti distorcenti sulla media ma ad effetti ancor più evidenti sullo scarto quadratico medio.

Nell'eventualità dell'individuazione di valori anomali con una delle numerose tecniche a disposizione (ad es. quella di Chauvenet da Taylor, 1990 ed il Box plot Tukey, 1977; Velleman e Hoaglin, 1981) va ponderata la scelta di eliminarli o meno. È comunque possibile utilizzare degli indicatori di tendenze centrali e di dispersione tali da

minimizzare o annullare gli effetti di tali valori anomali.

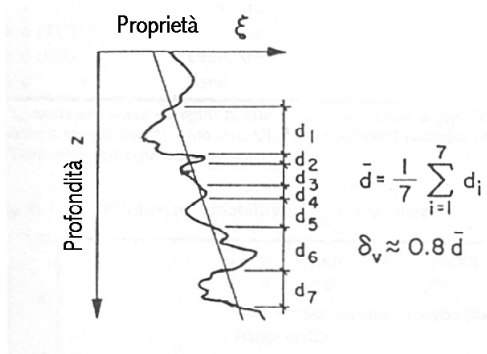


Figura 1. Metodo approssimato per la valutazione della scala di fluttuazione (Da Vanmarcke, 1977).

Estimation method for scale of fluctuation (After Vanmarcke, 1977).

Ritornando alla scomposizione fra trend deterministico e fluttuazione, si può definire come scala (o passo) di fluttuazione δ quella distanza entro la quale i valori della componente fluttuante $w(z)$ mostrano una struttura di autocorrelazione ben definita. Numerosi sono i metodi per la stima di δ . Un metodo di prima approssimazione fa riferimento alla Fig. 1 (Vanmarcke, 1977), dove si rappresenta la distanza tra due intersezioni successive d e d_m è la media di esse, mentre il passo di fluttuazione vale:

$$\delta \cong \frac{1}{\sqrt{\pi/2}} d_m = 0.8 \cdot d_m \quad (2)$$

A seguito della ricerca di parametri statistici quali media (μ) e scarto quadratico medio (σ) si può affermare che l'ammasso di terreno esaminato, pur con tutte le incertezze e problematiche precedentemente solo tratteggiate, è pronto per essere utilizzato nei modelli di calcolo o verifica. Appare ovvio come nei modelli direttamente deterministici sia richiesto un solo valore per ciascun parametro di input che, considerato come caratteristico può tenere conto della variabilità attraverso un valore generalmente penalizzato mediante opportune ipotesi sulla distribuzione statistica dello stesso (Eurocodice7, 1997, Schneider, 1997, Cherubini e Orr, 1999). Una modellazione probabilistica di primo livello, utilizzata fino a pochi anni fa, prevedeva l'uso della sola media e dello scarto quadratico medio per la valutazione di un Indice di Affidabilità β correlato alla probabilità di collasso p_f . Tali tecniche semplificate, però, conducevano a valori di probabilità di collasso estremamente elevati e comunque non in linea, in termini di ordini di grandezza, con le frequenze di collasso riscontrabili in situazioni analoghe. L'introduzione del passo di fluttuazione e quindi di tecniche di riduzione della varianza nell'ottica della teoria dei campi aleatori (Vanmarcke, 1983) ha consentito di ottenere risultati più veritieri.

È opportuno, sulla base delle esperienze dei numerosi autori che si sono cimentati nel campo, mostrare alcuni valori effettivamente riscontrati dei coefficienti di variazione ($COV = \sigma/\mu$) e del passo di fluttuazione (δ), collegandoli per quanto possibile alle tipologie di terreno ed alle tecniche di prova.

Valori di Coefficienti di Variazione e di Scale di Fluttuazione da letteratura

Nelle seguenti tabelle e figure si intendono solo evidenziare, in termini reali, le variabilità precedentemente esposte, senza che ai dati riportati si possa attribuire valore generalizzabile, essendo gli stessi non abbastanza.

Tabella 1 Dati di variabilità intrinseca per alcune grandezze misurate con prove in situ (Da Phoon e Kulhawy, 1999).

Coefficient of Variation from inherent variability calculated for measured parameters from in situ tests (After Phoon and Kulhawy, 1999).

Prova	Proprietà	Terreni	COV intrinseca (%) Campi di variazione
CPT	q_c	Sabbie	10-81
CPT	q_c	Argille limose	5-40
CPT	q_T	Argille	2-17
VST	s_u	Argille	4-44
SPT	N_{SPT}	Sabbie	19-62
SPT	N_{SPT}	Argille, torbe	37-57

Nella Tab. 1 vengono riportati i dati di media e di Coefficiente di Variazione di alcuni parametri di resistenza di argille, sabbie e limi riportati da Phoon and Kulhawy (1999). Tali dati mostrano variabilità elevate e diverse al variare della tipologia di terreno considerato. Tale apparente casualità, però, si chiarisce se esaminiamo un parametro, ad es. ϕ' , e riportiamo in un diagramma cartesiano i punti relativi al valore medio ϕ' rispetto al suo COV per la variabilità intrinseca (Fig. 2). Si può osservare come praticamente tutti i punti ricadono fra due curve relative ad uno scarto quadratico medio variabile tra 5° e 15°, pur risultando i COV delle argille maggiori di quelle dei limi e di quelli delle sabbie, come già dimostrato da Cherubini (1997).

Tale correlazione fra valore medio e COV però non è valido per altre proprietà come l'indice di plasticità (IP), il limite liquido (w_L), ed il limite di plasticità (w_P).

Se invece consideriamo la variabilità totale (Fig. 3) si osserva come, pur rimanendo tale andamento sostanzialmente rispettato, il numero di punti non compresi tra le due curve è più elevato. In Tab. 2, sono riportati i valori della variabilità intrinseca di alcune proprietà geotecniche in cui sono indicati gli intervalli di variazione del Coefficiente di Variazione distinti per variabilità totale ed intrinseca.

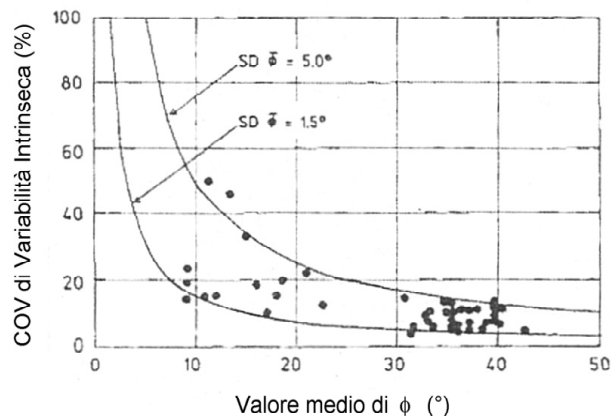


Figura 2. Coefficiente di Variazione calcolato per la componente di variabilità intrinseca dell'angolo di attrito ϕ rispetto al suo valor medio (Da Cherubini, 1997).

Coefficient of Variation of shear resistance angle ϕ calculated on the basis of inherent variability of ϕ (After Cherubini, 1997).

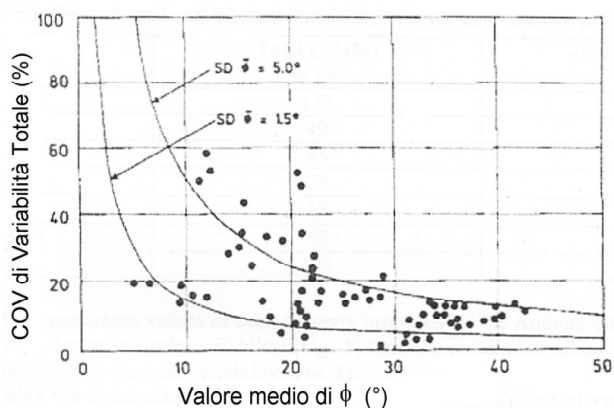


Figura 3. Coefficiente di Variazione calcolato per la variabilità totale dell'angolo di attrito ϕ rispetto al suo valor medio (Da Cherubini, 1997).

Coefficient of Variation of shear resistance angle ϕ calculated on the basis of total variability of ϕ (After Cherubini, 1997).

I valori di tabella indicano che variabilità basse si hanno per i pesi volume, mentre variabilità più elevate si riscontrano a carico della coesione non drenata, che è noto essere sottoposta a maggiori livelli di incertezza legati alla sua determinazione.

In particolare quella orizzontale risulta essere generalmente dell'ordine dei decimetri fino ad alcuni metri, mentre quella orizzontale può raggiungere alcune decine di metri. I dati disponibili, però sono ancora pochi per poter trarre delle conclusioni generali. È idea degli autori che la scala di fluttuazione possa essere definita in valore per ogni formazione geologica, ritenendola in stretta correlazione con gli eventi che ne hanno determinato l'assetto attuale. Questa ipotesi è però tutta da verificare.

Tabella 2. Dati di variabilità totale per alcune proprietà geotecniche (Da Cherubini, 1997).

Coefficient of Variation from total variability calculated for soil properties (After Cherubini, 1997).

Proprietà	COV totale (%) Campi di variazione	COV intrinseca (%) Campi di variazione
w_n	1.69-132.95	7-46
w_l	2.41-48.84	7-39
w_p	0.27-45.00	6-34
γ	0.62-27.90	3-20
ϕ (sabbia)	3-15	5-11
ϕ (argilla)	0.32-87.17	10-55
s_u (argilla)	12.00-145.00	6-56

Per quanto riguarda la scala di fluttuazione si riportano le Tab. 3 e 4 nelle quali si evidenzia come la scala di fluttuazione verticale sia sempre minore di quella orizzontale.

Tabella 3. Scale di fluttuazione orizzontali da letteratura (Da Cherubini, 1997).

Horizontal scale of fluctuation values from literature (After Cherubini, 1997).

Proprietà	Autori	Scala di Fluttuazione Orizzontale δ_h (m)
q_c (da CPT a 7m di profondità)	Keaveny et al. (1989)	24.62
q_c (da CPT a 9m di profondità)	Keaveny et al. (1989)	66.49
Indice di compressibilità C_c	Vanmarcke (1977)	54.86
s_u	Vanmarcke (1977)	46.00
u (da piezocono)	Vickremesinghe & Campanella (1993)	17.75

Metodi statistici di ripartizione stratigrafica

Le tecniche di caratterizzazione considerate finora illustrano gli strumenti di trattamento statistico di misure spaziate condotte in ammassi di terreno o di roccia omogenei. Tuttavia tra gli obiettivi principali della caratterizzazione di un sito vi è quello di ricostruire profili stratigrafici, riconoscere ed evidenziare l'estensione di formazioni omogenee ed i contatti tra formazioni che mostrano caratteristiche fisico meccaniche e statistiche differenti. Convenzionalmente si conducono una serie di misure puntuali dirette quali carotaggi, prove penetrometriche, prove dilatometriche ovvero misure indirette quali le prove geofisiche, che tuttavia vengono allocate in base all'esperienza del progettista più che in base a criteri scientifici.

Tabella 4. Scale di fluttuazione verticali da letteratura (Da Cherubini, 1997). *=Da Quek et al. (1992); **= Terreni di Shanghai.

*Vertical scale of fluctuation values from literature (After Cherubini, 1997). *= After Quek et al. (1992); **= Shanghai soils.*

Proprietà	Autori	Scala di Fluttuazione e Orizzontale δ_h (m)
w_n	Vanmarcke (1977)	1.2
e_0	Vanmarcke (1977)	3.05
N_{SPT}	Vanmarcke (1977)	2.44
s_u	Vanmarcke (1977)	5.00
s_u	Wu (1974)*	0.79
s_u	Matsuo & Asaoka (1977)*	1.25
s_u	Matsuo & Asaoka (1977)*	2.50
s_u	Matsuo & Asaoka (1977)*	1.82
q_c (sabbie)	Alonso & Krizek (1975)	2.20
f_s (sabbie)	Alonso & Krizek (1975)	1.20
q_c (argille)	Alonso & Krizek (1975)	1.00
q_c (argille limose)	Gao & Li (1993)**	0.40-0.80
q_c (argille organiche)	Gao & Li (1993)**	1.00-1.50
q_c (argille grigie)	Gao & Li (1993)**	0.60-1.20
q_c (argille verde scuro)	Gao & Li (1993)**	0.50-0.80
q_c (sabbie fini)	Gao & Li (1993)**	0.25-0.60

Inoltre l'abbondare di dati tematici rilevati da diverse tecnologie satellitari pone il problema di trovare criteri oggettivi e scientificamente fondati per l'ottimizzazione dell'uso delle misure dirette ed indirette. La teoria della probabilità e della statistica possono aiutare la caratterizzazione geologica e geotecnica in due modi:

- Inferire le caratteristiche degli ammassi in sito in corrispondenza di quelle aree che non sono state investigate, ottimizzando la spesa per le indagini in sito ed in laboratorio;
- Individuare in corrispondenza di profili stratigrafici rilevati indirettamente e/o direttamente i contatti che risultano poco distinguibili.

Di seguito sono presentati alcuni dei metodi più utilizzati per l'individuazione dei contatti stratigrafici. Tale attività di caratterizzazione è più strettamente connessa alla progettazione di fondazioni ed opere di sostegno.

Tutti i metodi che diversi autori hanno proposto si basano sul trattamento della variabilità residua cioè sul trattamento del data set relativo alle misure spaziali della singola proprietà geotecnica dopo la detrendizzazione e la verifica della debole stazionarietà del campo aleatorio costituito dalle fluttuazioni o residui $w(z)$.

Un data set di misure georeferenziate si definisce

debolmente stazionario quando:

1. Il suo valore medio rimane costante in ogni punto dello spazio considerato;
2. La sua varianza è costante anch'essa in ogni punto dello spazio;
3. La covarianza calcolata tra due valori misurati alle profondità z_i e z_j (nell'ipotesi di un campo aleatorio ad una dimensione) dipende solo dalla distanza tra z_i e z_j e non dalla loro posizione assoluta nello spazio.

La verifica di debole stazionarietà rappresenta la condizione necessaria e sufficiente per poter affermare che i residui $w(z)$ e quindi la misura $\epsilon(z)$ sono caratterizzati da valori costanti di media e varianza e scala di fluttuazione. Inoltre la verifica della debole stazionarietà indica che l'operazione di detrendizzazione è stata condotta con successo.

La fase di detrendizzazione può essere condotta mediante numerose metodologie tra cui la più utilizzata è la regressione basata sul criterio dei minimi quadrati (utilizzando alcune accortezze come suggerito da Bertouex e Brown, 2003 e Cherubini e Giasi, 1997). Alcuni autori (Phoon et al., 2003) suggeriscono di utilizzare con cautela funzioni di regressione superiori al second'ordine. Una volta rimosso il trend la struttura aleatoria rimanente può essere descritta mediante la funzione di correlazione spaziale denominata funzione di autocorrelazione:

$$R(k) = \frac{\sum_{i=k}^{N-k} (X_t - X_{av})(X_{i+k} - X_{av})}{\sum_{i=1}^N (X_t - X_{av})^2} \quad (3)$$

dove k rappresenta la distanza tra due punti nello spazio i ed $i+k$; N è il numero di punti considerati nello spazio; X_{av} rappresenta il valore medio delle misure fatte nei punti i -esimi X_i . Tale funzione è ottenuta dal rapporto tra la covarianza tra due punti distanti k (numeratore) e la covarianza tra due punti a distanza nulla ovvero la varianza (denominatore). Quindi un campo stazionario caratteristico di un materiale omogeneo avrà valori di funzione di autocorrelazione compresi tra -1 ed 1 .

Nell'ambito dei modelli di autocorrelazione più diffusamente riscontrati nei terreni, se ne possono citare cinque (vedi Tab. 5): esponenziale semplice, rumore binario, coseno esponenziale, modello di Markov di second'ordine ed esponenziale quadratico. Tra questi la forma esponenziale semplice risulta essere la più diffusa ed utilizzata. Per ognuno dei cinque modelli di funzione di autocorrelazione si può quindi individuare un valore di scala di fluttuazione, in funzione dei parametri della funzione stessa. Tali funzioni di autocorrelazione tuttavia, appartengono alla classe dei "processi a scala finita o a memoria corta" con strutture differenti dai "processi frattali o a memoria lunga" caratteristici di depositi di forti potenze. Quindi nella pratica si utilizza l'Eq. (3) per ricavare l'andamento della funzione di autocorrelazione per il deposito e la si riconduce ad uno dei cinque modelli succitati.

Tabella 5. Relazioni tra la scala di fluttuazione ed il modello di funzione di autocorrelazione.
Relationship between scale of fluctuation value and autocorrelation function model.

Modello di Autocorrelazione	Equazione	Scala di Fluttuazione
Esponenziale semplice	$R(\tau) = \exp(-\lambda \tau)$	$\delta = 2/\lambda$
Rumore binario	$R(\tau) = \begin{cases} 1 - c \tau & \tau \leq 1/c \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$	$\delta = 1/c$
Coseno esponenziale	$R(\tau) = \exp(-b \tau)\cos(b\tau)$	$\delta = 1/b$
Markov di second'ordine	$R(\tau) = (1 + d \tau)\exp(-d \tau)$	$\delta = 4/d$
Esponenziale quadratico	$R(\tau) = \exp(-a^2\tau^2)$	$\delta = \sqrt{\pi/a}$

L'identificazione di un contatto, invece, può essere condotta mediante gli approcci che sfruttano la varianza: due materiali differenti, infatti, presenteranno una differente struttura stocastica che si paleserà mediante un anomalo incremento di varianza se i due campi stocastici verranno trattati come se fossero uno solo. A partire da questa considerazione e applicando dei procedimenti numerici iterativi con finestre spaziali individuate lungo la direzione di misura della grandezza indagata (detti modelli ARIMA), sono stati messi a punto alcuni metodi di riconoscimento delle anomalie statistiche.

Il metodo di Wickremesinghe e Campanella (1991) è basato sul calcolo del coefficiente di correlazione intraclasse RI definito lungo la direzione di misura e pari a:

$$RI = \frac{SB}{SB+SC} \quad SC = m \cdot \frac{(s_1 + s_2)}{(2m-1)} \quad (4)$$

dove SB è la varianza di un campione di misure di dimensione 2m, s1 ed s2 sono le varianze di due campioni di misure di dimensione m che si trovano sopra e sotto il baricentro del campione di dimensione 2m. Parlare di dimensione del campione significa parlare di distanza spaziale m tra le due misure estreme cioè più distanti appartenenti al campione. Il punto nello spazio dove RI avrà

il valore massimo rappresenterà il contatto statistico tra due formazioni. Applicazioni di questo metodo per la verifica della presenza di variazioni litologiche e/o litotecniche si possono trovare in Cafaro e Cherubini (2002) ed in Cherubini e Vessia (2004).

Conclusioni

Nella breve rassegna di problematiche svolte nei precedenti paragrafi sono stati tratteggiati alcuni punti fondamentali per la caratterizzazione di un ammasso di terreno, tenendo conto della sua variabilità intrinseca e di quella connessa alle procedure di campionamento, prove e trasformazione dei dati.

Le metodologie proposte mostrano come la variabilità da cui sono affette le misure può essere quantificata e trattata come ulteriore variabile nella caratterizzazione fisico-meccanica da considerare nella progettazione geotecnica. Tuttavia esse non sono spesso applicate facendo prevalere la soggettività operativa. Ciò può condurre a scelte ora estremamente cautelative, ora meno, ma mai basate su criteri riproducibili e confrontabili in modo da far sì che la singola esperienza progettuale possa essere di ausilio ad altre successive.

Bibliografia

- Barnett V. and Lewis T. (1984). *Outliers in statistical Data*. 2nd edition Wiley.
- Bertouex P.M. and Brown L.C. (2002). *Statistics for environmental Engineers*. Second Edition. Lewis Publishers.
- Cafaro F. and Cherubini C. (2002). Large sample spacing in evaluation of vertical strength variability of clayey soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(7), 558-568.
- Wickremesinghe D.S., Campanella R.G. (1991). Statistical Methods for soil layer boundary location using the cone penetration test. Sixth International Conference on Application of Statistics and Probability in Civil Engineering, Mexico City, 636-643.
- Cherubini C. (1997). Data and consideration on the variability of geotechnical properties of soils. *Advances in Safety & Reliability*, ESREL vol.2, pp.1583-1591, Lisbon.
- Cherubini C., Cotecchia V., Giasi C.I. and Todaro G. (1986). Identification of outliers in geotechnical data, *Proceedings of the International Symposium on Computer and Physical modeling in geotechnical Engineering*, Bangkok.
- Cherubini C. e Giasi C.I. (1997). Limiti ed abusi nell'utilizzo delle tecniche di regressione in *Geologia Applicata ed in Geotecnica*, MEDIT Anno 8 n°3, 41-48.
- Cherubini C. and Orr T.L.L. (1999). Considerations on applicabilità of semiprobabilistic bayesian methods to geotechnical design, XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma.
- Cherubini C. and Vessia G. (2004). A Stochastic Approach to Manage Variability from in Situ Test Data. *Proceedings of the Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, ASCE, 26-28 July, Albuquerque.
- Eurocodice7. *Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali*. UNI ENV 1997 – 1- Aprile 1997.
- Phoon K.-K. and Kulhawy F.H. (1999).

- Evaluation of geotechnical property variability. Canadian Geotechnical Journal, 36, 625-639.
- Schneider H.R. (1997). Definition and determination of characteristic soil properties. Contribution to Discussion Session 2.3 XIV ICSMFE Hamburg.
- Phoon K.-K., Quek S.-T. and An P. (2003). Identification of statistically homogeneous soil layers using modified Bartlett statistics, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(7), 649-659.
- Schneider H.R. (1997). Definition and determination of characteristic soil properties. Contribution to discussion Session 2.3 XIV ICSMFE Hamburg, Balkema.
- Taylor J.R. (1990). Introduzione all'analisi degli errori. Zanichelli. Bologna.
- Tukey J. (1977). Exploratory data analysis. Wasley Publishing Company
- Vanmarcke E.H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103 (GT11), 1227-1246.
- Vanmarcke E.H. (1983). Random fields: analysis and synthesis. MIT Press, Cambridge.
- Velleman P.F. and Hoaglin D.C. (1981). ABC of EDL, Duxbury Press, Boston.