

## RESISTENZA CARATTERISTICA DEL TERRENO TRATTATO CON JET GROUTING

Caterina Toraldo

*DICeM Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*  
*c.toraldo@unicas.it*

Giuseppe Modoni

*DICeM Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*  
*modoni@unicas.it*

### Sommario

I terreni naturali ed i materiali derivati da essi con tecniche di consolidamento sono molto più eterogenei rispetto ai materiali da costruzione artificiali. Pertanto i metodi statistici comunemente adottati per definire la resistenza caratteristica di questi ultimi possono risultare oltremodo cautelativi se applicati tout court senza tenere conto degli effetti meccanici della variabilità. Le tecniche di analisi Random Field consentono di studiare il comportamento tenso-deformativo di un elemento strutturale simulando gli effetti della variabilità, casuale e spazialmente correlata, delle proprietà meccaniche del materiale. Basandosi sull'impiego di tali tecniche, il presente studio si prefigge di stabilire un criterio oggettivo per stimare la resistenza caratteristica dei terreni cementati con jet grouting. A tal fine si è analizzata la variazione delle proprietà del materiale cementato e la sua correlazione spaziale partendo dai risultati di alcuni campi prove e si sono definiti i modelli di variabilità in grado di simulare il campo osservato. Con un algoritmo iterativo di calcolo numerico si è quindi simulato il prelievo di campioni di diverse dimensioni e si è analizzata statisticamente la resistenza a compressione al variare della dimensione dei campioni. L'analisi effettuata ha evidenziato che, tanto il comportamento prima della rottura quanto la resistenza caratteristica, dipendono dal rapporto tra la dimensione dell'elemento di volume considerato e la distanza di correlazione spaziale.

### 1. Introduzione

La teoria Random Field, applicata in diversi campi della meccanica, fonde algoritmi di calcolo numerico con metodi di simulazione della variabilità, per offrire un approccio razionale alla stima del comportamento meccanico di una struttura avente caratteristiche variabili localmente. Nell'Ingegneria Geotecnica essa ha trovato impiego in numerose applicazioni (Griffiths & Fenton 2001, Griffiths et al. 2009, Griffiths & Fenton 2009, Kasama et al. 2012). Una delle più recenti ha riguardato la valutazione delle proprietà meccaniche di terreni consolidati mediante interventi colonnari di deep-mixing (Namikawa & Koseki 2013). Prendendo spunto da questo studio, ci si è posti l'obiettivo di valutare l'influenza della correlazione spaziale sul comportamento meccanico di un terreno trattato con jet grouting e, in particolare, sulla definizione della resistenza caratteristica. Gli studi sperimentali condotti su tale materiale (e.g. Croce et al. 2014; Modoni & Bzówka, 2013) hanno mostrato che la resistenza a compressione monoassiale, valutata sui campioni di ridotte dimensioni, presenta una notevole variabilità, con coefficienti di variazione che in alcuni casi raggiungono il 50%. Pertanto, l'applicazione dei classici metodi della statistica alla determinazione della resistenza caratteristica, (ad esempio associando tale resistenza al frattile del 5%), produce valori molto bassi della stessa. D'altro canto, l'attribuzione di tali valori a volumi di dimensioni maggiori, quali quelli coinvolti nelle strutture di materiale consolidato, non tiene conto di un'effettiva collaborazione degli elementi più resistenti con quelli più deboli. Considerando che la porzione di terreno che governa il comportamento di strutture

geotecniche è solitamente maggiore di un campione di prova, risulta quindi fondamentale definire un criterio di passaggio dalla resistenza osservata a scala di campione a quella osservata su elementi di dimensione maggiore (colonne o blocchi di jet grouting), più rappresentativi del problema reale.

Ecco la necessità di considerare che le proprietà geotecniche, in un terreno trattato con cemento, siano correlate spazialmente tra loro, per cui elementi più deboli sono vicini tra loro, così come elementi più resistenti. Bisogna, allora, incrementare la dimensione rappresentativa dei campioni, e quindi per una data dimensione del volume considerato, la variabilità della resistenza può risultare maggiore. Questo effetto è stato chiaramente dimostrato da Namikawa e Koseki (2013), i quali hanno osservato che la resistenza di un terreno trattato con Deep Mixing varia notevolmente, anche all'interno di una singola colonna, in funzione della variabilità delle proprietà dei terreni in sìto. Gli autori suggeriscono, pertanto, di considerare l'autocorrelazione spaziale nella scelta della resistenza caratteristica del terreno trattato. L'autocorrelazione spaziale, nell'ipotesi di variabile regionalizzata stazionaria del secondo ordine, si può studiare indifferentemente o con la teoria della Geostatistica (Matheron 1965) o con la Teoria Random Field (Vanmarcke 1977), rispettivamente mediante la funzione semivariogramma e la funzione di autocorrelazione.

In entrambe i casi si ottiene che i campioni diventano indipendenti oltre una certa distanza. Tale distanza è chiamata *range* per la funzione semi-variogramma, *scala di fluttuazione* per la funzione di autocorrelazione.

## 2. Il caso di Studio

La distribuzione spaziale della resistenza del terreno cementato è fornita da dati sperimentali ottenuti da Croce et al. 1994. Questi sono riferiti ad un campo prova finalizzato alla realizzazione di una fondazione rinforzata con jet grouting (Polcevera).

### 2.1 Analisi della variabilità

Il campione di dati sperimentali include un elevato numero di prove a compressione monoassiale e la distribuzione delle velocità di propagazione delle onde di compressione misurate attraverso prove cross-hole e interpretate con la tomografia sonica. Le prime sono adoperate per quantificare la variabilità casuale riportata in Figura 1.a, la seconda è usata per quantificare la variabilità spaziale del modulo di rigidezza a piccole deformazioni Figura 1.c. Osservando che esiste una stretta dipendenza tra rigidezza e resistenza del materiale (Figura 1.b), si è ritenuto lecito associare le informazioni acquisite su entrambe le variabili, per definire un modello unitario di variabilità (casuale e spaziale).

Come si può osservare anche in Figura 1.c, il sito di Polcevera è caratterizzato dalla presenza di due differenti strati, uno costituito da terreno a grana grossa, fino alla profondità di 7-8m, l'altro formato da terreno a grana fine che raggiunge profondità maggiori. Le considerazioni mostrate di seguito si limitano per brevità allo strato superiore.

L'analisi statistica della resistenza a compressione misurata sui campioni prelevati dal blocco di terreno cementato rivela una distribuzione approssimabile ad una legge probabilistica log-normale (Figura 1.a). Lo studio della variabilità spaziale, analizzata digitalizzando le isoline di Figura 1.c. e calcolando la funzione di autocorrelazione separatamente per i due strati di terreno, conduce ad adottare un modello esponenziale della stessa (Figura 1.d), in accordo con studi precedenti relativi a terreni trattati con cemento (Honjo 1982). Tale modello si basa sulla seguente equazione:

$$\rho(d) = \exp\left(-\frac{d}{\theta}\right) \quad (1)$$

dove  $d$  è la distanza tra due punti considerati e  $\theta$  è la distanza di autocorrelazione stimabile mediante il metodo della massima verosimiglianza di Honjo & Kazumba (2002). L'applicazione di tale metodo (Figura 1.e) conduce a determinare un valore di  $\theta$  pari a 2.3 m.

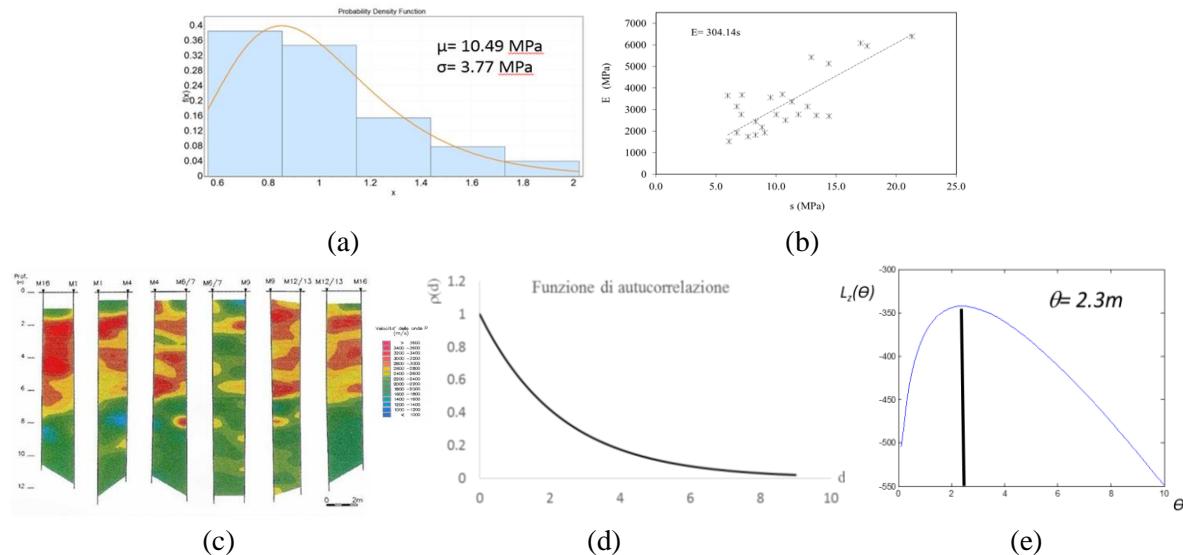


Fig 1. Proprietà meccaniche del jet grouting misurate nel campo prove di Polcevera: a. distribuzione statistica della resistenza a compressione monoassiale valutata su 26 campioni prelevati dal blocco; b. relazione tra modulo di rigidità e resistenza a compressione monoassiale; c. distribuzione della velocità delle onde di compressione (espressa in m/s); d. funzione di autocorrelazione; e. rappresentazione della funzione di verisomiglianza per la determinazione della distanza di correlazione.

## 2.2 Simulazione della variabilità

Note le caratteristiche di variabilità di una data proprietà, è possibile generare un numero qualsivoglia grande di campi casuali simili a quello osservato. Con il metodo Montecarlo si può simulare la variabilità casuale, mentre vi sono diverse tecniche per simulare la variabilità spaziale (Fenton e Griffiths 2007). Nel presente studio si è impiegata la tecnica del Local Average Subdivision (LAS) implementato nel programma di calcolo RFEM (Fenton e Griffiths 2000). Tale metodo opera una suddivisione in celle, via via più dettagliata, del campo di definizione della variabile analizzata e calcola il valore in ciascuna cella in maniera tale che la media risulti uguale a quella preassegnata e la variabilità spaziale sia congruente con la funzione di autocorrelazione imposta. Nella Figura 2 si riportano, a titolo di esempio, alcuni possibili campi della variabile  $V_p$  generati congruentemente con quello riportato in Figura 1.c.

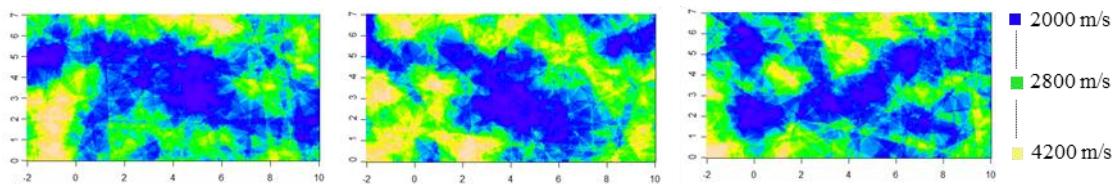


Fig 2. Alcune delle simulazioni effettuate

## 3 Simulazione delle prove di compressione monoassiale

L'analisi meccanica è stata svolta adoperando diversi codici di calcolo agli elementi finiti (bi e tridimensionali). La routine completa delle simulazioni è stata ottenuta utilizzando il codice RFEM (Fenton e Griffiths 2000), in grado di generare automaticamente scenari diversi delle proprietà del materiale e studiarne la risposta meccanica ad una data sollecitazione. Parallelamente, alcune analisi sono state ripetute con il codice di calcolo ABAQUS (Abaqus v6.13, 2013), poiché esso fornisce un output più dettagliato ed è in grado di implementare modelli costitutivi più avanzati.

Noti gli effetti della cementazione sulla risposta meccanica del terreno trattato (Croce et al. 2014), si è fatto riferimento ad un legame costitutivo elastico lineare-perfettamente plastico, ammettendo l'utilizzo del criterio di rottura alla Mohr Coulomb. Per quanto riguarda il comportamento a rottura, si è ipotizzato

che la coesione ( $c$ ) vari in maniera analoga alla resistenza a compressione monoassiale  $q_u$  (Figura 1.a). Imponendo un valore costante di  $\varphi=37^\circ$ , mediamente rappresentativo dei materiali cementati (Croce et al. 2014), è facile verificare la sussistenza della seguente relazione:

$$q_u = 4 \cdot c \quad (2)$$

In alcune prove si è poi considerata una resistenza a trazione del materiale (tension cut-off), valutata concordemente alle osservazioni sperimentali di van der Stoel (2001) ( $f_t = 0.3 \cdot q_u^{0.8}$ ).

Il modulo di rigidezza teorico ( $E$ ) è stato posto pari a modulo secante a metà della tensione di rottura ( $E_{50}$ ) ed è stato fatto variare proporzionalmente alla resistenza a compressione monoassiale, in virtù della dipendenza tra le due grandezze osservata sperimentalmente (Figura 1.b).

$$E = \beta \cdot q_u = 4\beta \cdot c \quad (3)$$

Il valore di  $\beta$  è stato ricavato rapportando i valori medi sperimentali del modulo di rigidezza e della resistenza a compressione monoassiale. In particolare, il primo è stato ricavato sull'intero blocco di materiale cementato valutando la velocità di propagazione delle onde di compressione, ricavando da queste il modulo di rigidezza a piccoli livelli di deformazione (con  $v=0.22$ ):

$$E_o = \rho V_p^2 \frac{(1-\nu-2\nu^2)}{(1-\nu)} \quad (4)$$

e calcolando il valore del modulo secante a metà della tensione di rottura ( $E_{50}$ ), nell'ipotesi che il legame sperimentale sia approssimabile dalla classica iperbole di Chin ( $E_{50} = E_0/2$ ). Da tali ipotesi scaturisce un valore di  $\beta=564$ .

Le prove di compressione monoassiale sono state simulate a deformazione controllata, su provini parallelepipedici e immaginando le basi fisse. Nella Figura 3.a si può confrontare il quadro di deformazioni distorsionali a rottura ottenuto sottoponendo a prova due campioni (di dimensioni 2x2x3.2 (m), costituiti da 1600 elementi), uno avente proprietà meccaniche costanti pari ai valori medi delle distribuzioni, l'altro avente proprietà variabili. Si osservi come la simmetria delle deformazioni nel primo caso, determinata prevalentemente dalle condizioni al contorno, viene alterata dalla proprietà disomogenea del campione nel secondo caso. Parallelamente, le curve tensioni-deformazioni (Figura 3.b) mostrano che mentre il materiale omogeneo (curva nera) ha un comportamento di tipo elastico perfettamente plastico, cioè molto simile al modello costitutivo preassegnato, il materiale eterogeneo (curve grigie) subisce una plasticizzazione diffusa e mostra un andamento iperbolico della curva tensioni-deformazioni. Le stesse analisi, condotte con il codice di calcolo ABAQUS (Abaqus v6.13, 2013), introducendo una resistenza a trazione, mostrano che, per il tipo di prova considerato, il comportamento del materiale non risente di questa variazione (Figura 3.c).

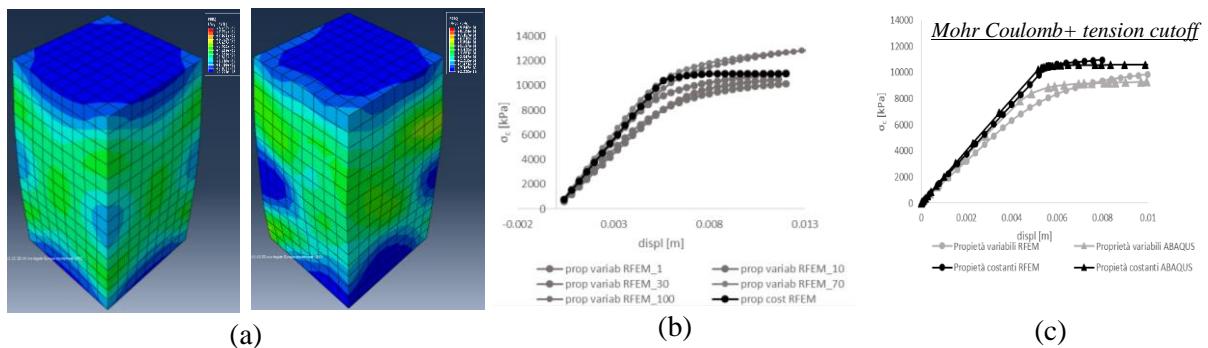


Fig. 3. Simulazione degli effetti della variabilità: a. quadro delle deformazioni distorsionali a rottura su un campione omogeneo e su uno eterogeneo; b. curve tensioni-spostamenti valutate con RFEM su un campione di proprietà costanti (nero) e su campioni eterogenei (grigio); c. curve tensione-deformazione ricavate con ABAQUS e RFEM imponendo la resistenza a trazione calcolata con la relazione di van der Stoel (2011).

### 3 Stima della resistenza caratteristica

Il calcolo precedente è stato svolto immaginando di effettuare prove su campioni parallelepipedici aventi lato di base  $d$  variabile tra 0.1 a 5 m e valutando la resistenza su ognuno di essi. Simulando 100 volte l'operazione di prelievo e prova per ciascuna dimensione, si ottiene un campione statistico sufficientemente rappresentativo. La Figura 4 mostra che le distribuzioni statistiche della resistenza a compressione monoassiale, al variare della dimensione del campione, mantengono il valore medio pressoché inalterato, ma tendono ad essere via via più omogenee e simmetriche.

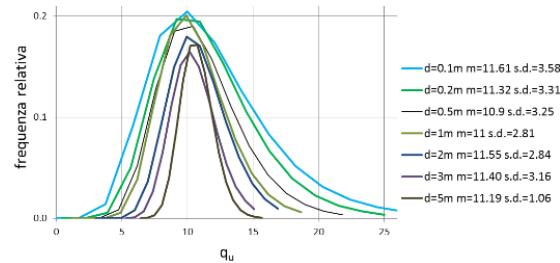


Figura 4. Distribuzione delle frequenze della resistenza calcolata simulando una prova di schiacciamento sul campione avente proprietà variabili e correlate con  $\theta=1.5m$ .

Infine, per valutare l'influenza della variabilità spaziale sulla resistenza a rottura del campione, si è effettuata un'analisi parametrica facendo variare la distanza di correlazione ( $\theta$ ) tra 0.5 e 2 m. Per ogni coppia formata da  $\theta$  e  $d$ , si è quindi valutata la distribuzione della resistenza a rottura e la corrispondente deviazione standard ( $\sigma_v$ ). Si è quindi rapportato tale valore alla deviazione standard puntuale preassegnata ( $\sigma=3.77$  MPa) e si è rappresentata tale grandezza in funzione del rapporto tra dimensione del campione e distanza di correlazione  $d/\theta$  (Figura 5.a). La figura mostra che tutte le distribuzioni hanno lo stesso andamento, con una marcata riduzione della deviazione standard al crescere del rapporto  $d/\theta$ . In Figura 5.b si sono calcolati, per ciascuna coppia  $d$  e  $\theta$ , le resistenze caratteristiche calcolate in corrispondenza del frattile al 5%. Si osserva che i valori della resistenza a compressione risultano sempre maggiori di quello calcolato analizzando statisticamente le prove di laboratorio (Figura 1.a) e sono via via più elevati al crescere della dimensione dell'elemento, anche se l'aumento della distanza di correlazione  $\theta$  tende ad attenuare questa crescita. Tale risultato può essere spiegato considerando da un lato l'effetto positivo di mediazione della resistenza su elementi di dimensioni maggiori rispetto a quelli sottoposti a prova, dall'altro l'effetto negativo dato dall'agglomerazione delle porzioni di materiale più scadente.

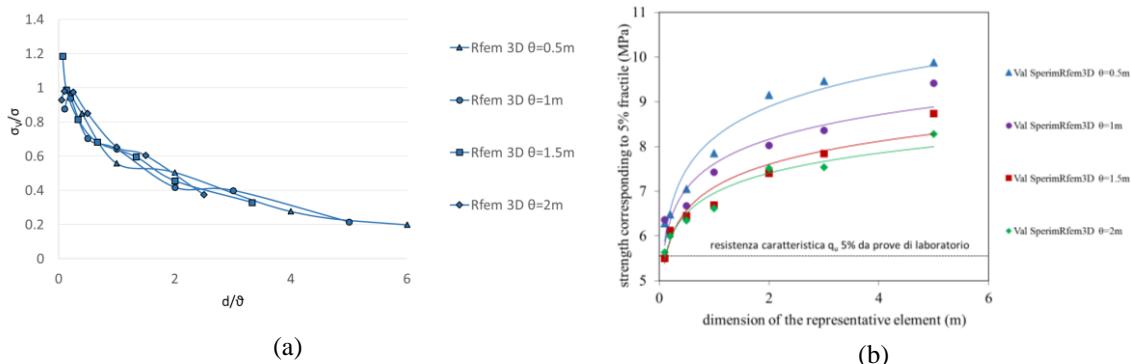


Figura 5 Distribuzione del fattore di riduzione standard teorica e sperimentale (a); distribuzione della resistenza caratteristica per differenti dimensioni dell'elemento rappresentativo, al variare della scala di fluttuazione (b).

#### 4 Sviluppi Futuri

Le analisi numeriche eseguite hanno evidenziato una significativa variazione della resistenza caratteristica del terreno consolidato con jet grouting al variare delle dimensioni dei campioni e della distanza rappresentativa dell'autocorrelazione spaziale. Quest'ultimo aspetto, normalmente trascurato, interviene in maniera decisiva sulla determinazione delle proprietà del materiale.

Allo stato attuale, le prove di compressione sono state simulate, salvo alcuni esempi, con il programma agli elementi finiti RFEM (Fenton e Griffiths 2000), il quale presenta alcune limitazioni, sia riguardo la mesh di calcolo (un massimo di 1600 elementi) sia per il modello costitutivo da utilizzare (elastico lineare-perfettamente plastico). Volendo perfezionare l'analisi numerica, si pensa di utilizzare in maniera diffusa il codice di calcolo ABAQUS (Abaqus v6.13, 2013). Tale modello, già calibrato rispetto ad RFEM (Figura 3.c), servirà a superare le limitazioni di RFEM, consentendo di utilizzare un modello costitutivo più dettagliato e di infittire la mesh di calcolo.

#### Bibliografia

- Abaqus v6.13 (2013). *ABAQUS Documentation*. © Dassault Systèmes, Providence, RI, USA.
- Croce P., G. A. (1994). "Una verifica sperimentale degli effetti della gettinazione". *Rivista Italiana di Geotecnica*, 91-101.
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). "Jet grouting: technology, design and control". *London: CRC press, published by Taylor & Francis group*.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2000). "rpill3d". *RFEM*.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2007). "Random Field Generation and the Local Average Subdivision Method". In C. International Centre for Mechanical Sciences, *Probabilistic methods in Geotechnical Engineering*. Udine: SpringerWienNewYork.
- Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2001). "Bearing Capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited". *Géotechnique* 51, 351-359.
- Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2009). "Probabilistic settlement analysis by stochastic and Random Finite-Element Methods". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1629-1637.
- Griffiths, D. V., Huang, J., & Fenton, G. A. (2009). "Influence of Spatial Variability on slope reliability using 2-D Random Fields". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1367-1378.
- Honjo, Y. (1982). "A probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method". *Soils and Foundations*, 22(1), 23-38.
- Honjo, Y., & Kazumba, S. (2002). "Estimation of autocorrelation distance for modeling spatial variability of soil properties by Random Field theory". *The 47th Geotechnical Engineering Symposium, JGS*, (p. 279-286).
- Kasama, K., Whittle, A. J., & Zen , K. (2012). "Effect of spatial variability on the bearing capacity of cement-treated ground". *Soils and Foundations*, 52, 600-619.
- Matheron, G. (1965). "La théorie des variables régionalisées et son application à l'estimation des gisements miniers". *Ecole des Mines de Paris*.
- Modoni G. & Bzówka J. (2013). "Analysis of Foundations Reinforced with Jet Grouting". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1442-1454.
- Namikawa T. & Koseki J. (2013). "Effects of spatial correlation on compression behavior of cement-treated column". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1346-1359.
- van der Stoel, A. E. (2001). "Grouting for Pile Foundation Improvement: PhD thesis". *Delft University Press*, 217p.
- Vanmarcke E.H. (1977). "Probabilistic Modeling of Soil Profiles". *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, 1227-1246.