

Avaliação da Técnica de Bulbos de Compactação em um Depósito de Areia Fofa

Christian C. E. Muñoz

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, chris.elescano@gmail.com

Jackeline R. C. Huertas

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, jackeline.castaneda@gmail.com

Celso Romanel

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, romanel@puc-rio.br

RESUMO: A execução de bulbos de compactação é uma técnica de melhoramento de solos cujo objetivo consiste na injeção controlada de argamassa para deslocar e densificar o solo ao redor sem fraturá-lo. A principal aplicação desta técnica esteve concentrada inicialmente na correção de problemas de recalques em estruturas mas, atualmente, está mais voltada para o melhoramento de solos. O presente estudo apresenta sua aplicação em um depósito de areia fofa seca e saturada, comparando resultados obtidos por meio de soluções analítica e numérica. A análise numérica é baseada no método dos elementos finitos e consiste em sequências de expansão de cavidades esféricas, utilizando formulação 2D axissimétrica com representação do comportamento mecânico do solo mediante os modelos constitutivos de Mohr-Coulomb e Hardening Soil (HSM). A solução analítica é fundamentada na teoria de expansão de cavidade esférica com consideração da hipótese de ruptura por cisalhamento cônico do solo acima do ponto de injeção. A eficiência da técnica dos bulbos de compactação é avaliada numericamente em termos do aumento da razão entre tensões radiais iniciais e finais, do módulo de cisalhamento ao longo da profundidade e do aumento da densidade relativa. Os efeitos da execução de bulbos de compactação estenderam-se a uma distância radial aproximada de 15 raios iniciais do bulbo a partir do eixo de injeção. As pressões limite obtidas no modelo axissimétrico estão dentro dos intervalos recomendados na literatura, porém com diferenças importantes em relação aos valores calculados pela solução analítica.

PALAVRAS-CHAVE: Bulbo de compactação, Melhoramento do solo, Expansão de cavidade esférica, Análise numérica.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, em decorrência do aumento da população urbana no Brasil e da falta de terrenos disponíveis nas grandes cidades, tende a desenvolver projetos em áreas antes consideradas inviáveis, caracterizadas pela presença de solos arenosos fofos ou estratos de argila mole, de baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade sob carregamento gerado por construções de grande porte.

A técnica de bulbos de compactação

(*compaction grouting*), especialmente indicada para solos arenosos fofos, emprega uma mistura adequada de areia, argila, cimento e água, formando uma argamassa que é bombeada sob pressão através de uma tubulação, criando bulbos no interior do maciço que são expandidos em função de valores de pressão e volume pré-determinados. A execução de bulbos sucessivos forma uma coluna que atua comprimindo radialmente o solo, compactando-o e assim melhorando suas características geotécnicas (Graf, 1969; Warner e Brown,

1974; ASCE, 2010).

Durante a década de 1950, esta técnica foi utilizada principalmente para a correção de problemas de recalque em estruturas, sendo posteriormente empregada para mitigação do potencial de liquefação de solos arenosos fofos (Andrus e Chung, 1995).

Como técnica de melhoramento de solos arenosos, necessita do conhecimento de uma série de parâmetros do depósito de solo para determinação do espaçamento entre colunas, número de etapas e taxas de injeção da argamassa, com o estabelecimento de uma pressão de injeção limite e do raio final do bulbo de compactação.

No presente artigo alguns resultados quantitativos relacionados com o melhoramento de um depósito de areia fofa são discutidos e sempre que possível comparados com a solução analítica proposta por El-Kelesh *et al.* (2001). Os resultados foram obtidos por meio de simulação numérica pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa Plaxis 2D em análises axissimétricas, admitindo o comportamento mecânico do solo representado pelos modelos constitutivos de Mohr-Coulomb (MCM) e *Hardening Soil Model* (HSM).

2 SOLUÇÃO ANALÍTICA

A solução analítica de El-Kelesh *et al.* (2001) está baseada na teoria de expansão de cavidade esférica desenvolvida por Vesic (1972) e na hipótese de ruptura por cisalhamento cônica proposta por Wong (1974).

2.1 Expansão da cavidade esférica

O processo de injeção foi definido com base na teoria de expansão de cavidade esférica de Vesic (1972). O bulbo tem raio inicial R_{ini} e o solo está em estado isotrópico de tensões efetivas q . Quando uma pressão p é aplicada na interface solo-bulbo o raio se expande para um valor R e uma zona esférica de raio R_p passa a exibir comportamento elastoplástico. Além da interface elastoplástica o solo permanece no estado elástico (figura 1).

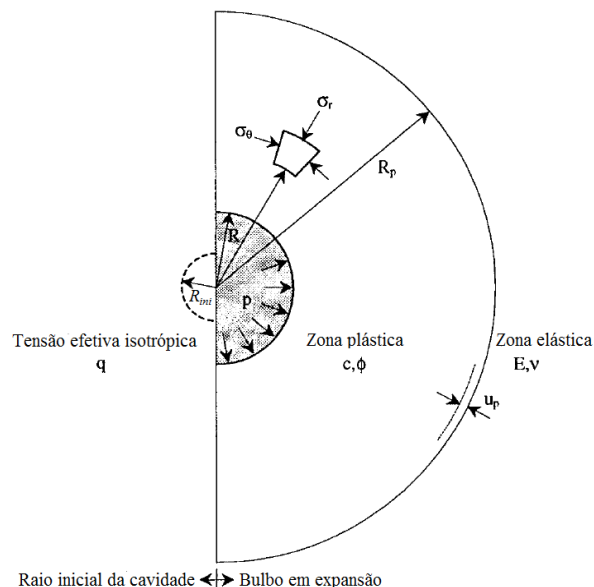


Figura 1. Modelo de expansão de argamassa (adaptado de El-Kelesh *et al.*, 2001)

A equação (1) descreve a resposta do solo durante o processo de injeção.

$$R = R_{ini} \left[a_1 \left(\frac{p + a_2}{a_3} \right)^{a_4} + \left(\frac{a_3}{p + a_2} \right)^{a_4} - a_5 \right]^{1/3} \quad (1)$$

onde a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 são constantes dependentes do tipo de solo e da profundidade da injeção (El-Kelesh *et al.*, 2001).

2.2 Ruptura por cisalhamento

Um tipo de ruptura na forma de soma superfície cônica ocorre quando o material circundante ao bulbo injetado atinge a sua capacidade máxima. Este fenômeno foi observado por Graf (1969) para um solo granular com ocorrência de levantamento da superfície do terreno. O valor da pressão limite de injeção p , para um determinado raio do bulbo R , pode ser determinado por equilíbrio das forças atuantes no tronco do cone da figura 2, envolvendo o peso do volume de solo, a força vertical decorrente da pressão exercida pelo bulbo e as forças reativas desenvolvidas ao longo da superfície cônica de ruptura calculadas com base no critério de Mohr-Coulomb. A pressão de injeção foi calculada por Wong (1974) como

$$p = \gamma \cdot h \cdot \frac{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 3\left(\frac{h}{d}\right)\tan^2 \theta + 3\tan^2 \theta}{3\tan^2 \theta} \cdot \left[1 + \frac{(2 - \sin \phi)\cos(180 - (\theta - \phi))}{\cos \phi \cos \theta}\right] \quad (2)$$

onde h é a profundidade de injeção, R o raio da cavidade injetada, γ o peso específico do solo, ϕ o ângulo de atrito do solo e θ o ângulo de inclinação da superfície de ruptura cônica em relação ao plano horizontal.

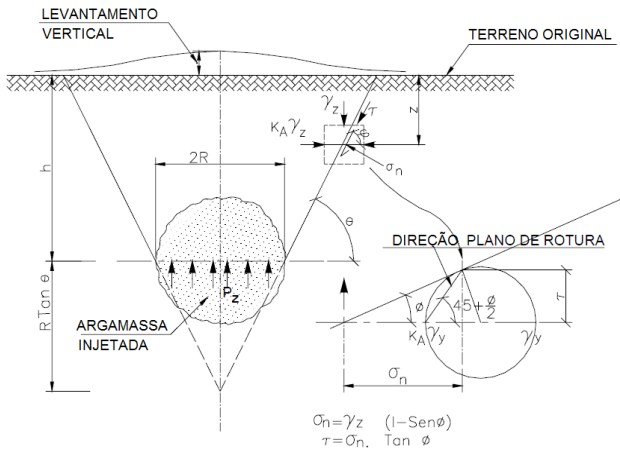


Figura 2. Ruptura por cisalhamento (adaptado de Wong, 1974)

2.3 Modelo analítico de El-Kelesh *et al.* (2001)

O modelo analítico de El-Kelesh *et al.* (2001) considera que o processo de injeção continua até atingir uma condição limite. O valor da pressão limite (p_{lim}), com seu respectivo raio limite (R_{lim}) do bulbo, corresponde ao menor valor entre a pressão de levantamento do terreno (p_{uph}) e uma pressão associada com deformações plásticas excessivas (p_{ex-def}), equivalente a 0,9 vezes a pressão última ou assintótica (p_{ult}). O modelo também considera que a zona plástica de raio R_p , formada pela aplicação da pressão limite, é a zona afetada pela execução de bulbos de compactação. Logo, o máximo espaçamento S entre colunas de bulbos corresponde a duas vezes o raio plástico ($S=2R_p$).

2.4 Verificação do melhoramento do solo

A partir da determinação do valor da pressão limite de injeção (p_{lim}) e do raio correspondente (R_{lim}), Henriquez (2007) propôs estimar o melhoramento do solo com base na variação do índice de vazios e (ou da porosidade n) e da densidade relativa na zona delimitada pelo raio plástico (R_p).

$$D_r = \frac{e_{max} - e_{final}}{e_{max} - e_{min}} = \frac{(n_{max} - n_{final})(1 - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})(1 - n_{final})} \quad (3)$$

3 SOLUÇÃO NUMÉRICA

3.1 Características do terreno

O perfil do depósito de solo está mostrado na figura 3, constituído por uma camada superficial de areia fofa de 9m de espessura, sobrejacente a um estrato de granito decomposto de 5m de espessura. A tabela 1 mostra as propriedades geotécnicas das camadas, enquanto que a tabela 2 se refere à argamassa pós-cura que forma os bulbos.

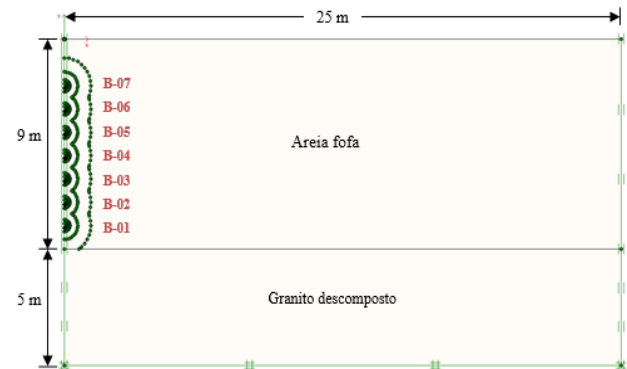


Figura 3. Geometria do problema com a indicação dos bulbos de injeção (B-01 a B-07).

3.2 Modelagem numérica

A simulação da injeção dos bulbos foi feita de modo ascendente (figura 3) considerando uma coluna composta por 7 bulbos, na sequência B-01 para B-07, separados entre si de 1m, com o primeiro deles (B-01) situado 1m acima do estrato de granito e o último (B-07) localizado 2m abaixo da superfície do terreno.

A aplicação da injeção para simulação da formação do bulbo, com raio inicial $R_{ini}=0,10\text{m}$ e raio final $R_{final}=0,35\text{m}$, foi feita considerando 3 diferentes opções de modelagem: caso A (figura 4a) prescrevendo uma variação volumétrica de 750% na argamassa que preenche o bulbo; caso B (figura 4b) aplicando uma pressão no interior da cavidade vazia do bulbo; caso C (figura 4c) prescrevendo deslocamentos radiais de 0,25m no interior da cavidade vazia do bulbo.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos para areia (Henriquez, 2007) e granito decomposto (Chan, 2005).

Parâmetro	Unidade	Areia fofa		Granito
-	-	MCM	HSM	MCM
γ_{unsat}	kN/m^3	16,5		17
γ_{sat}	kN/m^3	16,5		19
e_{ini}	-	1,05		-
$e_{m\acute{a}x}$	-	1,10		-
e_{min}	-	0,61		-
E	kPa	8000	-	60000
E_{50}^{ref}	kPa	-	8000	-
E_{0ed}^{ref}	kPa	-	8000	-
E_{ur}^{ref}	kPa	-	24000	-
m	-	-	0,5	-
c_{ref}'	kPa		0	5
ϕ'	°		30	38
ψ	°		0	0
ν'	-	0,3	-	0,25
ν_{ur}	-	-	0,3	-
p_{ref}	kPa	-	100	-
K_0^{nc}	-	-	0,5	-
R_f	-	-	0,9	-

Tabela 2. Propriedades do material dos bulbos (Chan, 2005).

Modelo	γ (kN/m^3)	E (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
MCM	22	120000	400	30

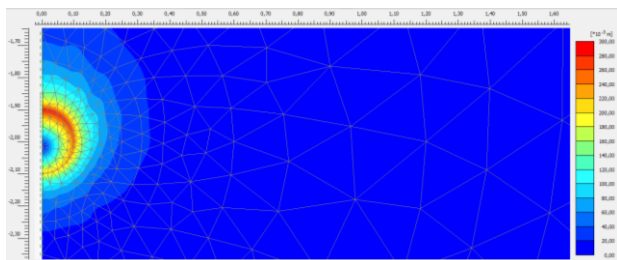


Figura 4a. Caso A- prescrevendo variação de volume (750%) no material do bulbo.

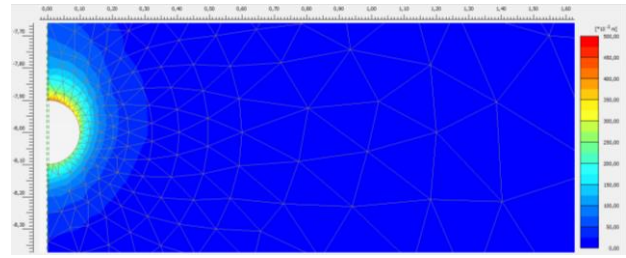


Figura 4b. Caso B - aplicando uma pressão no contorno da cavidade do bulbo.

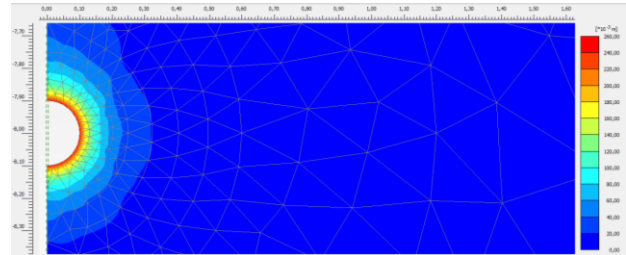


Figura 4c. Caso C - prescrevendo deslocamentos radiais de 0,25m no contorno da cavidade do bulbo.

4 RESULTADOS DAS ANÁLISES

4.1 Eficiência do tratamento

A eficiência do tratamento foi avaliada em termos em termos do aumento da densidade relativa e da razão entre tensões radiais iniciais e finais comparando os modelos MCM e HSM, assim como do módulo de cisalhamento ao longo da profundidade no modelo HSM.

As variações do índice de vazios (e) e da densidade relativa (D_r) com a distância radial após a execução dos bulbos de compactação são mostradas nas figuras 5 e 6.

Os resultados obtidos com ambos os modelos constitutivos (MCM e HSM) mostram leves diferenças que se acentuam para os bulbos situados mais próximos à superfície (B-07) e também aumentam com a proximidade ao contorno dos bulbos.

A Figura 7 mostra a variação com a profundidade das tensões radiais normalizadas (σ/σ_{ini}) nas distâncias radiais 0,75m; 1m e 1,25m. Estas distribuições são bastante próximas nos modelos MCM e HSM.

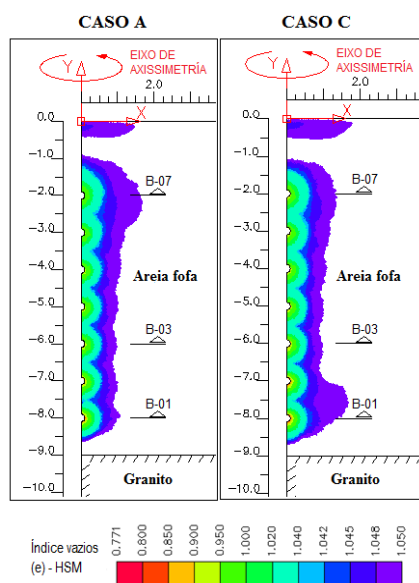
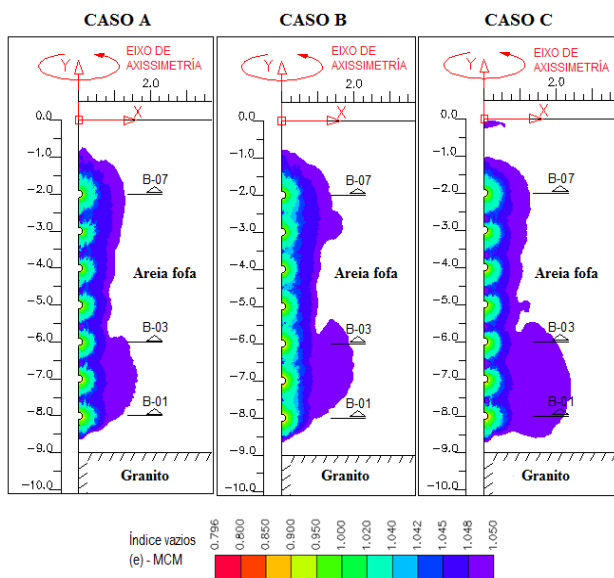


Figura 5. Variação do índice de vazios para o modelo MCM (casos A, B e C) e HSM (casos A e C).

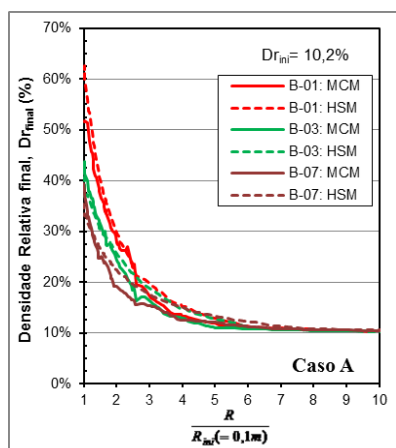


Figura 6. Variação da densidade relativa com a distância radial para o caso A (bulbos B-01, B-03 e B-07) nos modelos MCM e HSM.

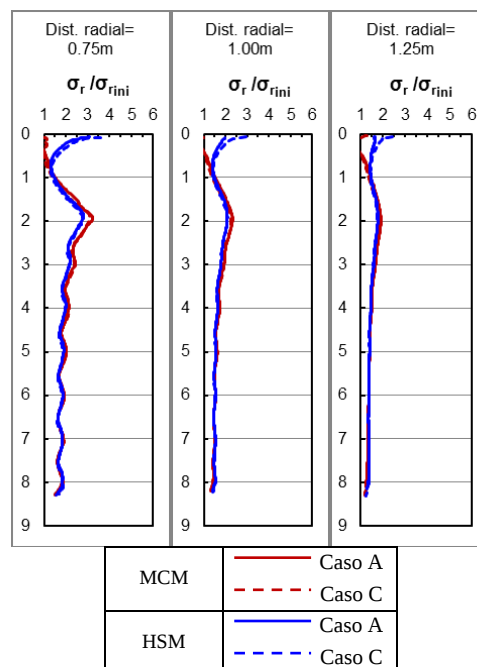


Figura 7. Variação da razão de tensões radiais com a profundidade nos modelos MCM e HSM (casos A e C).

Na distância radial de 1,25m os valores da razão de tensão são mais uniformes, variando entre 1,8 a 1,2, o que possivelmente indica um limite de eficiência do tratamento do solo pela expansão de bulbos.

A figura 8 mostra a variação com a profundidade da razão entre módulos de cisalhamento (G/G_{ini}) e de deformação volumétrica (K/K_{ini}) para as distâncias radiais de 0,75m; 1m e 1,25m. O valor do coeficiente de Poisson é admitido constante e estes módulos variam com a tensão efetiva média atuante no modelo HSM.

Como pode ser observado da figura 8, as razões entre módulos aumentam com a profundidade após o tratamento do solo, sendo bastante influenciadas localmente pela expansão de bulbos nas distâncias radiais mais próximas ao eixo da coluna.

4.2 Influência do lençol freático

A figura 9 mostra, para as profundidades de 2 a 8m, os resultados das pressões limite de injeção calculadas pelo método analítico nas situações de solo saturado (linhas cheias) e seco (linhas tracejadas). Conforme pode ser observado, os valores da pressão limite decaem na condição saturada, mas com aumento dos raios plásticos

que delimitam, na solução analítica, a região de solo considerado melhorado.

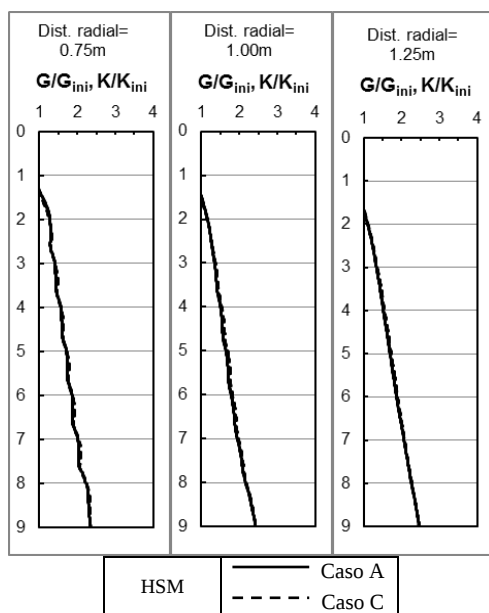


Figura 8. Variação da razão de módulos de cisalhamento e deformação volumétrica no modelo HSM (caso A e C).

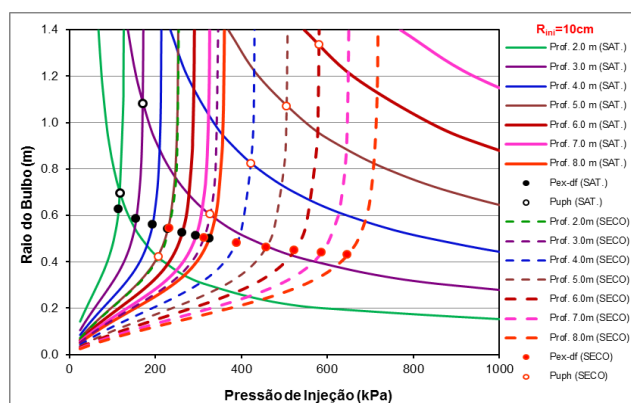


Figura 9. Pressões limite de injeção calculadas para as condições de areia seca e saturada na solução analítica.

Valores da pressão limite de injeção (p_{lim}), listados na tabela 3, foram calculados com base nas equações (1) e (2) e correspondem ao menor valor entre as pressões p_{pup} e p_{ex-df} como mencionado na seção 2.3.

O melhoramento do solo pode ser expresso em termos da variação do índice de vazios na zona plástica ou da densidade relativa, como proposto por Henriquez (2007) pela equação (3) e conforma mostra a tabela 4.

Para o caso da areia saturada o índice de vazios inicial (1,05) diminuiu para valores entre 1,02 e 0,98, enquanto para a areia seca diminuiu

para valores entre 0,96 e 0,94, o que indica uma menor eficiência do tratamento para o depósito de areia na condição saturada.

Tabela 3. Pressões limites de injeção para diferentes profundidades nas condições de areia seca e saturada.

Prof. injeção (m)	Areia seca		Areia saturada	
	Pressão limite p_{lim} (kPa)	Raio limite R_{lim} (m)	Pressão limite p_{lim} (kPa)	Raio limite R_{lim} (m)
2	208,0	0,42	114,6	0,63
3	313,7	0,50	155,7	0,59
4	388,8	0,48	193,8	0,56
5	458,1	0,46	229,1	0,54
6	523,8	0,45	262,8	0,53
7	586,8	0,44	294,8	0,51
8	647,1	0,43	325,6	0,50

Tabela 4. Comparação do melhoramento do solo em termos de índice de vazios e densidade relativa para os casos de areia seca e saturada ($S = 2R_p$).

Prof. injeção (m)	Areia seca			Areia saturada		
	e_{final}	Dr_{final} (%)	S (m)	e_{final}	Dr_{final} (%)	S (m)
2	0,96	28,98	2,93	1,02	16,62	5,60
3	0,98	24,21	3,52	1,01	18,43	4,86
4	0,97	26,48	3,19	1,00	19,86	4,42
5	0,96	28,62	2,93	1,00	21,23	4,08
6	0,95	30,43	2,74	0,99	22,38	3,84
7	0,94	31,95	2,59	0,98	23,49	3,63
8	0,94	33,34	2,47	0,98	24,53	3,46

A resposta do depósito de areia saturada ao tratamento por bulbos de compactação também foi avaliada numericamente, considerando o modelo constitutivo HSM e a expansão dos bulbos simulada pelo aumento de volume da argamassa (caso A, figura 4a).

A figura 10 mostra para os bulbos B-01, B-03 e B-07 o melhoramento do solo em termos da densidade relativa, cujo valor inicial é 10,2%. Novamente se verifica que o melhoramento no solo saturado foi menor do que para o solo seco, e que esta diferença se acentua com a profundidade do bulbo.

4.3 Comparação entre soluções analítica e numérica para a camada de areia seca

A figura 11 e a tabela 5 mostram a variação da pressão limite de injeção com as profundidades dos bulbos. Conforme pode ser observado, os resultados da solução numérica (casos A, B e C)

diferem significativamente daqueles obtidos com a solução analítica; enquanto que os primeiros se situam na faixa de valores reportados na literatura, os valores analíticos calculados são muito mais baixos, provavelmente devido às simplificações e hipóteses assumidas no modelo de El-Kelesh *et al.* (2001). A diferença entre ambas as soluções cresce com a profundidade do bulbo, provavelmente porque a solução numérica considera a influência da camada mais rígida de granito decomposto, subjacente à camada de areia fofa, enquanto que a solução analítica não.

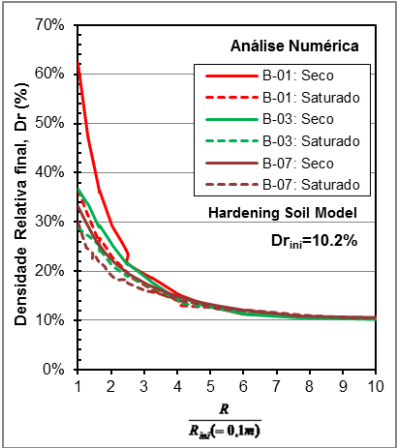


Figura 10. Comparação do melhoramento obtido nos casos de solo seco e saturado em termos de densidade relativa.

A figura 12 e a tabela 6 mostram a relação dos raios finais após aplicação da injeção determinados pelas soluções analítica e numérica (casos A, B, C). Nos casos A e C os raios finais da cavidade são coincidentes (0,35 m) enquanto que no caso B varia entre 0,34m a 0,43m B, situação na qual a pressão de injeção é aplicada na parede da cavidade do bulbo. Estes últimos resultados parecem indicar que esta estratégia de simulação é de mais difícil implementação, que pode ser comparada com o caso de uma fundação superficial flexível, na qual se aplica uma pressão uniforme (como no caso B) resultando em deslocamentos não uniformes da fundação.

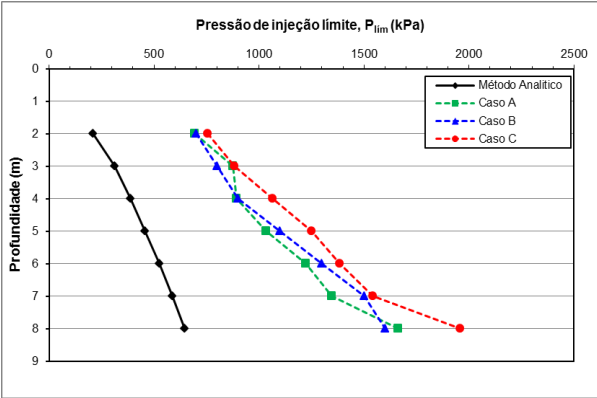


Figura 11. Comparação da pressão limite de injeção determinada nas soluções analítica e numérica.

Tabela 5. Comparação da pressão limite de injeção nas soluções analítica e numérica.

Prof. inj. (m)	Solução analítica	Pressão limite de injeção (kPa)		
		Caso A	Caso B	Caso C
2	208,0	695,3	700	756,3
3	313,7	875,3	800	884,3
4	388,8	891,3	900	1064,0
5	458,1	1034,0	1100	1249,0
6	523,8	1224,0	1300	1383,0
7	586,8	1345,0	1500	1542,0
8	647,1	1661,0	1600	1959,0

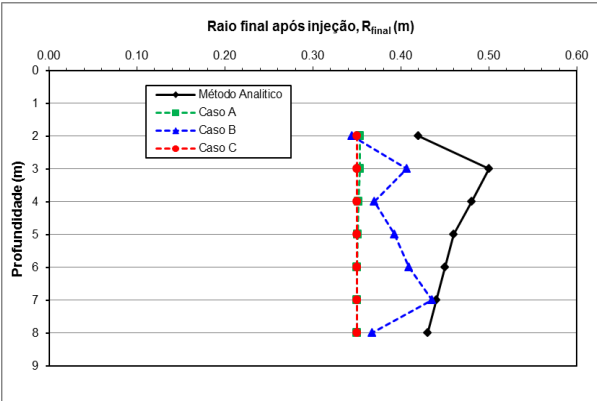


Figura 12. Comparação do raio final dos bulbos após aplicação da injeção nas soluções numérica e analítica.

Tabela 6. Comparação do raio final dos bulbos após aplicação da injeção nas soluções numérica e analítica.

Prof. inj. (m)	Solução analítica	Raio final após aplicação da pressão (m)		
		Caso A	Caso B	Caso C
2	0,42	0,35	0,34	0,35
3	0,50	0,35	0,41	0,35
4	0,48	0,35	0,37	0,35
5	0,46	0,35	0,39	0,35
6	0,45	0,35	0,41	0,35
7	0,44	0,35	0,43	0,35
8	0,43	0,35	0,37	0,35

5 CONCLUSÕES

Análises numéricas para simulação da técnica de bulbos de compactação em solos arenosos fofos revelaram-se mais abrangentes e realistas do que a aplicação da solução analítica de El-Kelesh *et al.* (2001).

Os valores de pressão limite de injeção (p_{lim}) calculados no modelo numérico 2D, entre as profundidades de 2m a 8m, encontram-se dentro da faixa de valores observados em campo (Warner e Brown, 1974; Graf, 1969; Andrus e Chung, 1995) mas são bastante diferentes dos resultados obtidos com o modelo analítico, com discrepâncias entre 500 kPa a 1000 kPa ao longo da profundidade.

Dos resultados numéricos, observou-se que a expansão do bulbo a partir do raio inicial 0,10m para o raio final 0,35m, provocou um melhoramento do solo que se estendeu até uma distância radial de 1,5m do eixo da coluna de injeção, permanecendo praticamente constante com a profundidade. Os resultados determinados em depósitos de areia seca e saturada indicam que a eficiência do tratamento é menor em solos saturados.

Nas análises numéricas o modelo HSM tem a vantagem de permitir verificar a eficiência do tratamento em termos das variações dos módulos de cisalhamento (G). De maneira geral, os resultados com o modelo HSM também mostraram menores flutuações em relação àqueles determinados com o modelo de Mohr-Coulomb (MCM).

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à CAPES pelo apoio financeiro desta pesquisa realizada no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

REFERÊNCIAS

- Andrus, R.D. e Chung, R.M. (1995). *Ground Improvement Techniques of Liquefaction Remediation near existing lifelines*, U. S. Department of Commerce, Gaithersburgh, MD 85 p.
- ASCE/G-I5310 (2010). *Compaction Grouting Consensus guide*, American Society of Civil Engineers.
- Chan, M.P. (2005) *Analysis and modeling of grouting and its application in civil engineering*, Dissertation. Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, 198 p.
- El-Kelesh, A., Mossaad M.E. e Basha, I.M. (2001). Model of Compaction Grouting, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, p. 955-964.
- Henriquez, C.I. (2007) *Mejora de terrenos potencialmente licuables con Inyecciones de Compactación*, Disertación de doctorado, Departamento de Ingeniería y Morfología del terreno, Universidad Politécnica de Madrid, 691 p.
- Graf, E.D. (1969). Compaction Grouting Technique and observations, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, p. 1151-1158.
- Vesic, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, p. 265-290.
- Warner, J. e Brown, D.R. (1974). Planning and Performing Compaction Grouting, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, p. 653-666.
- Wong, H.Y. (1974). Discussion of compaction grouting, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, p. 556-559.