

Cálculo simples do aumento da resistência não drenada para solos enrijecidos com CPR Grouting

Alessandro Cirone

Engenheiro Geotécnico e Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, alessandro@engegraut.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta metodologia de cálculo simplificado para estimar o aumento da resistência não drenada de solos enrijecidos com CPR Grouting. Por meio de pesquisa bibliográfica das técnicas de grouting, nas quais o CPR Grouting se insere, a célula unitária e a razão de substituição são redefinidas. Em seguida, deduz-se a variação teórica do índice de vazios por meio de um simples modelo conceitual, adicionando-se a fase o geogROUT ao solo homogêneo pós-CPR Grouting. A estimativa refere-se à diminuição média do índice de vazios dentro da célula unitária, variação esta muito grande próximo da cavidade expandida, tendendo a ser menos apreciável ao se afastar. Logo, aplica-se a Teoria do Estado Crítico para se determinar o incremento da resistência não drenada em função da diminuição do índice de vazios. O resultado é uma equação de previsão do aumento da resistência não drenada que necessita somente o conhecimento da razão de compressão $CR = C_c/(1+e_0)$ do solo mole, da geometria da malha e do volume expandido de projeto (os quais estão resumidos na razão de substituição). Para avaliar o método proposto dois casos reais, presentes na literatura, são analisados: a Cidade do Rock e o trecho sul do Rodoanel Mário Covas (SP). Observa-se que os valores estimados pelo método possuem ótima concordância com os determinados experimentalmente. Finalmente, evidencia-se que esta previsão refere-se somente à fase "solo" (matriz), desconsiderando-se a contribuição da fase "geogROUT" (reforço). Na realidade, o solo enrijecido com CPR Grouting comporta-se como solo homogeneizado, em que as verticais com bulbos de geogROUT promovem o acréscimo na resistência não drenada e rigidez. Por conseguinte, conclui-se que o método fornece valores de resistência a favor da segurança, pois não considera o efeito final da homogeneização.

PALAVRAS-CHAVE: resistência não drenada, teoria do estado crítico, CPR Grouting

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho investiga, do ponto de vista teórico e experimental, a condição do solo após enrijecimento com CPR Grouting, utilizado com sucesso na diminuição/eliminação de recalques tanto em aterros sobre solos moles, como na melhoria da resistência não drenada de solos moles submetidos à escavações. Apesar da técnica ser conceitualmente muito simples, seu estudo teórico e numérico revela-se extremamente complexo, pois envolve problemas na modelagem geotécnica, dificultando o estabelecimento de modelo teórico. As dificuldades começam com a modelagem do processo de geração das verticais de adensamento e enrijecimento do solo, por meio da teoria da expansão de

cavidades, já que torna-se necessário considerar os carregamentos em várias direções, a execução múltipla e sequencial dos bulbos de compressão, com o subsequente adensamento radial devido à presença dos drenos.

Esta multiplicidade de fatores indica, na análise numérica, a simulação adequada para prever o comportamento do solo após o enrijecimento. Entretanto, ocorrem complicações considerando-se que o problema é acoplado e com grandes deformações. Por exemplo, a grande deformação que a malha FEM sofre pode gerar elementos muito distorcidos, fazendo com que não haja convergência ou instabilidade numérica. O modelo constitutivo utilizado também deveria possuir capacidade de representar a perda de estrutura (amolgação), que ocorreria na

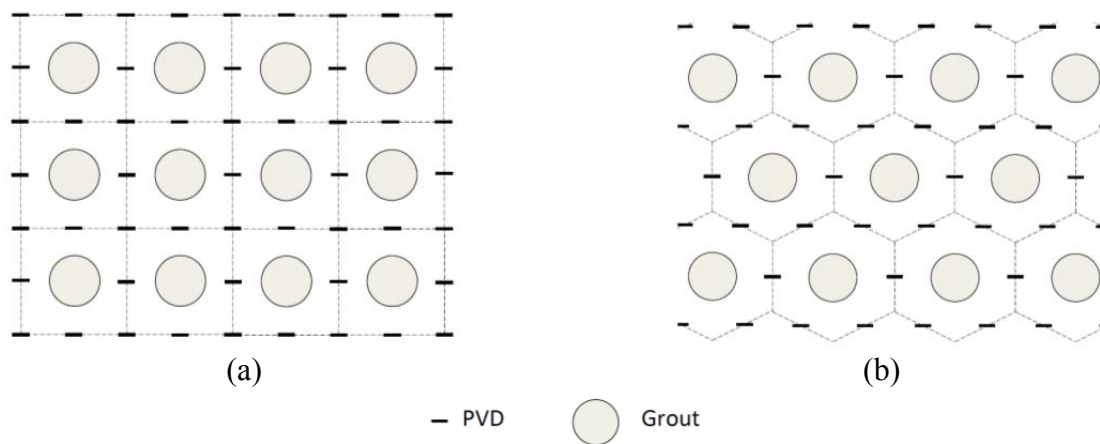


Figura 1. Malhas drenantes e de verticais com bulbos de compressão normalmente utilizadas no CPR Grouting. (a) Malha quadrada com 8 drenos ao redor da vertical de geogROUT. (b) Malha triangular com 6 drenos ao redor.

argila após o processo de expansão de cavidades com a formação dos bulbos. O grande número de variáveis envolvidas comporta, então, um amplo número de parâmetros no modelo numérico. Para fins de projeto é inexecutável, já que na prática executam-se clássicas investigações geotécnicas de campo e de laboratório que fornecem, no máximo, parâmetros de compressibilidade e resistência. Por este motivo, revela-se necessária a abordagem do problema de maneira simplificada, mas com base teórica que torne possível prever o comportamento mecânico do solo, submetido ao CPR Grouting, tendo como base os dados utilizados na prática.

2 CÉLULA UNITÁRIA

As verticais com bulbos de compressão do solo, via expansão de cavidades (Yu, 2000), com geogROUT, são realizadas conforme malha, cuja geometria é escolhida a partir das informações do solo e exigências do projeto. A Figura 1 mostra que, nos dois tipos de malha utilizada, é possível definir a *célula unitária*¹ analogamente a situações de aterros sobre drenos verticais ou solução com colunas.

Devido à presença de geodrenos em torno do perímetro de cada vertical de bulbos de compressão, torna-se conveniente definir a célula unitária como “volume de controle padrão, delimitado por contorno rígido

drenante”, equivalente a um círculo de diâmetro $D = 2\sqrt{A/\pi}$, onde A representa a área da seção transversal, que depende do espaçamento entre drenos e sua disposição.² Por exemplo, identificando com S o espaçamento entre geodrenos, a área da célula unitária do CPR Grouting equivale a $A = 3S^2/\cos(30^\circ)$ para malha de enrijecimento triangular ou $A = 4S^2$ para malha quadrada.

2.1 Razão de Substituição

Conforme Figura 2, o processo de expansão de cavidades com bulbos de compressão executados com geogROUT, é feito com alinhamento vertical. Naturalmente, então, o projeto consistirá na escolha adequada do espaçamento entre geodrenos (e das verticais), além do volume dos bulbos a serem expandidos.

Estas informações podem ser resumidas introduzindo-se o conceito de *Razão de Substituição*, R_s , definida como “o volume total dos bulbos expandidos dentro da célula unitária indeformada”. Portanto, com base na Figura 2, é possível definir a razão de substituição pela seguinte expressão:

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^N V_{gi}}{ANh} \quad (1)$$

¹ Neste sentido, supondo que cada célula se comporta da mesma forma que as adjacentes, a análise de todo o sistema pode-se basear unicamente no estudo de uma.

² Em consequência do processo executivo, desenvolvido pela Enggegraut, o espaçamento entre verticais torna-se o dobro do espaçamento entre drenos.

onde V_{gi} é o volume expandido do bulbo i -ésimo, A é a área da seção transversal da célula unitária, N é o número de bulbos e h é a altura entre bulbos ao longo da vertical.

Com a hipótese de todos os bulbos terem volumes iguais, a razão de substituição torna-se:

$$R_s = \frac{V_g}{Ah} \quad (2)$$

Por exemplo, para uma malha triangular de geodrenos com espaçamento $S=1.5$ m, com uma altura entre bulbos de $h=1$ m e com um volume de projeto de cada bulbo igual a $V_g=900$ l, obtém-se $R_s=11.55\%$.

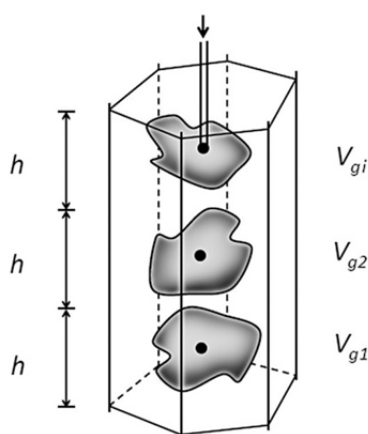


Figura 2. Representação esquemática do processo de expansão dentro de uma célula unitária indeformada para uma malha triangular.

2.2 Eficiência de compensação

Como em outras técnicas de grouting, utiliza-se o conceito de compensação para melhor compreensão das análises desenvolvidas.

Na literatura, a eficiência de compensação de um solo groutado é definida como o volume de solo elevado (ou compensado) por um dado volume de grout expandido (Komiya et al. 2001). Idealmente, impedindo-se qualquer deslocamento lateral, na condição não drenada, ter-se-á eficiência de 100%, isto é, o volume de solo que cresce é igual ao volume de grout introduzido.

No entanto, isto não é o que ocorre nas argilas. A eficiência de compensação diminui ao longo do tempo, pois há o inevitável processo de adensamento, com consequentes

recalques, além da retração do geogROUT, que diminui de volume.

Levando em consideração estes aspectos, Komiya et al. (2001) propuseram a seguinte expressão para a eficiência de compensação:

$$\eta = \frac{\text{Volume elevado}}{\text{Volume expandido}} = \frac{V_g - V_c - V_{sh}}{V_g} = 1 - \lambda_c - \varepsilon_{sh} \quad (3)$$

onde V_g é o volume de geogROUT introduzido, V_c é a diminuição de volume do solo, devido ao adensamento e V_{sh} é a diminuição de volume do grout devido à retração. Os parâmetros $\lambda_c = V_c/V_g$ e $\varepsilon_{sh} = V_{sh}/V_g$ quantificam as deformações por adensamento e retração, respectivamente.

Muitos ensaios de laboratório tem sido feitos para entender quais fatores influenciam a eficiência da compensação. Observou-se, por exemplo, uma eficiência negativa em argilas normalmente adensadas (Au et al., 2003) e uma retração do geogROUT próxima a 30% de seu volume original com ausência de aditivos (Komiya et al., 2001). Mais relevante ainda é a influência da sequência do processo de expansão dos bulbos na eficiência de compensação, efeito estudado por Soga et al. (2004), que observaram sua diminuição ao se aumentar o intervalo de tempo entre as a formação dos bulbos³, conforme mostrado na Figura 3.

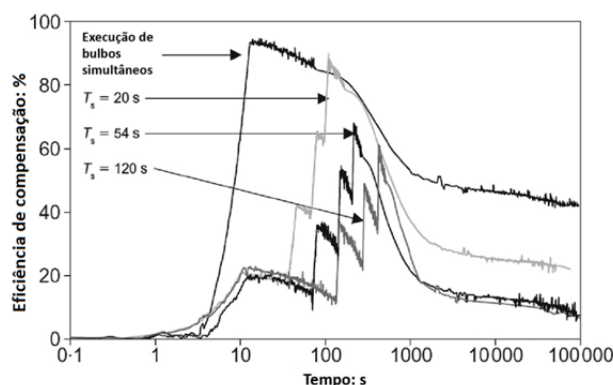


Figura 3. A eficiência de compensação depende do intervalo de tempo, T_s , entre formações dos bulbos. Adaptado de Soga et al. (2004).

³ Na realidade, trata-se de uma série de baloon teste, em que a expansão de cavidade é feita por meio de uma membrana expandida com água sob pressão.

Soga et al. (2004) mostraram que, quando se formam bulbos sequenciais, a eficiência de compensação é praticamente nula, ou seja, o volume original da célula unitária não varia muito após o grouteamento. Algo semelhante acontece após a execução do CPR Grouting, pois as verticais que geram enrijecimento do solo, com expansão de bulbos de geogROUT, não são formadas ao mesmo tempo.

3 VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS

Deduz-se então a variação teórica do índice de vazios por meio de considerações de mecânica dos solos. A Figura 4 mostra, de maneira esquemática, um elemento de solo antes e após o CPR Grouting. O solo, na condição natural, possui um volume $V_0 = V_s + V_{v0}$, onde V_s é o volume dos sólidos e V_{v0} é o volume inicial (natural) dos vazios. Indicando com $e_0 = V_{v0}/V_s$ o índice de vazios inicial, então, o volume total pode ser representado como $V_0 = V_s(1 + e_0)$. O volume expandido é pré-determinado e seu valor é $V_g = R_s V_0$.

O processo de expansão de cavidades, com a formação dos bulbos de compressão, induz enormes deformações no solo e, como resultado, há uma variação de volume no elemento. Utilizando a definição da eficiência de compensação, o volume final pode ser expresso como $V = V_0 + \eta V_g$, onde η é definida pela Equação 3.

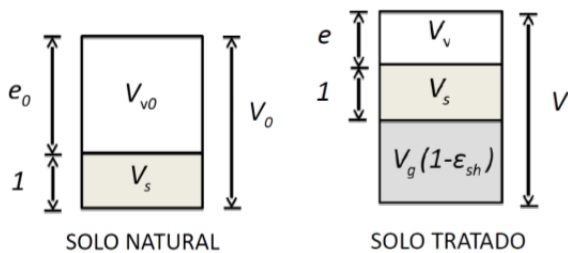


Figura 4. Volume elementar de solo antes e após o CPR Grouting.

Assumindo que os sólidos são incompressíveis, o volume final pode ser expresso como $V = V_s + V_v + V_g(1 - \epsilon_{sh})$, onde ϵ_{sh} é a deformação volumétrica do grout devido à retração. Logo, a variação de volume do

elemento torna-se:

$$\Delta V = V - V_0 = (V_v - V_{v0}) + V_g(1 - \epsilon_{sh}) \quad (4)$$

Dividindo ambos os lados por $V_0 = V_s(1 + e_0)$ obtém-se:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{e - e_0}{1 + e_0} + R_s(1 - \epsilon_{sh}) \quad (5)$$

onde $\Delta V/V_0$ representa a deformação volumétrica permanente que o elemento experimenta por causa do processo de expansão. Notando que $\Delta V/V_0 = \eta R_s$, a Equação 5 pode ser escrita na seguinte forma:

$$\eta R_s = \frac{e - e_0}{1 + e_0} + R_s(1 - \epsilon_{sh}) \quad (6)$$

Finalmente, adicionando em ambos os lados +1 e lembrando a definição de eficiência de compensação (Equação 3), é possível utilizar o coeficiente de redução de volume devido ao adensamento, definido como $\lambda_c = 1 - \eta - \epsilon_{sh}$, para se obter:

$$e = (1 - \lambda_c R_s)(1 + e_0) - 1 \quad (7)$$

Esta expressão permite estimar o índice de vazios final, após o CPR Grouting, desde que sejam conhecidos o coeficiente de redução de volume devido ao adensamento, λ_c , a razão de substituição, R_s , e o índice de vazios do solo na condição natural, e_0 . Introduzindo a hipótese de que não haja deformação de volume permanente no elemento de solo, i.e. $\eta = 0$, e que não ocorra retração no grout, i.e. $\epsilon_{sh} = 0$, a Equação 7 pode ser simplificada na seguinte forma:

$$e = (1 - R_s)(1 + e_0) - 1 \quad (8)$$

o que permite estimar, de maneira simplificada, o índice de vazios final, após o processo de compressão do solo e a consequente dissipação do excesso de poropressão.

Por exemplo, considerando um índice de vazios $e_0 = 3.5$ *in situ* e uma razão de

substituição $R_S = 11.55\%$, estima-se um índice de vazios final $e = 2.98$, correspondente a uma diminuição do índice de vazios de 14.86%. Deve-se considerar, porém, este valor como uma diminuição média dentro da célula unitária do CPR Grouting.

Na realidade, esta variação é grande próxima ao bulbo, tendendo a ser menos apreciável afastando-se. Isto foi experimentalmente observado por Weber et al. (2010) com processos de expansão de cavidades cilíndricas, conforme mostrado em Figura 5. Nota-se uma região de densificação bem definida, de diâmetro aproximadamente 2.5 vezes o diâmetro da cavidade. A extensão da área densificação pode ser estimada, por exemplo, pela teoria da expansão de cavidades, observando que coincide com a região de amolgamento, onde o excesso de poropressão ultrapassa a tensão efetiva vertical inicial (Idraratna et al., 2007).

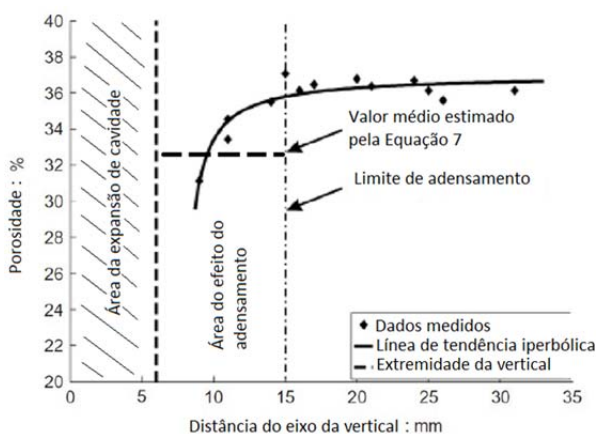


Figura 5. Porosidade em função da distância da cavidade expandida. Há diminuição dentro de uma área bem definida. Adaptado de Weber et al. (2010)

3.1 Incremento da resistência não drenada

O aumento da resistência não drenada, cujo valor pode ser estimado pela teoria do estado crítico (Wood, 1990), é consequência direta da diminuição do índice de vazios.

O incremento da resistência não drenada média, definido pela razão $\alpha = s_u/s_{u0}$, pode ser calculado pela seguinte expressão (Au et al., 2007):

$$\alpha = \exp\left(\frac{e_0 - e}{\lambda}\right) \quad (9)$$

onde e_0 é o índice de vazios do solo natural, e é o índice de vazios do solo após o enrijecimento e $\lambda = C_c/2.3$ é a inclinação da reta de compressão virgem no plano $e - \ln p'$.

Por exemplo, para uma argila mole com $C_c = 1.5$ e $e_0 = 5$, que se submete ao CPR Grouting com $R_S = 11.55\%$, tem-se: $\lambda = 0.652$, um índice de vazios final igual a $e = 4.307$ (pela Equação 8) e um incremento da resistência não drenada média igual a 2.895 (pela Equação 9), ou seja, três vezes o valor do solo na condição natural. No entanto, a qualidade final do solo enrijecido não pode ser avaliada apenas com a contribuição da fase "solo", mas sim com a interação "solo/bulbos", ou seja, considerando-se o estado homogeneizado pós-CPR Grouting.

4 ANÁLISE DE CASO REAL

4.1 Cidade do Rock

Por meio de ensaios pressiométricos Ricco et al. (2013) avaliaram a melhoria de rigidez e resistência da argila mole presentes no solo da Cidade do Rock, na Barra da Tijuca, reportando que para a argila, situada a 3 metros de profundidade, com parâmetros $C_c = 2.4$ e $e_0 = 5.12$, o incremento da resistência não drenada encontrado foi cerca de 1.65. O solo foi enrijecido com CPR Grouting em malha quadrada com espaçamento entre drenos de 1.5 m. O volume de projeto de cada bulbo foi 900 l por metro de profundidade. A partir destas informações é possível estimar, pelas Equações 2, 8 e 9, a razão de substituição, R_S , o índice de vazios pós-CPR Grouting e o incremento de resistência não drenada, α , respectivamente. Os resultados estão resumidos na Tabela 1. O incremento de resistência não drenada, calculado pelo método proposto, é muito próximo ao medido por Riccio et al. (2013), confirmando que com uma abordagem muito simples é possível estimar, rapidamente, o aumento da resistência não drenada do solo enrijecido com CPR Grouting.

Tabela 1: Resultados obtidos pelo método simplificado proposto e comparação do incremento calculado com o aumento da resistência medido com ensaio pressiométrico.

Malha	S (m)	A (m ²)	R _S	Profundidade (m)	e ₀	C _c	e	λ	α (Riccio et al., 2013)	α (calculado pela Eq. 9)
Quadrada	1.5	9	10%	1	6.64	2.9	5.88	1.261	2.10	1.83
				3	5.12	2.4	4.51	1.087	1.65	1.75
				5	0.84	0.6	0.66	0.365	2.08	1.64
				7	2.33	0.5	2.00	0.208	1.16	4.89

4.2 Trecho sul do Rodoanel Mário Covas–SP

Com base no resultado de ensaios com penetrômetro dinâmico leve (DPL) e sondagem à percussão (SPT), Nogueira (2010) indicou um incremento α entre 2.50 - 2.55 na resistência não drenada da camada tratada com CPR no Rodoanel trecho Sul (SP), entretanto este aumento não foi homogêneo, pois os valores se encontram no intervalo 0.99 – 5.63. É importante ressaltar que o valor avaliado por Nogueira (2010) é obtido a partir de uma ponderação volumétrica.

O enrijecimento do solo foi feito com bulbos de 1200 l/m de profundidade, em malha quadrada, com espaçamento entre drenos de 1.70 m. A razão de substituição foi, então, R_S = 10.38%. Nogueira (2010) forneceu somente o valor médio da razão de compressão CR = C_c/(1+e₀) = 0.21, deduzido a partir do monitoramento do recalque com aterro de sobrecarga feito posteriormente ao CPR Grouting, em área não tratada.

Por meio de simples manipulações algébricas é possível observar que:

$$\frac{e_0 - e}{\lambda} = 2.3 R_s \frac{1 + e_0}{C_c} \quad (10)$$

Portanto, aplicando as Equações 9 e 10, o ganho de resistência não drenada seria $\alpha = 3.12$. Este valor encontra-se maior que o proposto por Nogueira (2010), todavia é muito próximo ao valor médio no intervalo 0.99 - 5.63.

5 CONCLUSÃO

Com o resultado deste estudo, é possível

estimar o incremento da resistência não drenada do solo comprimido, confinado e adensado com o CPR Grouting. Para a estimativa, os dados necessários são a razão de compressão CR = C_c/(1+e₀), a geometria da malha e o volume de projeto dos bulbos de compressão, os quais são resumidos na razão de substituição, R_S, definida pela Equação 1. Desta forma, poder-se-á calcular a resistência não drenada do solo comprimido, confinado e adensado, com base na Teoria do Estado Crítico (Wood, 1990), multiplicando-se a resistência não drenada do solo virgem, s_{u0}, pelo incremento α calculado com as Equações 9 e 10.

A determinação, em laboratório, do coeficiente de redução de volume devido ao adensamento, λ_c, possibilita melhores resultados nas estimativas. Para isto, é aconselhável utilizar uma célula triaxial modificada, em que a expansão de cavidade é feita por meio de membrana sob pressão. Para maiores informações sobre a configuração do equipamento, sugere-se consultar o pessoal de laboratório da Enggraut.

Resta avaliar, em um estudo posterior, a contribuição dos bulbos de compressão na definição da resistência do solo homogeneizado. Complementarmente, o efeito do amolgamento, proporcionalmente à sensibilidade da argila a ser enrijecida, também merece uma análise específica.

REFERÊNCIAS

- Au, S. K. A., Soga, K., Jafari, M.R., Bolton, M.D. and Komiyama K. (2003). Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129:254-262.
- Au, S. K. A., Yeung, A. T., Soga, K. and Cheng, Y. M.

- (2007). Effects of subsurface cavity expansion in clays. *Géotechnique* 57, No. 10, 821-830.
- Indraratna, B, Rujikiatkamjorn, C and Walker, R., (2007) Radial consolidation theories and numerical analysis of soft soil stabilisation via prefabricated vertical drains, *International Workshop on Constitutive Modelling*, Hong Kong, January 2007, 155-167.
- Komiya, K., Soga, K., Akagi, H., Jafari, M.R. and Bolton, M.D. (2001) Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground. *Géotechnique* 51, No. 10, 835-846
- Nogueira, E. G. (2010) Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do rodoanel – SP. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Riccio, M., Baroni, M., Almeida, M., (2013) Ground improvement in soft soils in Rio de Janeiro: the case of the Athletes' Park, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 166, No.6, 36-43
- Soga, K., Au, S. K. A., Jafari, M. R. & Bolton, M. D. (2004). Laboratory investigation of multiple grout injections into clay. *Géotechnique* 54, No. 2, 81–90
- Weber T. M., Plotze, M., Laue, J., Peschke, G., Springman, S. M., (2010) Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in centrifuge model test. *Géotechnique* 60, No. 8, 197-206
- Wood, D. M. (1990) *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press
- Yu, H.-S. (2000). *Cavity Expansion Methods in Geomechanics*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands