

5

A técnica de bulbos de compactação em um depósito de areia fofa

5.1.

Introdução

Neste estudo de caso a técnica de bulbos de compactação é aplicada em um depósito de areia fofa. Duas abordagens foram empregadas para a verificação dos resultados de melhoramento: o método analítico (El-Kelesh *et al.*, 2001) e o método dos elementos finitos (Plaxis 2D, Plaxis 3D).

O perfil de solo está mostrado na Figura 5.1, constituído por uma camada superficial de areia fofa de 9m de espessura, sobrejacente a um estrato de granito completamente decomposto de aproximadamente 5m de espessura.

A Tabela 5.1 mostra as propriedades geotécnicas da areia e do granito decomposto, enquanto a Tabela 5.2 se refere ao material final que formam os bulbos, considerando o material de argamassa pós cura.

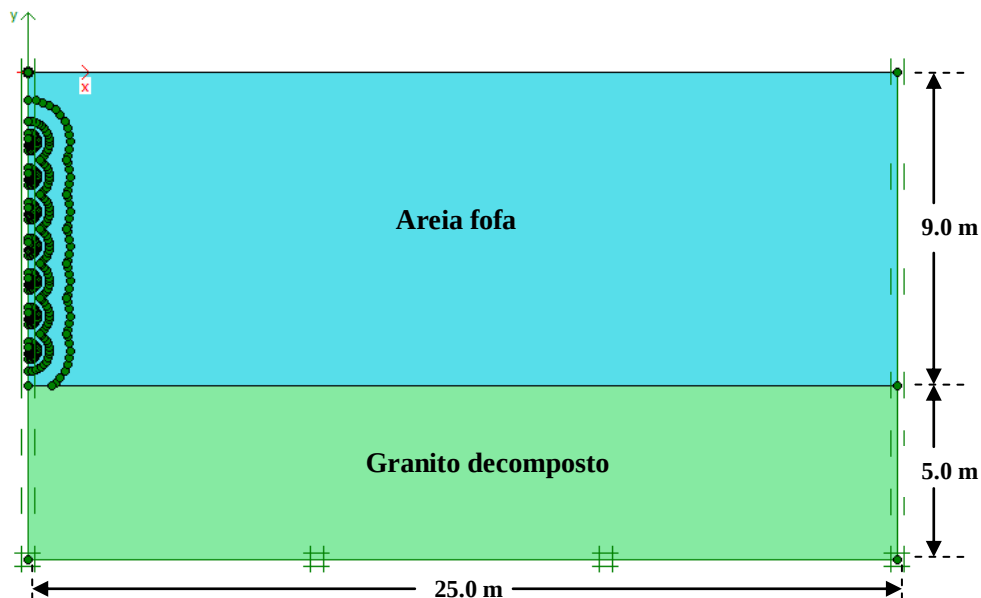


Figura 5.1 - Perfil do depósito de solo.

Tabela 5.1 - Parâmetros geotécnicos para a areia (Henriquez, 2007) e para o granito decomposto (Chan, 2005).

Parâmetro	Unidade	Areia fofa		Granito
Geral				
Modelo	-	Mohr-Coulomb	Hardening Soil	Mohr-Coulomb
γ_{unsat}	kN/m ³	16,5		17
γ_{sat}	kN/m ³	16,5		19
e_{ini}	-	1,05		-
e_{max}	-	1,10		-
e_{min}	-	0,61		-
Parâmetros dos modelos				
E' (constante)	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 5.2 - Propriedades e parâmetros do material dos bulbos (Chan, 2005).

Parâmetro	Unidade	Bulbo
Geral		
Modelo	-	Mohr-Coulomb
γ_{unsat}	kN/m ³	22
γ_{sat}	kN/m ³	22
Parâmetros do modelo		
E' (constante)	kPa	120000
ν'	-	0,33
c _{ref} '	kPa	400
ϕ'	°	30
ψ	°	0

5.2.

Método analítico – El-Kelesh *et al.* (2001)

No método analítico foram determinadas as pressões limites de injeção para as várias profundidades de execução dos bulbos, sendo a verificação do melhoramento do solo feita em termos da variação da densidade relativa da areia.

No método analítico uma pressão de injeção limite é determinada, para cada profundidade, em função de dois mecanismos: a resposta do solo durante a injeção, dada pela equação (4.34), e a resposta do solo na iminência da ruptura por cisalhamento, associada a uma superfície de forma cônica, dada pela equação (4.20). A Figura 5.2 representa graficamente esses dois mecanismos para uma profundidade de 3m, a partir dos quais é possível obter a pressão de injeção limite.

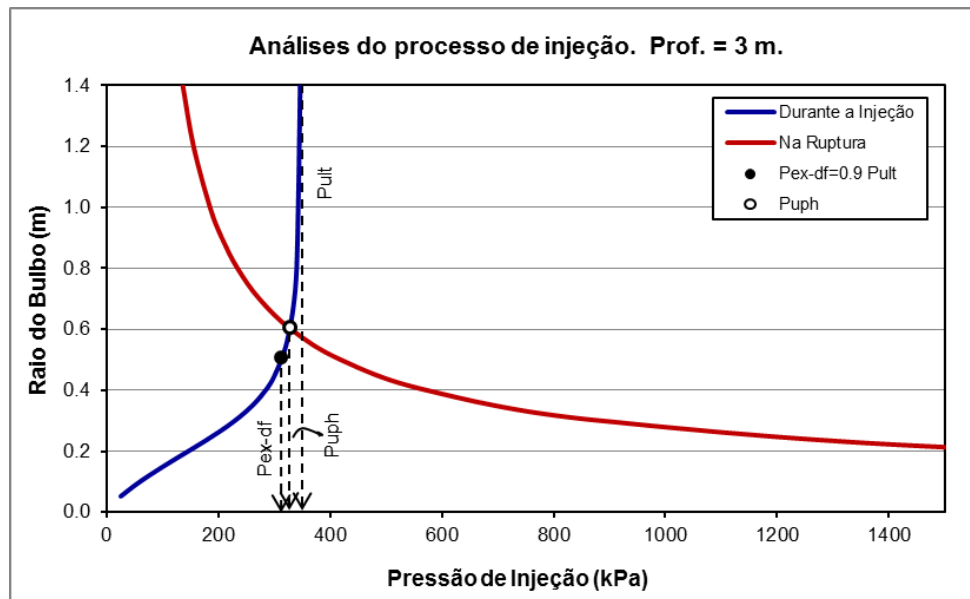


Figura 5.2 - Incremento do raio do bulbo durante o processo de injeção até atingir uma condição limite.

De acordo com a Figura 5.2, o raio do bulbo aumenta com a aplicação da pressão de injeção (equação 4.34) interceptando a curva da ruptura por cisalhamento (equação 4.20) em um valor denominado de pressão de levantamento (*upheave pressure*) P_{uph} , que indica o início da ocorrência de deslocamentos verticais na superfície do terreno. Pode-se observar também da curva que representa a resposta do solo durante a injeção, um aumento significativo do raio do bulbo, tendendo assintoticamente ao infinito, com a pressão atingindo um valor limite (*ultimate pressure*) P_{ult} .

Como mencionado anteriormente, o valor de P_{ult} não pode ser atingido por demandar um crescimento infinito do raio do bulbo. El-Kelesh *et al.* (2001) definiram então um valor de pressão associado com deformações plásticas excessivas P_{ex-df} que, por sua vez, pode ser correlacionada com a pressão última P_{ult} ou com a tensão de escoamento σ_{yield} de acordo a equação (4.35). Assim a

pressão de injeção limite (*limiting pressure*) P_{lim} é controlada pela menor das duas pressões, *i.e.* da pressão de levantamento do terreno P_{uph} ou pressão associada com deformações plásticas excessivas P_{ex-df} .

A Figura 5.3 mostra os resultados dos cálculos de pressão de injeção limite, bem como o correspondente raio limite¹ R_{lim} , para diferentes profundidades (2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8m), admitindo um raio inicial, equivalente ao raio do tubo de injeção, de $R_{ini} = 0,10$ m e um fator de ruptura $\alpha = 0,9$ (equação 4.35).

Valores de pressão de injeção limite e respectivos raios de bulbo para as diversas profundidades consideradas nesta análise estão sumarizados na Tabela 5.3.

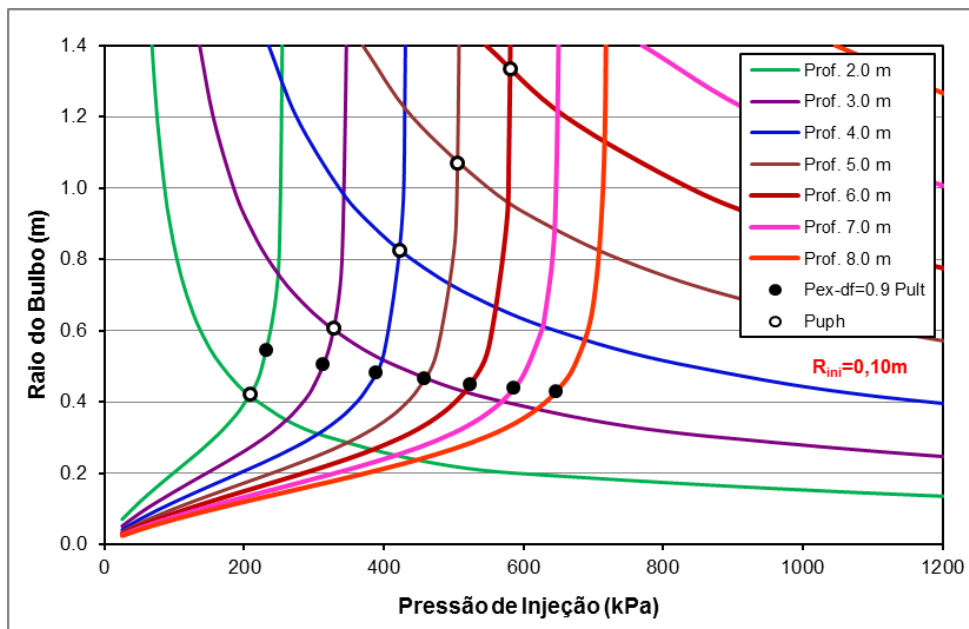


Figura 5.3 - Pressões limites obtidas para diferentes profundidades de injeção em depósito de areia fofa considerando um raio inicial do furo de 0.10 m.

¹ Este raio limite, R_{lim} , é correspondente ao raio R atingido, de acordo com a Figura 4.6a ou Figura 5.2.

Tabela 5.3 - Resumo das pressões limites obtidas para diferentes profundidades de injeção do depósito de areia.

Profundidade de injeção	Caso	Pressão (kPa)	Raio após injeção (m)	Pressão limite, P_{lim} (kPa)	Raio limite, R_{lim} (m)
2,0 m	P_{ult}	258,0	2,69	208,0	0,42
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	232,2	0,54		
	P_{uph}	208,0	0,42		
3,0 m	P_{ult}	348,5	1,71	313,7	0,50
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	313,7	0,50		
	P_{uph}	328,0	0,61		
4,0 m	P_{ult}	432,0	2,00	388,8	0,48
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	388,8	0,48		
	P_{uph}	423,2	0,82		
5,0 m	P_{ult}	509,0	1,68	458,1	0,46
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	458,1	0,46		
	P_{uph}	505,6	1,07		
6,0 m	P_{ult}	582,0	1,60	523,8	0,45
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	523,8	0,45		
	P_{uph}	581,0	1,34		
7,0 m	P_{ult}	652,0	1,69	586,8	0,44
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	586,8	0,44		
	P_{uph}	652,0	1,69		
8,0 m	P_{ult}	719,0	1,70	647,1	0,43
	$P_{ex-df} = 0,9 P_{ult}$	647,1	0,43		
	P_{uph}	719,0	1,70		

O melhoramento do solo foi calculado com base na redução de volume na zona plástica (equação 4.42), podendo ser expresso em termos de variação da densidade relativa (D_r) ou do índice de vazios (e). Os resultados obtidos estão listados na Tabela 5.4, onde pode-se verificar um ligeiro aumento da densidade relativa da areia com a profundidade, inicialmente de 10,20% e atingindo valores entre 24,21% e 33,34%. Da mesma forma, o índice de vazios inicial de 1,05 diminuiu para valores entre 0,98 e 0,94 ao longo da profundidade da camada.

Valores de raio plástico variaram entre 1,24m e 1,76m, com valor médio de 1,45m correspondente à zona de influência da injeção. No método de El-Kelesh *et al.* (2001), o espaçamento horizontal entre colunas de injeção corresponde a duas vezes o raio plástico, ou seja o espaçamento recomendado é $S = 2,90m$. Se por alguma especificação de projeto um maior grau de densificação for necessário, então deve-se reduzir o espaçamento entre as colunas de bulbos (Au *et al.*, 2003).

Tabela 5.4 - Melhoramento do terreno em termos de densidade relativa e índice de vazios final.

Prof. de injeção (m)	Raio plástico, R_p (m)	Diminuição do vol. zona plástica (m ³)	Índice vazios inicial, e_{ini}	Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	ΔDr (%)	S (m)
2,0	1,464	0,2543	1,05	0,96	28,98	18,78	2,928
3,0	1,758	0,3879	1,05	0,98	24,21	14,01	3,516
4,0	1,593	0,3227	1,05	0,97	26,48	16,28	3,186
5,0	1,464	0,2738	1,05	0,96	28,62	18,41	2,928
6,0	1,369	0,2395	1,05	0,95	30,43	20,23	2,738
7,0	1,296	0,2144	1,05	0,94	31,95	21,75	2,592
8,0	1,235	0,1938	1,05	0,94	33,34	23,14	2,470

Esta correção da separação entre colunas de bulbos (S) para atingir determinada densidade relativa é função do valor do raio plástico R_p ($S=2R_p$). Como o solo é ainda pouco compacto requer-se, por exemplo, nova densidade relativa for $Dr = 55\%$ (areia medianamente compacta), equivalente a um índice de vazios final de 0,83, os cálculos devem ser novamente executados. Esta redução é feita por meio de um novo cálculo (retroanálise) especificando qual o valor da densidade relativa (Dr_{final}) que se deseja atingir (equação 4.44) e, dessa forma, calcular a zona de influência (R_p) correspondente (equação 4.40). Os resultados desta retroanálise são apresentados na Tabela 5.5 com um novo valor de separação entre colunas de bulbos $S = 2,16\text{m}$ (dentro do intervalo sugerido por Graf, 1992; ASCE, 2010).

Tabela 5.5 - Variação do raio plástico para atingir a nova densidade relativa.

Prof. de injeção (m)	Bulbo	Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	R_p (m)	S (m)
2	B-07	0,83	55	1,08	2,16
3	B-06	0,83	55	1,19	2,38
4	B-05	0,83	55	1,14	2,28
5	B-04	0,83	55	1,09	2,18
6	B-03	0,83	55	1,05	2,10
7	B-02	0,83	55	1,02	2,04
8	B-01	0,83	55	0,99	1,98

Os valores de pressão limite, no entanto, resultaram menores do que aqueles reportados em campo por Warner & Brown (1974) e Graf (1992). De acordo com

El-Kelesh *et al.* (2001), existem fatores que podem causar esta diferença entre os valores de P_{lim} previstos e observados em campo, dentre os quais: (1) efeitos da injeção dos bulbos por estágios; (2) existência de estruturas vizinhas na superfície do terreno; (3) a atenuação do material de argamassa (fator não considerado no método analítico).

Durante o processo de tratamento do solo ocorre uma mudança no estado de tensões do solo devido à aplicação das injeções primárias, e isto pode influenciar o melhoramento à medida que furos secundários são injetados. De acordo com El-Kelesh *et al.* (2001) esta variação do estado de tensão deve ser considerada durante a injeção dos furos secundários, implicando em um incremento nos valores das pressões limites de injeção nestes furos. No exemplo ora estudado, os efeitos da injeção por estágios das injeções primárias sobre as secundárias foram considerados e seus resultados apresentados na Figura 5.4, de onde pode ser observado que os valores das pressões limite, considerando ou não a execução por estágios, resultaram praticamente as mesmas.

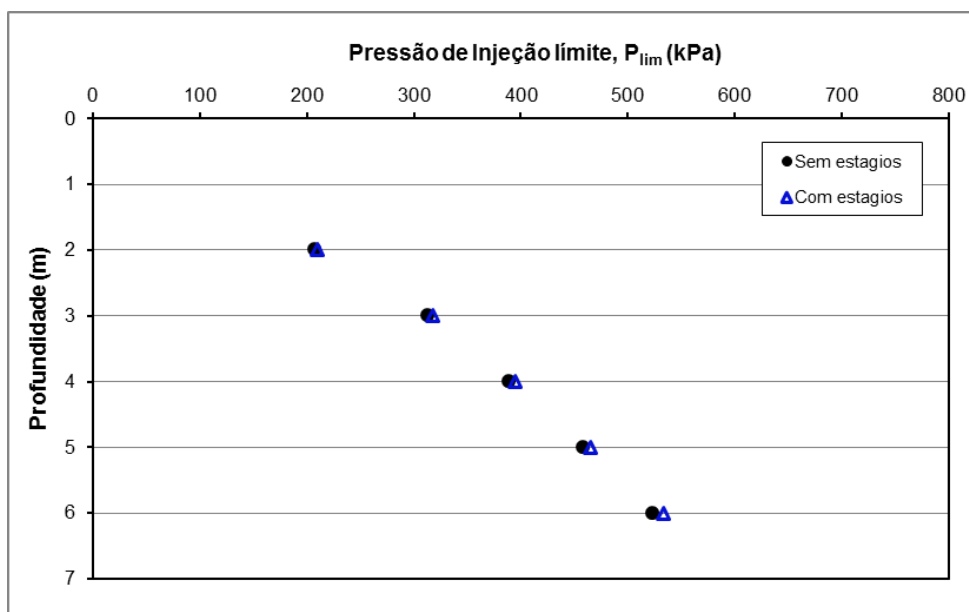


Figura 5.4 - Incremento das pressões limite considerando os efeitos da injeção por estágios.

Da mesma forma, a influência de estruturas vizinhas na superfície do terreno aumentaria o estado de tensões no solo e, em consequência, também os valores das pressões limites de injeção. Para considerar seus efeitos, basta aumentar os

valores de tensão no ponto considerado considerando os acréscimos de tensão ali causados pelo carregamento da estrutura.

Neste exemplo considerou-se que a estrutura aplica sobre a superfície do terreno incrementos de carga, uniformemente distribuídos, de 100, 150 e 200 kPa, aplicados em uma área quadrada de $3 \times 3 \text{ m}^2$ localizada sobre a coluna de bulbos de compactação. Esta área de carregamento está sobre o cone de ruptura (Wong, 1974), onde a uma profundidade de 8m, o cone tem um raio de 4,61m e uma inclinação de 60° respeito da horizontal (devido a que o ângulo de atrito do solo é de 30°). As novas tensões calculadas a uma determinada profundidade são calculadas como acréscimos gerados pelo carregamento na superfície, da formulação da teoria de elasticidade, isto é, pelo método de tensões de espraio, onde o valor da tensão a uma determinada profundidade se espraia segundo áreas crescentes. Então, a profundidade de injeção considerada no modelo corresponde a uma profundidade equivalente considerando a condição de campo livre, que resulte no mesmo estado de tensão para o caso de um depósito de solo com uma estrutura sobrejacente (resultante do método de tensões de espraio) com sua verdadeira profundidade de injeção.

As variações previstas nos valores das pressões limites de injeção estão mostradas na Figura 5.5, podendo ser observado que a influência da estrutura, como esperado, é maior para os bulbos situados mais próximos à superfície.

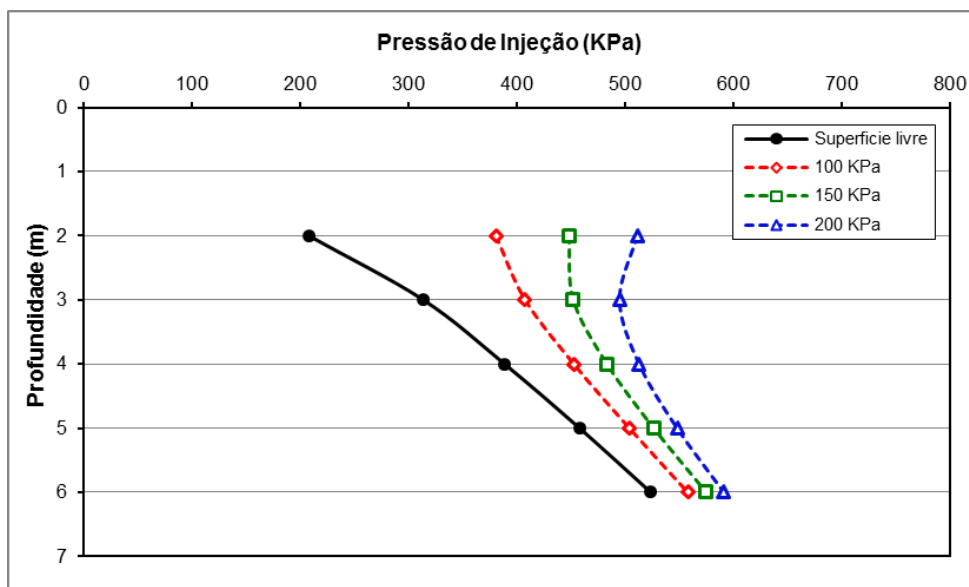


Figura 5.5 - Incremento das pressões limites de injeção considerando carregamentos de 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa aplicados na superfície do terreno.

Como percebido nas figuras anteriores, a pressão limite de injeção P_{lim} incrementa com a profundidade do bulbo, e seu valor correspondente ao menor dentre aqueles calculados para a pressão de levantamento (P_{uph}) e a pressão de deformação plástica excessiva (P_{ex-df}). O conhecimento da distribuição da pressão limite de injeção ao longo da profundidade é uma importante informação de projeto, pois o tratamento do solo deve ser interrompido quando seu valor for estabelecido em função da pressão de levantamento. Desta forma, para evitar a ocorrência de deslocamentos verticais na superfície do terreno, é possível determinar valores de profundidade crítica de injeção.

A Figura 5.6 identifica a profundidade crítica de injeção para este exemplo como o ponto de interseção das duas distribuições de pressão limite P_{uph} e P_{ex-df} , obtendo-se então o valor de 2,75m.

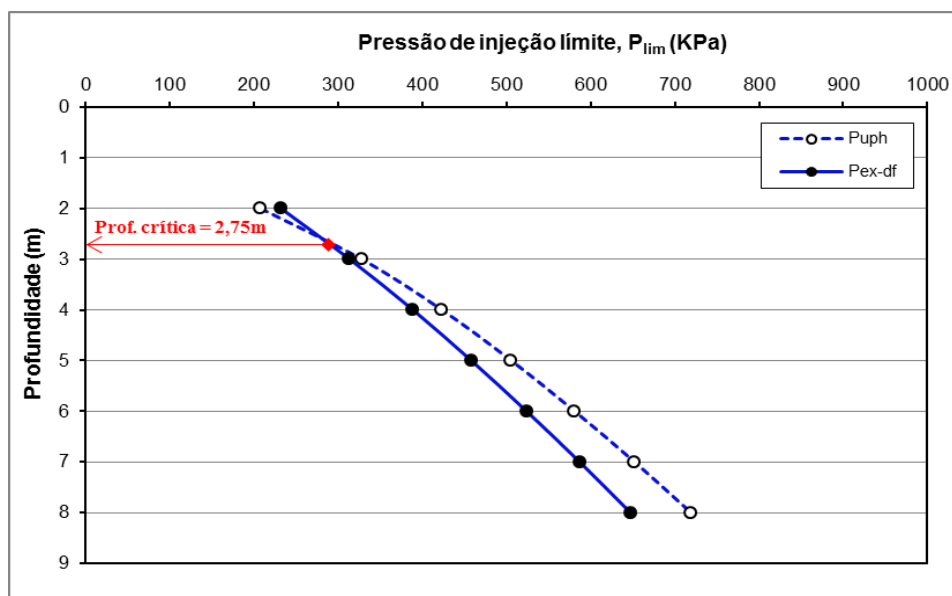


Figura 5.6 - Variação das pressões de injeção P_{uph} e P_{ex-df} para identificação da profundidade crítica de injeção.

5.3. Análise Numérica

5.3.1. Descrição do modelo

A análise numérica do tratamento da camada de areia fofa foi feita pelo método dos elementos finitos empregando o programa computacional Plaxis 2D v.2012, considerando um estado de tensão axissimétrico. A vantagem de se

utilizar uma formulação numérica é que a modelagem do problema pode ser representada de forma mais fidedigna, sem as restrições das hipóteses simplificadoras introduzidas nos métodos analíticos.

A injeção dos bulbos foi feita de baixo para cima (*bottom-up*) considerando-se uma coluna isolada composta por 7 bulbos, identificados na Figura 5.7, separados entre si de 1m, com o primeiro deles (B-01) situado 1m acima do estrato de granito decomposto e o último (B-07) localizado 2m abaixo da superfície do terreno. A injeção dos mesmos, na sequência B-01 para B-07 (Tabela 5.6) foi modelado em 7 etapas (cada etapa corresponde a um ponto de injeção). Cada fase de injeção tem tempos de carregamento considerados como desprezíveis em uma análise plástica por “estágios de construção” (no campo ocorre de 3 a 6 minutos cada estágio de injeção, item 3.2.5). O raio inicial dos bulbos $R_{ini}=0,10$ m é condizente com os empregados neste tipo de tratamento (de 5 a 10cm, conforme REMBCO).

O modelo constitutivo adotado para o estrato de granito decomposto e para o material dos bulbos foi o de Mohr-Coulomb (Tabela 5.1) enquanto que para a camada de areia as respostas considerando duas leis constitutivas foram examinadas: a primeira, com o modelo tradicional de Mohr-Coulomb, e a segunda com o modelo elastoplástico HSM (*Hardening Soil Model*) que permite estabelecer uma relação de dependência entre o módulo de deformabilidade e o estado de tensão no ponto, conforme mencionado anteriormente no capítulo 4.



Figura 5.7 - Geometria do problema com indicação dos bulbos de injeção (B-01 a B-07).

Tabela 5.6 - Sequência de injeção dos bulbos.

Profundidade de injeção (m)	Designação do bulbo	Sequência de injeção
2	B-07	 ASCENDENTE <i>(bottom-up)</i>
3	B-06	
4	B-05	
5	B-04	
6	B-03	
7	B-02	
8	B-01	

A malha de elementos finitos (Figura 5.8) foi constituída por 5782 elementos triangulares de 15 nós (função polinomial de interpolação de grau 4) com deslocamentos horizontais impedidos nos contornos verticais e deslocamentos verticais e horizontais impedidos no contorno inferior.

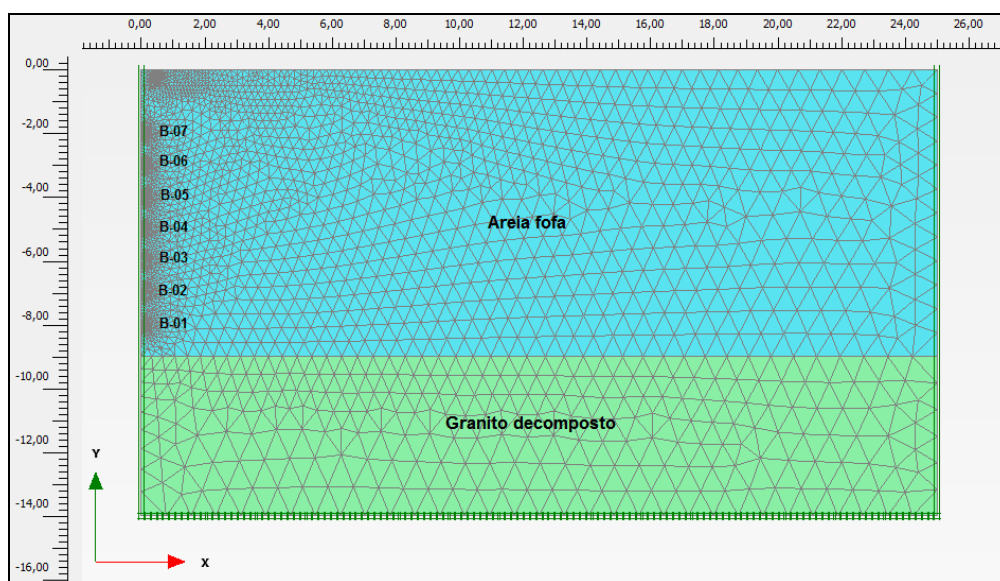


Figura 5.8 - Malha de elementos finitos para a análise axissimétrica.

A aplicação da injeção para simulação da formação do bulbo foi feita das três seguintes maneiras:

- **CASO A** – prescrevendo-se uma variação de volume de 750% no material do bulbo que preenche a cavidade esférica fazendo com que o raio inicial $R_{ini} = 0,10\text{m}$ atinja o valor final $R_{final} = 0,35\text{m}$.
- **CASO B** - aplicando um carregamento radial uniformemente distribuído na parede do furo (sem representação física do bulbo), correspondente à

aplicação da pressão de injeção, de modo que o raio inicial da cavidade inicial $R_{ini} = 0,10\text{m}$ atinja o valor final $R_{final} = 0,35\text{m}$.

- **CASO C** – prescrevendo deslocamentos radiais uniformes de $0,25\text{m}$ nos pontos nodais do contorno da cavidade (sem representação física do bulbo) de modo que o raio inicial da cavidade inicial $R_{ini} = 0,10\text{m}$ atinja o valor final $R_{final} = 0,35\text{m}$.

Em outras palavras, no caso A a rigidez relativa do material do bulbo em relação à rigidez da areia é levada em conta, enquanto que no caso C o bulbo é considerado formado por um material infinitamente rígido.

No caso B a rigidez relativa foi implicitamente considerada já que o valor da pressão de injeção foi determinado como a média dos valores das tensões radiais na interface bulbo-solo calculados no caso A. Para determinação das tensões radiais as componentes de tensão computadas pelo programa Plaxis 2D, orientadas em relação aos eixos Cartesianos globais, sofreram uma rotação com base nos ângulos diretores do plano tangente à superfície do furo no ponto P (Figura 5.9). A Tabela 5.7 lista os valores da pressão de injeção para os bulbos B-01 a B-07 assim calculados, que se encontram dentro do intervalo de variação reportados por outros investigadores (Tabela 3.1).

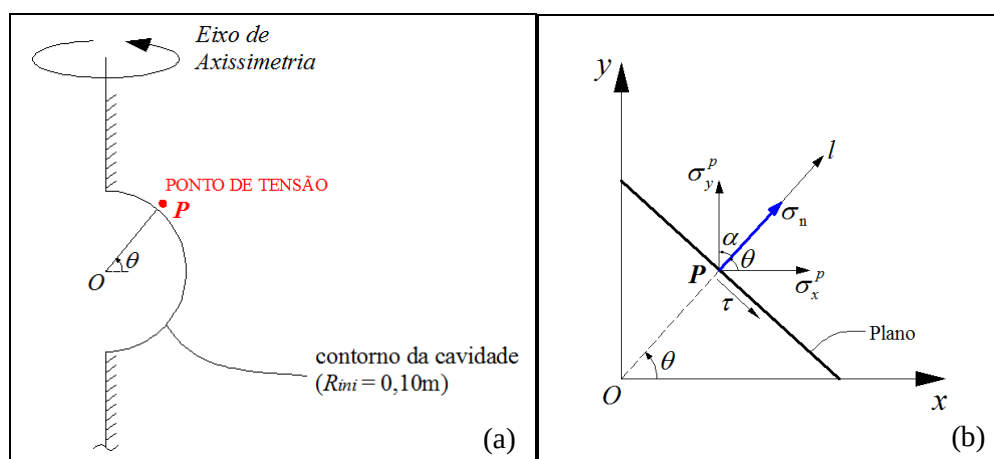


Figura 5.9 - (a) Esquema do cálculo da tensão radial no ponto P do contorno da cavidade para o caso B; (b) detalhe do estado de tensão no ponto de tensão P.

Tabela 5.7 - Pressões de injeção aplicadas no contorno da cavidade para o caso B.

Tensão de injeção (kPa)	Profundidade dos pontos de injeção (m)
1600	8
1500	7
1300	6
1100	5
900	4
800	3
700	2

Um diagrama de blocos ilustrando o procedimento geral da análise numérica é mostrado na Figura 5.10. Para o caso da modelagem utilizando a relação constitutiva de Mohr-Coulomb os resultados do tratamento são apresentados para os casos A, B e C, enquanto que para o modelo HSM resultados apenas contemplam os casos A e C.

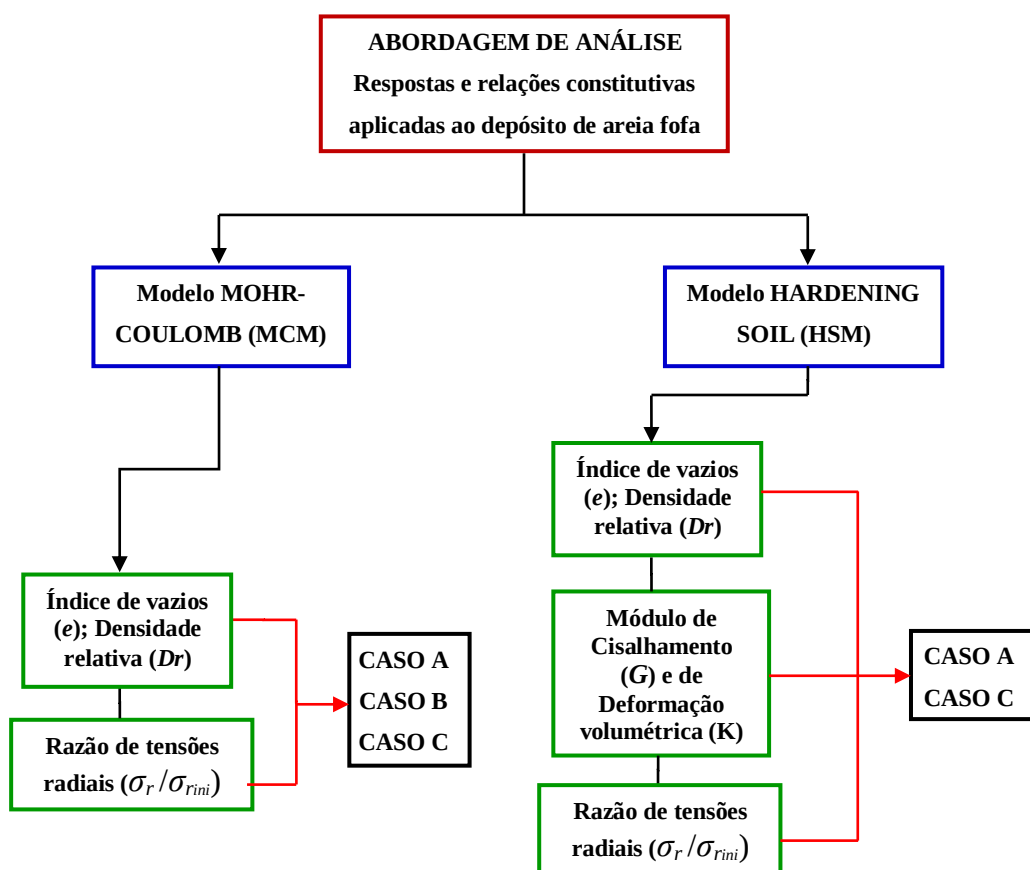


Figura 5.10 - Esquema geral da análise numérica 2D para a avaliação do melhoramento do depósito de solo considerando os modelos constitutivos de Mohr-Coulomb e HSM.

A eficiência do tratamento por bulbos de compactação foi avaliada em termos do acréscimo da densidade relativa (Dr), do decréscimo do índice de vazios (e) e da variação com a distância da razão entre as tensões radiais ($\sigma_r/\sigma_{r_{ini}}$). Adicionalmente, para o modelo HSM foi ainda possível avaliar as respostas em termos da variação do módulo de cisalhamento (G) e do módulo de deformação volumétrica (K).

5.3.2.

Eficiência do tratamento com o modelo de Mohr-Coulomb

A técnica de bulbos de compactação é um processo de deformação controlada, o que significa que a taxa de injeção e o volume de argamassa injetado são determinados e as pressões de injeção são medidas para estimativa da resistência do solo à formação do bulbo. De acordo com a norma G-1 53/10 (ASCE, 2010) a taxa de injeção recomendada é de 30ℓ/min a 60ℓ/min para estágios de injeção de 0,3m a 0,6m. Adicionalmente, vários outros autores sugerem critérios gerais para tratamento com bulbos de compactação (Brown & Warner, 1973; Warner & Brown, 1974; Graf, 1969 e 1992; El-Kelesh & Matsui, 2002; Wu, 2005) tais como: a) pressão limite de injeção de 4500 kPa; b) 0,14m³ de volume de argamassa injetado por estágio de 0,3m; c) deslocamento estrutural máximo de 6mm ou deslocamento vertical máximo de 13mm da superfície do terreno.

Com base nas recomendações acima, nesta dissertação foi utilizado um critério de volume de injeção limite de 0,12m³ para estágios de injeção (bulbos) de 1m. Este volume de injeção causaria uma deformação volumétrica de 750% nos furos com raio inicial de 0,10m (caso A).

a) Deslocamentos verticais na superfície do terreno

A Figura 5.11 apresenta a distribuição dos recalques (deslocamentos verticais negativos) na superfície da camada de areia após o tratamento pela execução da coluna de bulbos. Para os três casos analisados, os valores são de mesma ordem e de mesmo sinal (sem levantamento vertical na superfície).

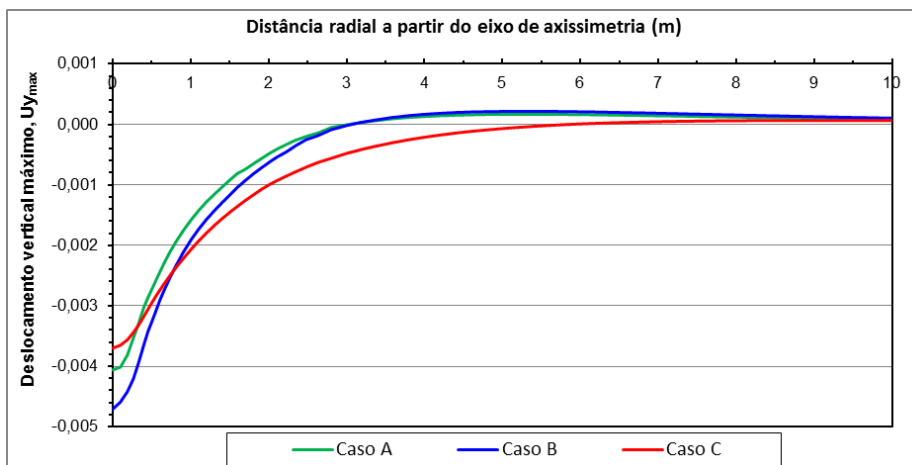


Figura 5.11 - Recalque (deslocamento vertical negativo) na superfície do terreno para os casos A, B e C. Valores em m.

b) Índice de vazios (e)

A variação do índice de vazios com a distância radial, após o processo de injeção, é mostrada para os casos A, B e C na Figura 5.12. Como esperado, o índice de vazios diminui gradualmente em resposta ao tratamento do solo, atingindo um valor mínimo nas proximidades da cavidade de injeção. Da figura, observa-se que a máxima redução ocorreu para o bulbo B-01 (mais profundo) e a mínima variação para o bulbo B-07 (mais superficial).

c) Densidade Relativa (D_r)

A variação da densidade relativa com a distância radial à coluna de bulbos apresenta a mesma tendência observada no comportamento do índice de vazios, como ilustra a Figura 5.13.

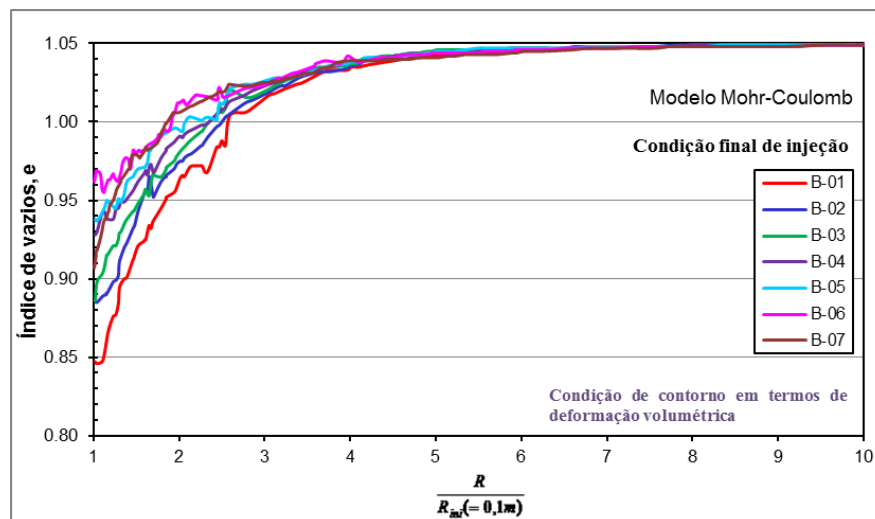
d) Razão de tensões radiais

A variação com a profundidade das tensões radiais induzida pela expansão dos bulbos pode ser observada nos gráficos da Figura 5.14, normalizadas em relação às tensões radiais iniciais ($\sigma_r / \sigma_{r_{ini}}$), para as distâncias radiais de 0.5m, 0.75m, 1m e 1.25m do centro da coluna de bulbos. Os resultados para os casos A, B e C são bastante próximos entre si, percebendo-se claramente que a variação da tensão radial atenua-se com a distância e com a profundidade dos bulbos. Vale notar que para a distância $r = 0,5m$ a influência da expansão dos bulbos é bastante nítida.

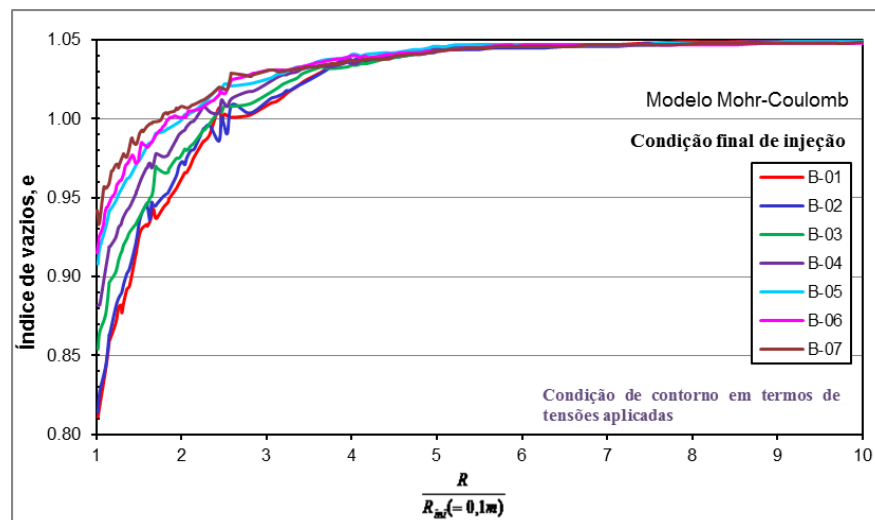
5.3.3. Eficiência do tratamento com o modelo HSM

a) Índice de vazios (e) / Densidade Relativa (D_r)

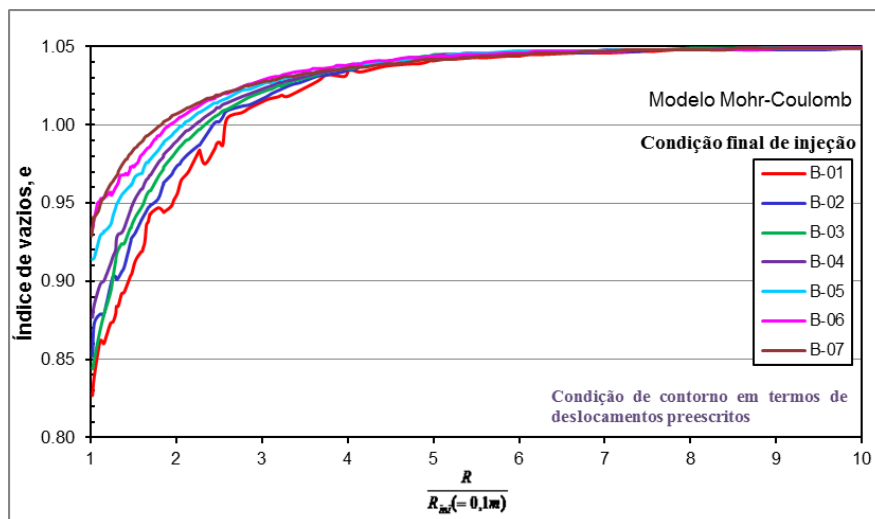
As variações do índice de vazios (e) e da densidade relativa (D_r) após a execução dos bulbos de compactação são mostradas na Figura 5.15 e Figura 5.16, respectivamente. Os resultados obtidos com ambos os modelos constitutivos (Mohr-Coulomb e HSM) apresentam leves diferenças que se acentuam para os bulbos situados mais próximos à superfície (B-07) e, de modo geral, também aumentam com a proximidade ao contorno dos bulbos. Outro ponto a destacar é que a variação dos valores obtidos com o modelo HSM foi bastante mais suave daquela observada no modelo de Mohr-Coulomb, com valores mais oscilantes.



(a) Caso A – prescrição de deformação volumétrica

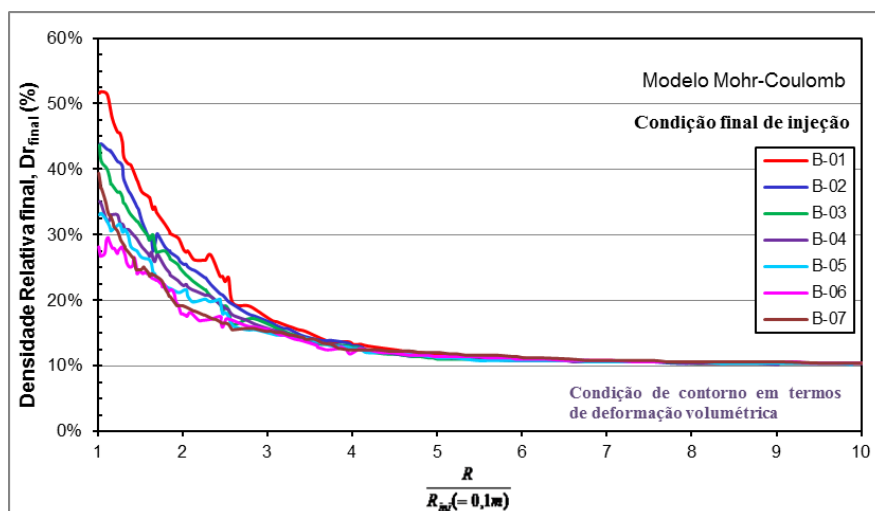


(b) Caso B – aplicação de pressão de injeção

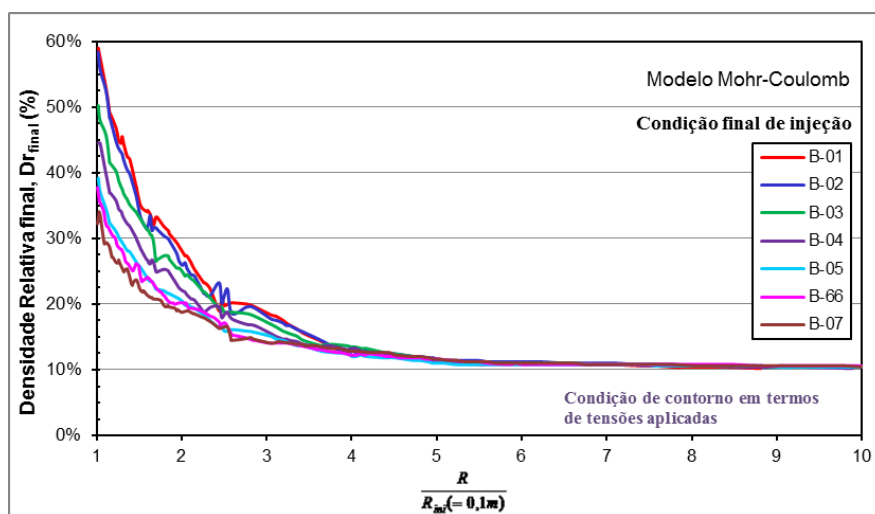


(c) Caso C – prescrição de deslocamentos na superfície do furo

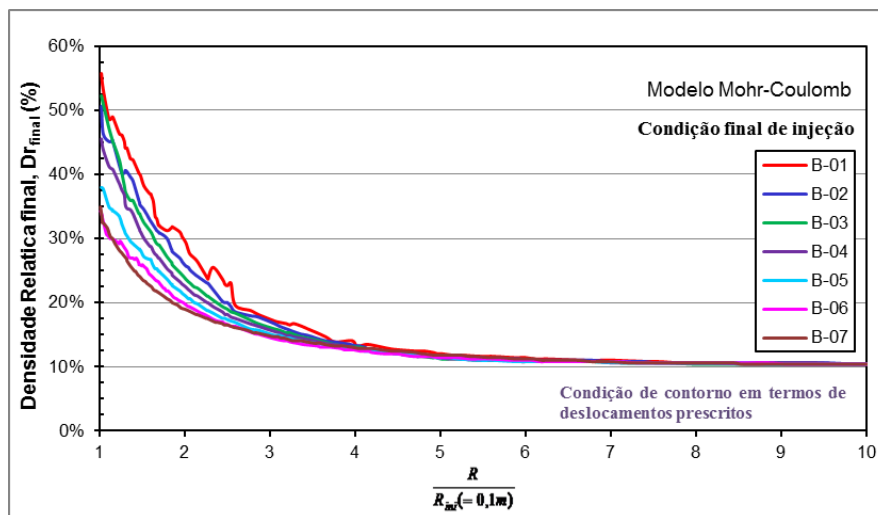
Figura 5.12 - Variação do índice de vazios com a distância radial para os casos A, B e C.



(a) Caso A - prescrição de deformação volumétrica



(b) Caso B - aplicação de pressão de injeção



(c) Caso C - prescrição de deslocamentos na superfície do furo

Figura 5.13 - Variação da densidade relativa (Dr) com a distância radial para os casos A, B e C.

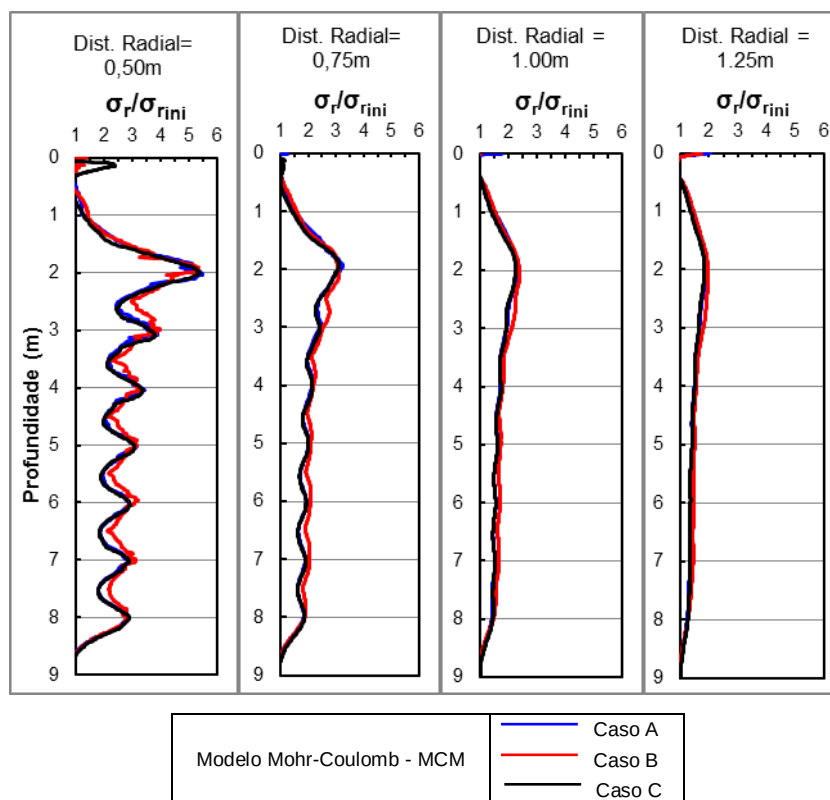
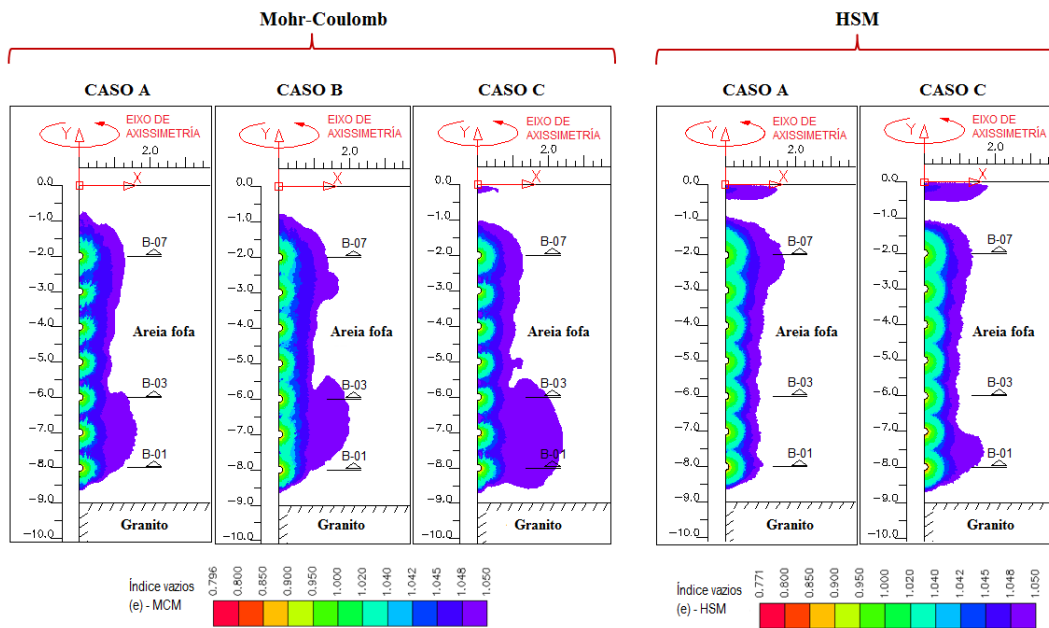
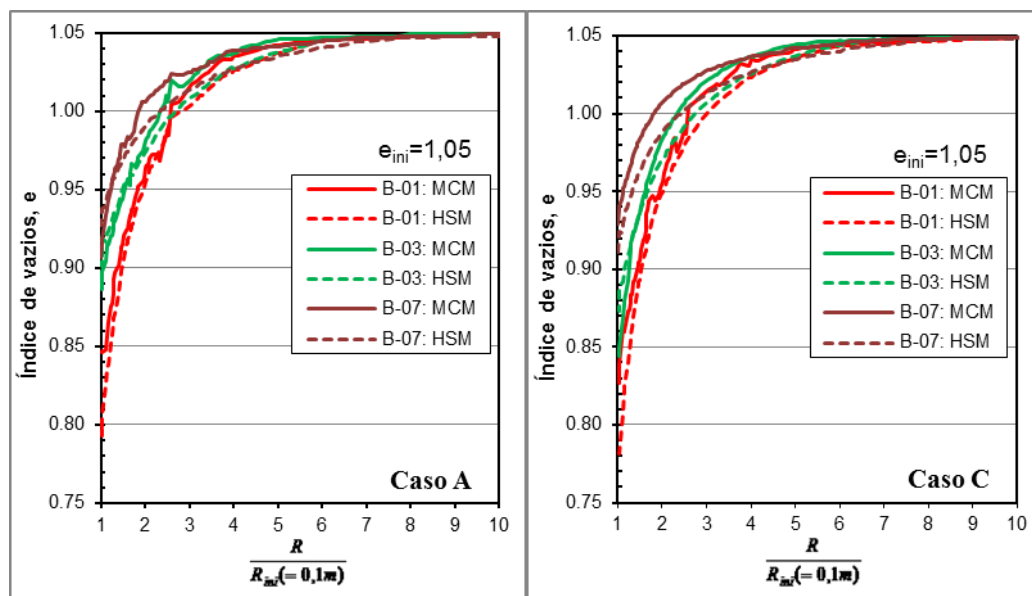


Figura 5.14 - Variação da razão entre tensões radiais, ao longo da profundidade, nas distâncias radiais $r = 0,5, 0,75, 1$ e $1,5\text{m}$ para os casos A, B e C.



(a)



(b)

Figura 5.15 – (a) Vista vertical da variação do índice de vazios para os modelos de Mohr-Coulomb (casos A,B e C) e HSM (casos A e C). (b) Variação do índice de vazios com a distância radial para os casos A (esquerda) e C (direita) determinados para os bulbos B-01, B-03 e B-07 com os modelos de Mohr-Coulomb e HSM.

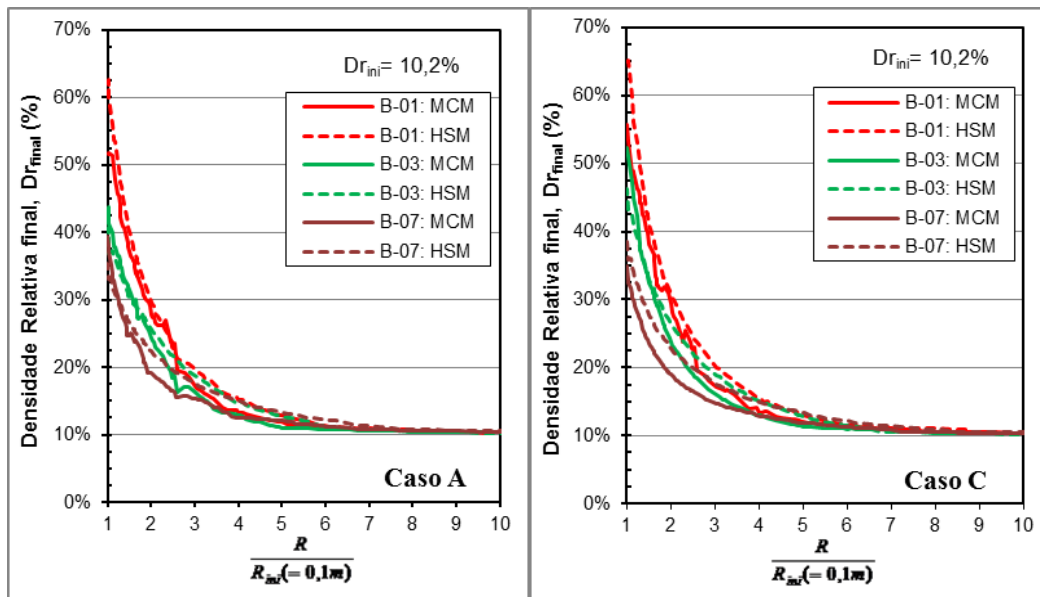


Figura 5.16 - Variação da densidade relativa com a distância radial para os casos A (esquerda) e C (direita) determinados para os bulbos B-01, B-03 e B-07 com os modelos de Mohr-Coulomb e HSM.

b) Razão de tensões radiais

A Figura 5.17 mostra a variação com a profundidade das tensões radiais normalizadas ($\sigma_r / \sigma_{r_{ini}}$) nas distâncias radiais $r = 0.5, 0.75, 1, 1.25m$. Estas distribuições são bastante próximas àquelas anteriormente calculadas com o modelo de Mohr-Coulomb. Na distância radial $r = 1,25m$ os valores da razão de tensão são mais uniformes com a profundidade, variando entre 1,8 a 1,2, já indicando a proximidade de um limite da eficiência do tratamento do solo por expansão de bulbos.

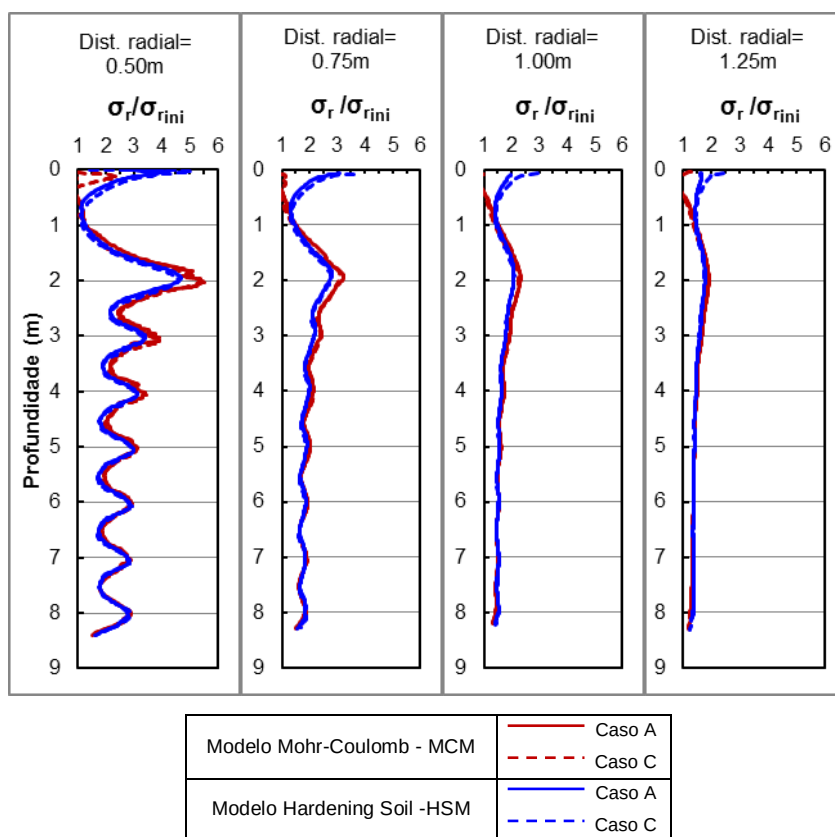


Figura 5.17 - Variação da razão de tensões radiais com a profundidade para os modelos de Mohr-Coulomb e HSM nos casos A e C.

c) Variação do módulo de cisalhamento (G) e módulo de deformação volumétrica (K)

A Figura 5.18 mostra a variação com a profundidade da razão entre módulos de cisalhamento (G/G_{in}) e entre módulos de deformação volumétrica (K/K_{in}) para as distâncias radiais $r = 0.5, 0.75, 1, 1.25m$. O valor do coeficiente de Poisson é admitido constante e estes módulos variam com a tensão efetiva média atuante no ponto no modelo HSM.

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

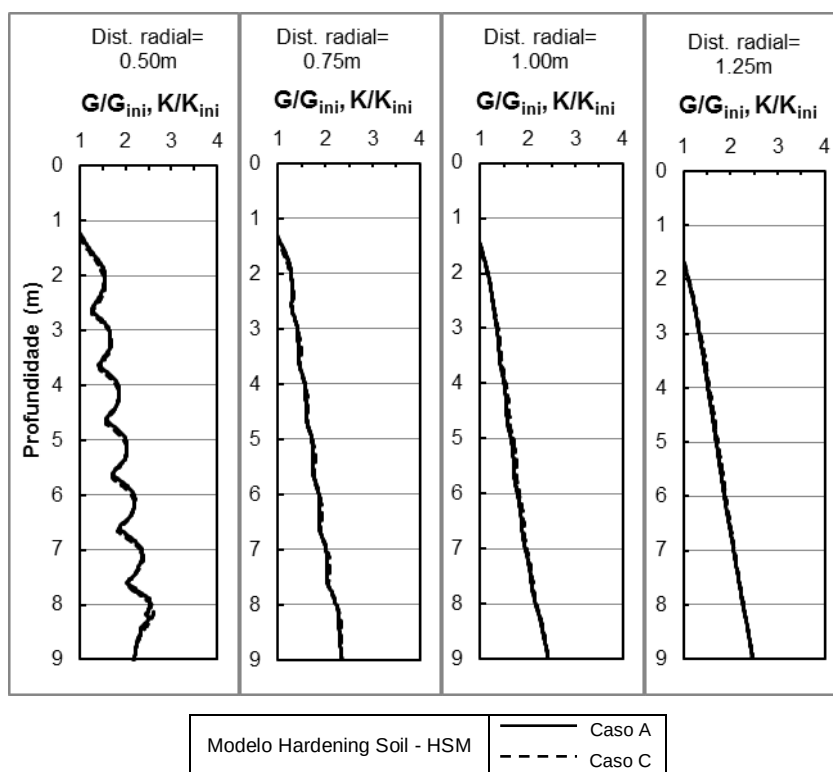


Figura 5.18 - Variação da razão entre módulos de cisalhamento e entre módulos de deformação volumétrica no modelo HSM para os casos A e C.

5.3.4. Influência da base rígida

Avalia-se a seguir a eficiência dos bulbos de compactação com respeito à distância do primeiro bulbo (B-01) ao estrato inferior de granito decomposto, até este ponto considerada fixa de 1m. De acordo com Graf (1992) quanto maior for esta distância, menos eficiente será esta técnica de compactação.

Duas novas distâncias foram consideradas, de 2m e 3m, conforme mostra a Figura 5.19. Os resultados de novas análises numéricas feitas com o programa Plaxis 2D v.2012 são analisados para verificar a eficiência do tratamento em termos da variação do índice de vazios, da densidade relativa, dos módulos de cisalhamento e de deformação volumétrica e da distribuição das tensões radiais, seguindo o mesmo procedimento explicado na seção 5.3.3. As análises numéricas foram executadas com o modelo constitutivo HSM para a camada de areia e a expansão dos bulbos foi simulada considerando-se a expansão volumétrica da argamassa (caso A).

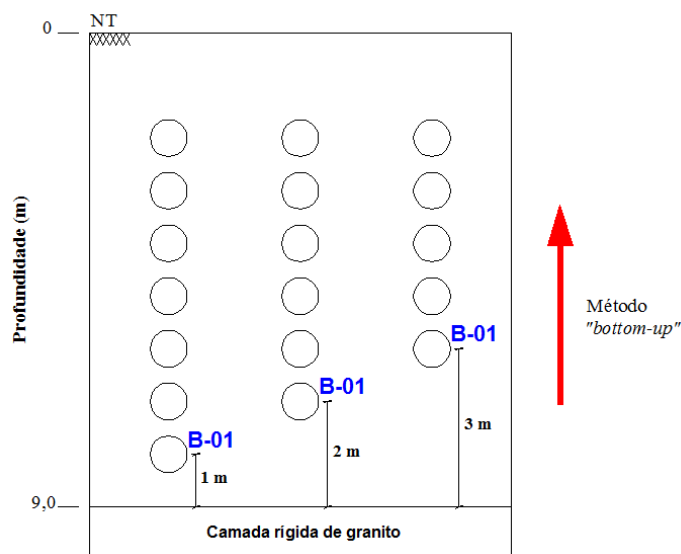


Figura 5.19 - Esquema da variação da distância vertical entre o bulbo B-01 e o estrato de granito decomposto.

a) Índice de vazios / densidade relativa

As Figura 5.20 e Figura 5.21 mostram a variação do índice de vazios e da densidade relativa, respectivamente, em função da distância radial ao bulbo B-01 para as distâncias de separação de 1m, 2m e 3m. A eficiência da técnica de bulbos de compactação diminui com o aumento desta distância, como esperado. O índice de vazios junto ao bulbo varia do valor 0,80 (distância de 1m) ao valor 0,86 (distâncias de 2m e 3m), indicando que a presença do estrato inferior não tem mais influência sobre o tratamento do solo para estas duas últimas distâncias. Observações semelhantes podem ser feitas em relação aos gráficos da Figura 5.21, onde a densidade relativa varia de 61% (distância de 1m) para 47% (distâncias de 2 e 3m).

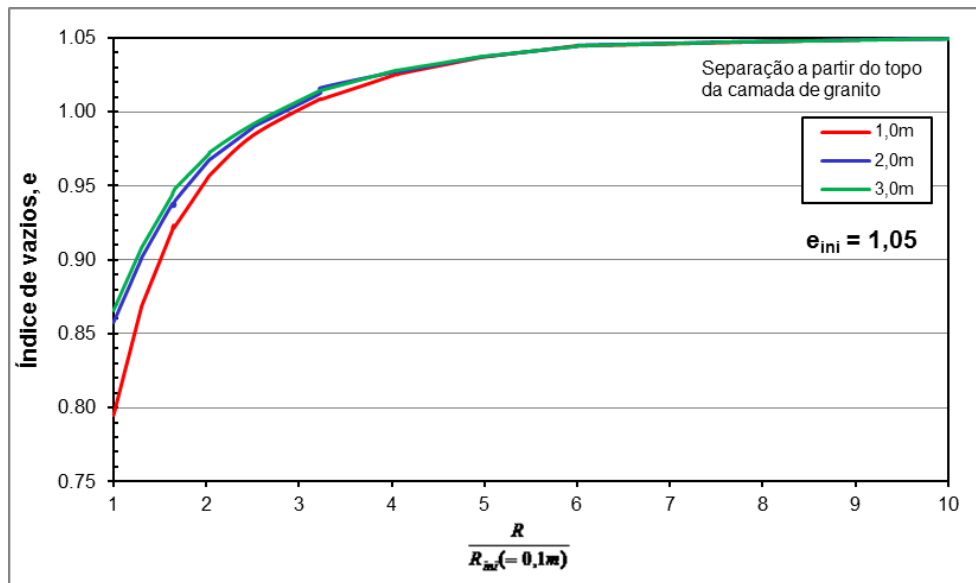


Figura 5.20 - Variação do índice de vazios com a distância radial ao bulbo B-01 para diferentes distâncias do estrato inferior de granito decomposto.

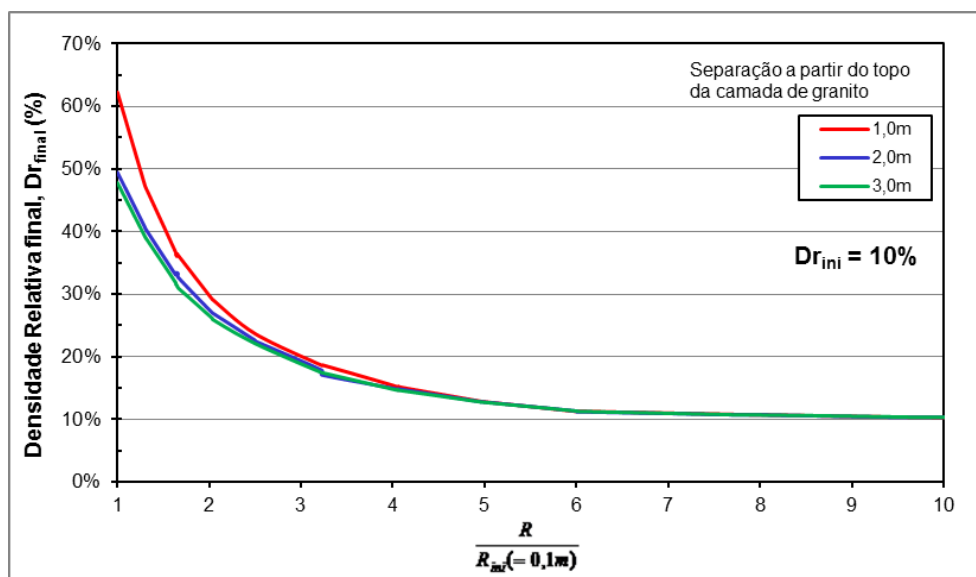


Figura 5.21 - Variação da densidade relativa com a distância radial ao bulbo B-01 para diferentes distâncias do estrato inferior de granito decomposto.

b) Módulo de cisalhamento (G) e módulo de deformação volumétrica (K)

A Figura 5.22 mostra as repostas ao tratamento do solo em termos dos módulos de cisalhamento e de deformação volumétrica, normalizados em relação aos seus valores iniciais que, no modelo constitutivo HSM, variam com a profundidade do ponto em virtude destes parâmetros dependerem do estado de

tensão. Confirma-se a informação anterior de que a presença do estrato inferior não tem efeito sobre o tratamento na região de solo situada 2,5m acima.

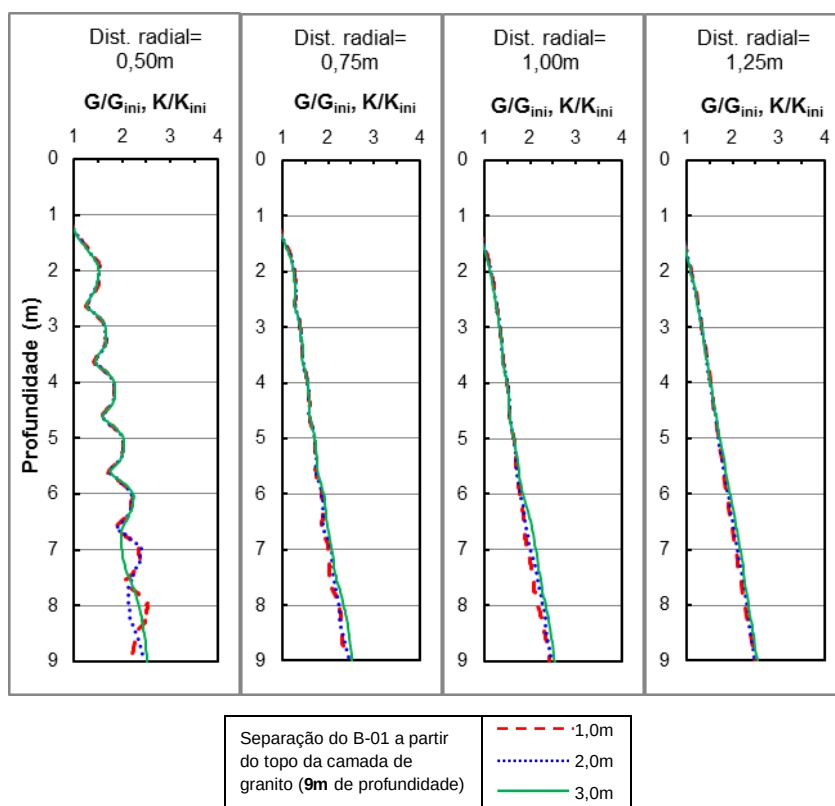


Figura 5.22 - Variação com a profundidade dos efeitos do tratamento do solo nos valores dos módulos de cisalhamento e de deformação volumétrica para diferentes distâncias radiais e de separação entre o bulbo B-01 e o estrato inferior.

c) Razão de tensões radiais / pressão de injeção

A Figura 5.23 mostra a variação com a profundidade da razão das tensões radiais (σ_r / σ_{rini}), em função da localização do bulbo mais profundo (B-01). Os gráficos novamente confirmam as observações já feitas na Figura 5.22 sobre os efeitos da presença do substrato rígido no tratamento da camada de areia fofa pela técnica de bulbos de compactação.

Adicionalmente, a Tabela 5.8 lista os valores da tensão radial na interface bulbo / solo decorrentes do processo de injeção, verificando-se que a presença do estrato de granito teve pouco influência na pressão de injeção do bulbo B-01 quando esta foi considerada 3m abaixo deste bulbo.

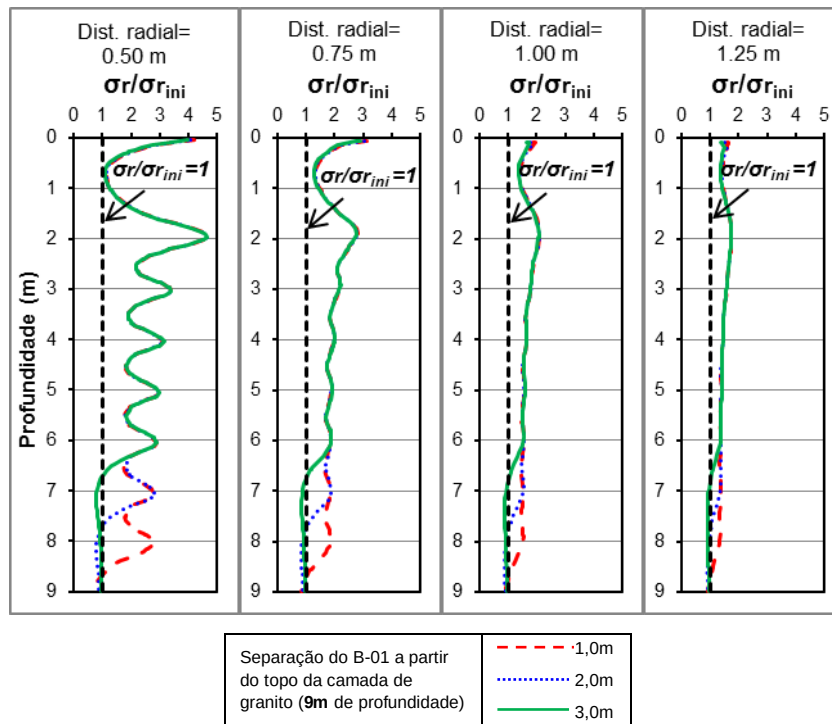


Figura 5.23 - Variação com a profundidade da razão de tensões radiais para diferentes distâncias radiais e de separação entre o bulbo B-01 e o estrato inferior.

Tabela 5.8 – Tensões radiais na interface bulbo /solo para três distâncias de separação do bulbo mais profundo (B-01) em relação ao estrato de granito decomposto.

Distância do bulbo B-01 ao topo da camada rígida (granito)					
1m		2m		3m	
Bulbo	Tensão radial na cavidade (kPa)	Bulbo	Tensão radial na cavidade (kPa)	Bulbo	Tensão radial na cavidade (kPa)
	σ_n		σ_n		σ_n
B-07	633,24	B-06	667,16	B-05	664,43
B-06	664,10	B-05	683,87	B-04	680,70
B-05	727,66	B-04	732,54	B-03	725,29
B-04	851,02	B-03	837,16	B-02	887,97
B-03	949,76	B-02	981,54	B-01	934,33
B-02	1061,57	B-01	1078,56	-	-
B-01	1241,05	-	-	-	-

5.4.

Influência do nível do lençol freático

Os resultados das análises numérica e analítica da técnica de bulbos de compactação examinadas até este ponto admitiram que a camada de areia fofa no estado seco. Para verificar a influência da água na resposta do solo ao tratamento, a camada é agora considerada saturada, com o nível d'água na superfície do terreno e as análises precedentes repetidas para esta nova situação.

5.4.1.

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

A Figura 5.24 mostra os resultados das pressões limites de injeção para as profundidades de 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8m, comparando-as com as situações da areia fofa no estado seco e saturado, para valores do raio inicial da cavidade $R_{ini} = 0,10$ m e um fator de ruptura $\alpha = 0,9$ (Equação 4.35). Conforme pode ser observado da Figura 5.24 e da Tabela 5.9 os valores da pressão limite de injeção decaem na condição saturada, mas com aumento dos respectivos raios plásticos das zonas circulares onde, no método de El-Kelesh *et al.* (2001), o solo é admitido tratado.

Como mencionado anteriormente, a profundidade crítica pode ser identificada graficamente (Figura 5.25) como o ponto de interseção das duas curvas formadas pelos valores de pressões P_{uph} e P_{ex-df} . A pressão limite de injeção P_{lim} corresponde ao menor destes valores. Na Figura 5.25 a profundidade crítica foi aproximadamente de 2,75m para o depósito de areia fofa seca (ver também Figura 5.6) e 2m para o depósito de areia saturada.

O melhoramento do solo pode ser expresso em termos da variação do índice de vazios na zona plástica ou, alternativamente, da densidade relativa, com os resultados sumarizados na Tabela 5.10. Percebe-se então que para o caso de areia saturada o índice de vazios inicial (1,05) diminuiu para valores entre 1,02 e 0,98 e que a densidade relativa inicial (10,20%) aumentou para valores no intervalo entre 16,62 a 24,53%. Tais resultados indicam que a eficiência do tratamento foi menor do que no caso de areia seca (como indicado na Tabela 5.11), porém com um raio plástico maior (valor médio de 2,14m), correspondente a um espaçamento entre colunas de bulbos de 4,28m..

Dos resultados da tabela conclui-se que a areia se apresenta ainda pouco densa e que devido ao fato de estar saturada encontra-se em estado suscetível de sofrer efeitos de liquefação dinâmica, por exemplo. Uma medida aconselhável, em regiões de atividade sísmica, seria aumentar o valor da densidade relativa da areia para até 70%, conforme geralmente recomendado nestes casos.

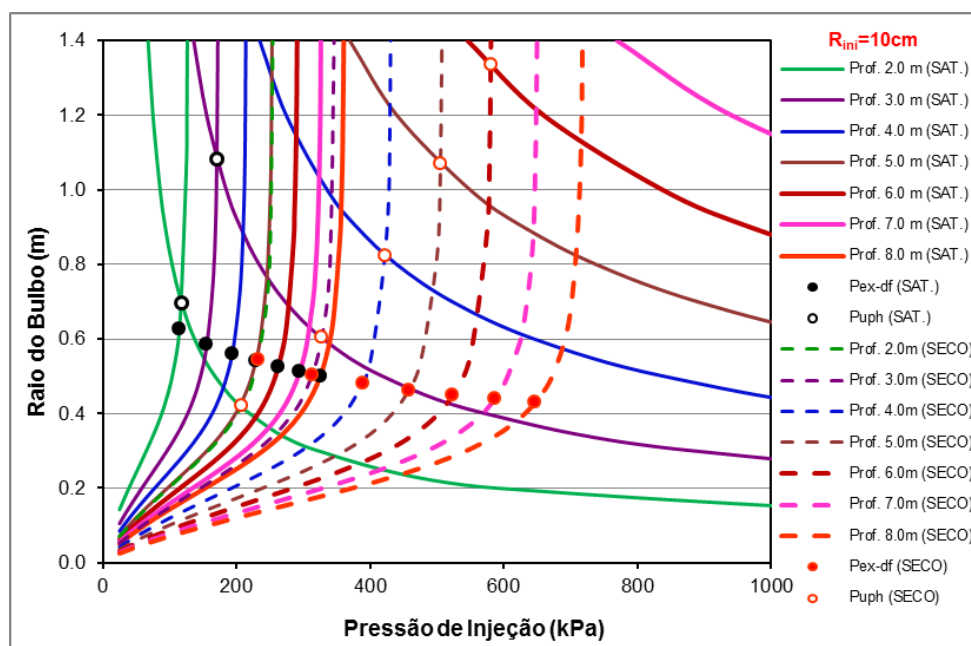


Figura 5.24 - Pressões limites de injeção calculadas pelo método analítico de El-Kelesh *et al.* (2001) para as condições de areia seca e saturada.

Tabela 5.9 – Pressões limites de injeção para diferentes profundidades de bulbo nas condições de areia seca e saturada.

Prof. de 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

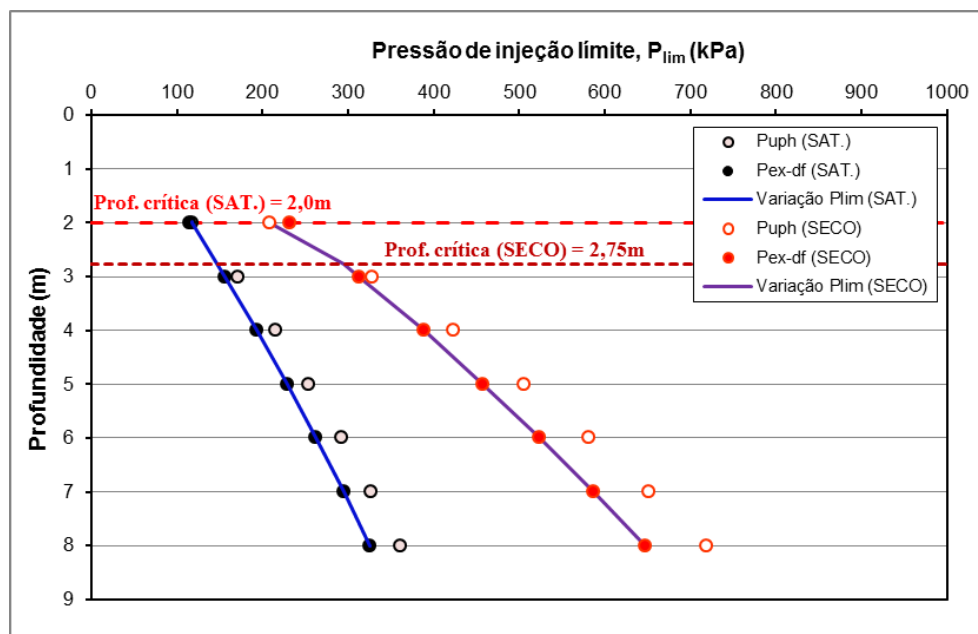


Figura 5.25 – Variação das pressões limites de injeção para condições de areia seca e saturada, com identificação das respectivas profundidades críticas.

Tabela 5.10 – Melhoramento do depósito de areia saturada em termos de índice de vazios e da densidade relativa.

Prof. de injeção (m)	Raio plástico, R_p (m)	Diminuição do vol. zona plástica (m^3)	Índice vazios inicial, e_{ini}	Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	ΔDr (%)	S (m)
2	2,80	0,8737	1,05	1,02	16,62	6,42	5,60
3	2,43	0,6866	1,05	1,01	18,43	8,23	4,86
4	2,21	0,5865	1,05	1,00	19,86	8,66	4,42
5	2,04	0,5090	1,05	1,00	21,23	11,03	4,08
6	1,92	0,4572	1,05	0,99	22,38	12,18	3,84
7	1,82	0,4135	1,05	0,98	23,49	13,29	3,64
8	1,73	0,3780	1,05	0,98	24,53	14,33	3,46

Tabela 5.11 - Comparação da melhoria do solo em termos de índice de vazios e densidade relativa para os casos de areia seca e saturada

Prof. de injeção (m)	Índice vazios inicial, e_{ini}	Areia seca			Areia saturada		
		Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	S (m)	Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	S (m)
2	1,05	0,96	28,98	2,93	1,02	16,62	5,60
3	1,05	0,98	24,21	3,52	1,01	18,43	4,86
4	1,05	0,97	26,48	3,19	1,00	19,86	4,42
5	1,05	0,96	28,62	2,93	1,00	21,23	4,08
6	1,05	0,95	30,43	2,74	0,99	22,38	3,84
7	1,05	0,94	31,95	2,59	0,98	23,49	3,64
8	1,05	0,94	33,34	2,47	0,98	24,53	3,46

No método El-Kelesh *et al.* (2001) a densidade relativa final está associada com a zona de influência do tratamento, isto é do raio plástico (R_p). Quanto mais próximos estiverem os bulbos entre si, menor o espaçamento horizontal S entre eles e, naturalmente, espera-se que a densidade relativa final do solo aumente.

A partir da especificação de um valor pretendido de densidade relativa final, um procedimento inverso pode ser feito para determinação do raio plástico (R_p) correspondente. Como exemplo de cálculo, duas tentativas foram feitas para determinação do espaçamento horizontal S entre bulbos, admitindo densidade relativa final de 55% (índice de vazios final de 0,83) e 80% (índice de vazios final de 0,71). Os resultados de ambas as análises estão apresentados na Tabela 5.12 obtendo-se $S = 2,02\text{m}$ para $Dr = 80\%$.

Tabela 5.12 – Diminuição da zona de influência do tratamento por bulbos de compactação para atingir maior densidade relativa final.

Prof. de injeção (m)	Bulbo	1 ^{ra} tentativa				2 ^{da} tentativa			
		Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	R_p (m)	S (m)	Índice vazios final, e_{final}	Dr_{final} (%)	R_p (m)	S (m)
2	B-07	0,83	55	1,45	2,90	0,71	80	1,23	2,46
3	B-06	0,83	55	1,37	2,74	0,71	80	1,17	2,34
4	B-05	0,83	55	1,32	2,64	0,71	80	1,12	2,24
5	B-04	0,83	55	1,28	2,56	0,71	80	1,09	2,18
6	B-03	0,83	55	1,24	2,48	0,71	80	1,06	2,12
7	B-02	0,83	55	1,21	2,42	0,71	80	1,03	2,06
8	B-01	0,83	55	1,19	2,38	0,71	80	1,01	2,02

5.4.2. Método numérico

A resposta do depósito de areia saturada ao tratamento por bulbos de compactação foi também avaliada numericamente por meio do programa computacional Plaxis 2D, formulação axissimétrica, seguindo a mesma abordagem empregada para o caso do depósito de areia seca. O comportamento mecânico da areia foi simulado com o modelo constitutivo HSM e na expansão dos bulbos o material de argamassa foi representado na discretização por elementos finitos (caso A), prescrevendo-se uma deformação volumétrica da cavidade de 750%.

A Figura 5.26 mostra para os bulbos B-01, B-03 e B-07 o melhoramento do solo em termos do índice de vazios (e) e da densidade relativa (Dr), cujos valores iniciais são 1,05 e 10,2% respectivamente. Novamente se verifica que o melhoramento no solo saturado foi menor do que para o solo seco, e que esta diferença se acentuou com a profundidade do bulbo (no caso do bulbo B-01 seria interessante também verificar a influência do estrato de granito decomposto na resposta ao tratamento para melhor interpretar a maior diferença observada a pequenas distâncias radiais).

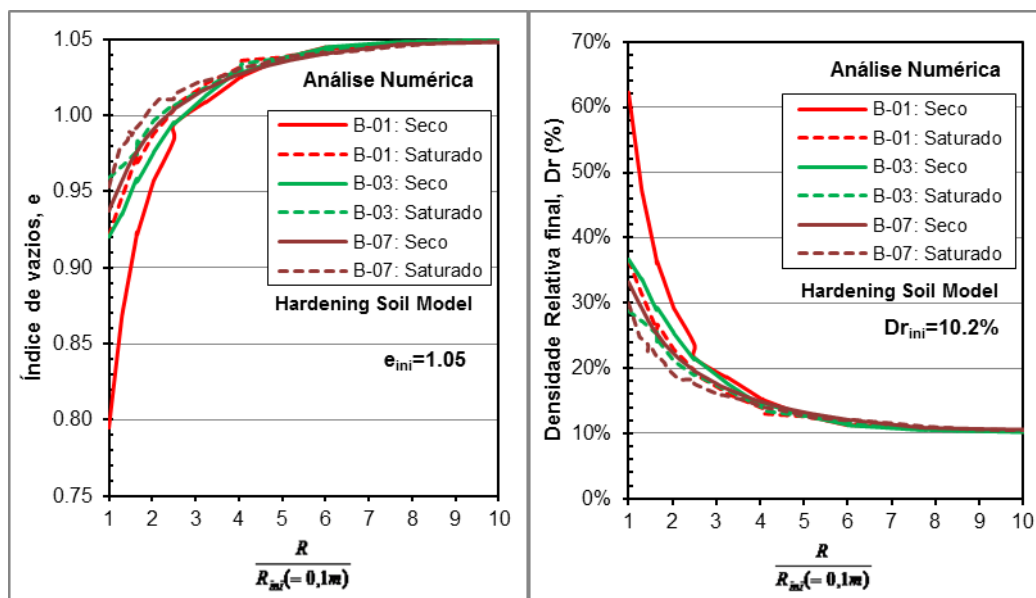


Figura 5.26 – Comparação do melhoramento obtido nos casos de solo seco e solo saturado em termos do índice de vazios (esquerda) e densidade relativa (direita).

As variações com a profundidade dos módulos de cisalhamento normalizado (G/G_{ini}) e de deformação volumétrica normalizado $(K/K_{ini})^2$ estão mostradas na Figura 5.27, para as distâncias radiais $r = 0.5, 0.75, 1$ e $1.25m$, comparando-as com variações correspondentes obtidas anteriormente para o caso de depósito de areia seca.

Na Figura 5.27 observa-se novamente que o solo seco responde melhor ao tratamento por bulbos de compactação do que o solo saturado para mesmas expansões dos bulbos (variação volumétrica de 750%).

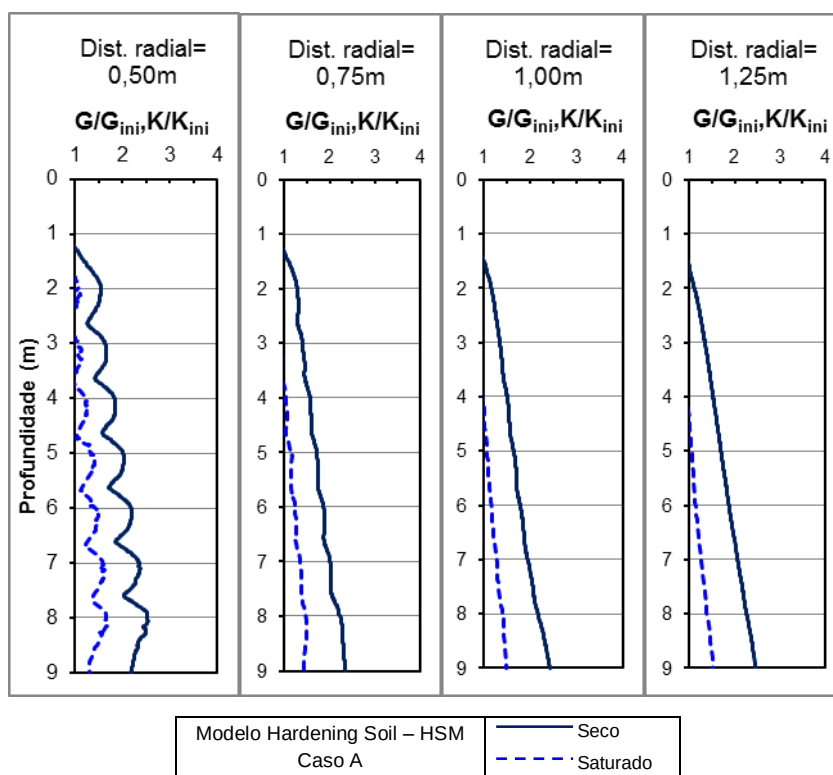


Figura 5.27 – Variação com a profundidade dos módulos de cisalhamento normalizado e de deformação volumétrica normalizado para os depósitos de areia seca e saturada considerando o modelo constitutivo HSM.

² Mesma variação para ambos os módulos normalizados em virtude do coeficiente de Poisson constante.

5.5. Comparação das soluções analítica e numérica

5.5.1. Camada de areia seca

Pressão limite de injeção

A Tabela 5.13 e Figura 5.28 mostram a variação da pressão limite de injeção com as profundidades dos bulbos que, conforme pode ser observado, diferem significativamente nas soluções analítica e numérica (casos A, B e C) pois no desenvolvimento da solução analítica foram assumidas hipóteses e simplificações, enquanto que as pressões obtidas a partir da solução numérica estão dentro da faixa de valores reportados na literatura. Esta diferença é tanto maior quanto mais profundo o bulbo, provavelmente porque a solução numérica é afetada pela presença do estrato de granito decomposto subjacente à camada de areia enquanto que a solução analítica não. Os resultados numéricos, computados com o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb para a camada de areia, encontram-se dentro do intervalo de valores reportados na literatura, listados na Tabela 3.1.

Raio final do bulbo

A Tabela 5.14 e Figura 5.29 mostram que nos casos A e C da solução numérica o raio final da cavidade é coincidente (0,35m), como esperado, enquanto que este varia entre 0,34m a 0,43m no caso B, situação na qual a pressão de injeção é aplicada diretamente na parede da cavidade. Estes últimos resultados parecem indicar que esta estratégia de simulação é de mais difícil implementação, além de demorada, pois teoricamente o valor do raio final da cavidade deveria resultar em 0,35m, pois as pressões de injeção são calculadas com base nas tensões radiais na interface bulbo / solo computadas no caso A. Como possíveis fontes de erro deste processo estão o cálculo das tensões radiais a partir do estado de tensão referenciado aos eixos Cartesianos $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$, o que implica na determinação da inclinação do plano tangente à cavidade no ponto nodal considerado, como também do fato que, após realizados estes cálculos, a pressão de injeção é tomada como um valor médio das tensões radiais computadas em todos os nós pertencentes à superfície circular da cavidade.

Com relação ao método analítico, o raio final do bulbo B-07 a 2m de profundidade da superfície da camada de areia também difere da tendência geral de comportamento observada para os bulbos mais profundos. Neste caso, porém, a explicação vem do fato que nesta profundidade o valor da pressão limite de injeção é controlada pela pressão de levantamento (p_{uph}), enquanto que nos demais pela pressão de deformação plástica excessiva (p_{ex-def}), resultando, portanto, nesta aparente descontinuidade de tendência de comportamento.

Tabela 5.13 – Comparação da pressão limite de injeção (P_{lim}) das soluções analítica e numérica.

Prof. de injeção (m)	Pressão limite de injeção (kPa)			
	Método analítico	Análise numérica Caso A	Análise numérica Caso B	Análise numérica 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

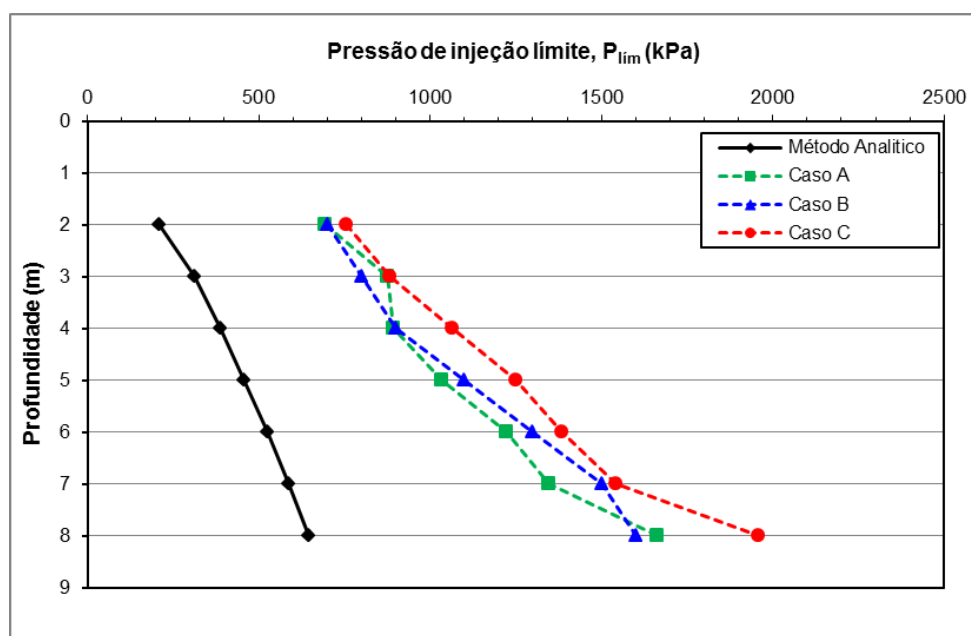


Figura 5.28 – Comparação da pressão limite de injeção determinada nos métodos analítico (El-Kelesh *et al*, 2011) e numérico (elementos finitos na condição de axissimetria).

Tabela 5.14 – Comparação do raio final dos bulbos após aplicação da injeção nos métodos analítico e numérico.

Prof. de injeção (m)	Raio final após aplicação da pressão de injeção (m)			
	Método analítico	Método numérico Caso A	Método numérico Caso B	Método numérico 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

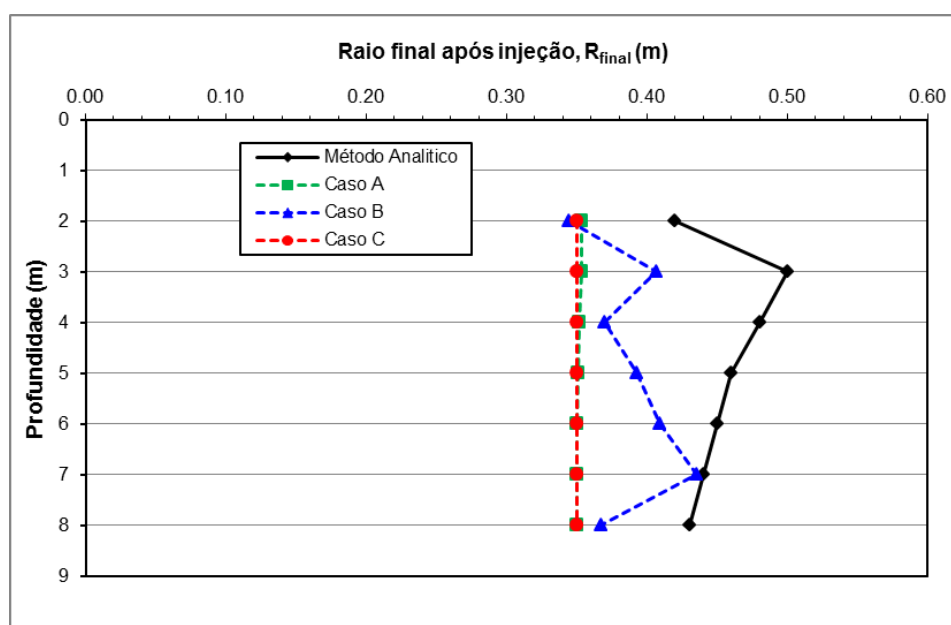


Figura 5.29 - Comparação do raio final dos bulbos após aplicação da injeção nos métodos analítico e numérico.

5.5.2. Camada de areia saturada

Pressão limite de injeção

A Figura 5.30 mostra a variação com a profundidade da pressão limite de injeção, obtidas pelos métodos analítico e numérico (caso A, com prescrição da deformação volumétrica do bulbo), considerando o modelo constitutivo MCM para a camada de areia. Os valores relativos à condição de areia seca foram novamente incluídos para facilitar uma análise comparativa. Conforme pode ser

notado, as pressões limites de injeção para a areia saturada são inferiores àsquelas determinadas para a condição de areia seca, devido à menor resistência da areia saturada e a condição limite ser atingida com menor pressão de injeção. Estas pressões variam entre 400 kPa a 918 kPa na solução numérica (de 695 kPa a 1661 kPa para areia seca) e entre 115 kPa a 326 kPa na solução analítica (de 208 kPa a 647 kPa para areia seca).

Raio final do bulbo

A Figura 5.31 mostra a variação com a profundidade do raio final dos bulbos após a aplicação da injeção. Enquanto que no método numérico este permanece fixo em 0,35m, devido à aplicação de deformação volumétrica de 750% em todos os pontos de injeção, equivalente a um deslocamento radial de 0,25m das paredes da cavidade, no método analítico os valores computados são significativamente maiores principalmente na condição de areia saturada.

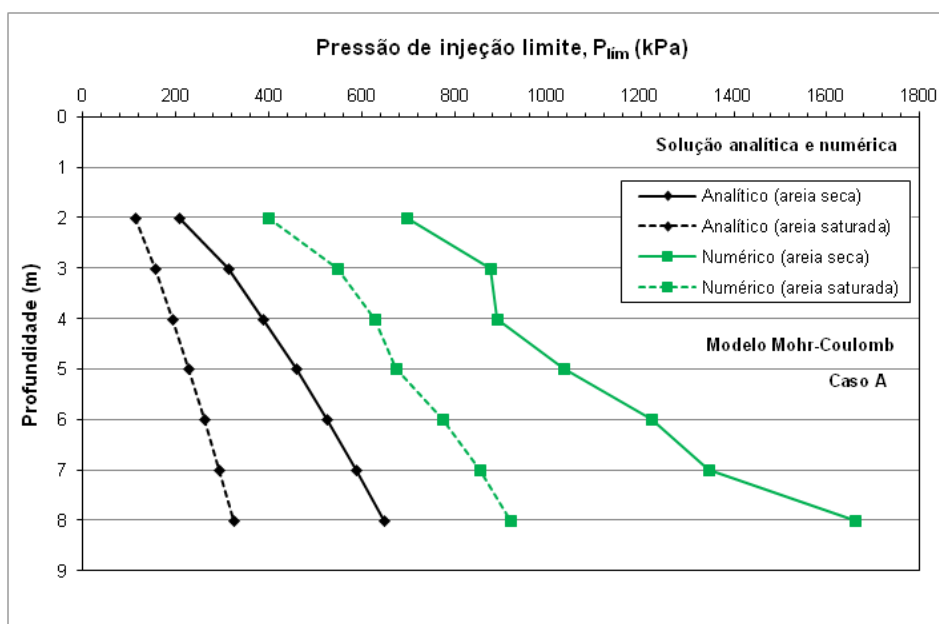


Figura 5.30 - Comparação da pressão limite de injeção nos métodos analítico e numérico para os casos de depósito de areia seca e saturada.

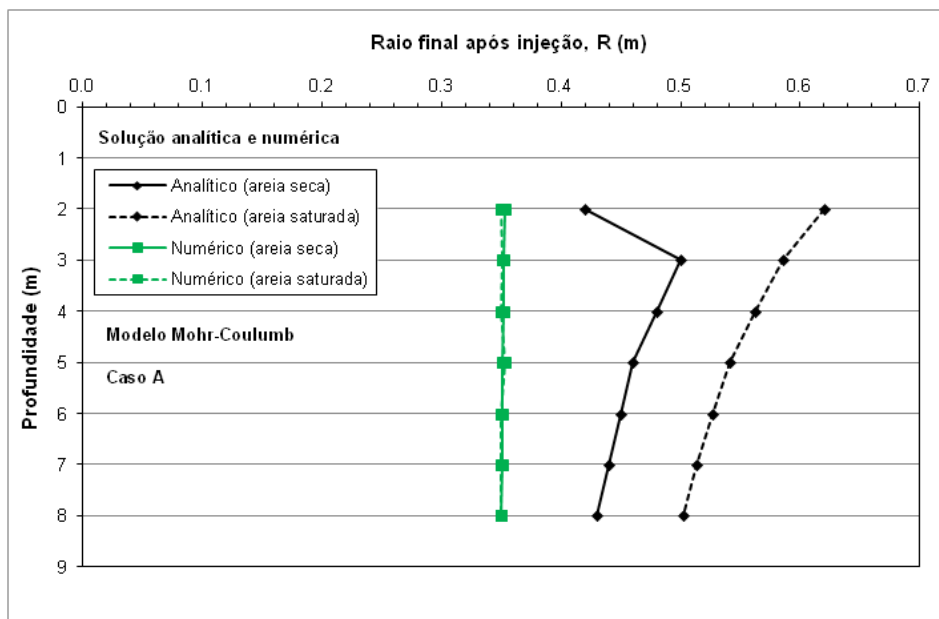


Figura 5.31 - Comparação do raio final do bulbo após injeção nos métodos analítico e numérico para depósitos de areia seca e saturada.

5.6. Análise de um grupo de colunas de injeção

Com o objetivo de verificar o melhoramento do solo sob influência de um grupo de colunas de injeção (Figura 5.32) são feitas análises tridimensionais pelo método dos elementos finitos com o programa computacional Plaxis 3D. Devido à simetria do problema, apenas uma quarta parte foi modelada, utilizando uma malha formada por 70708 elementos (elementos tetraédricos de 10 nós) (Figura 5.33). A camada de areia foi admitida saturada, com o nível do lençol freático na superfície do terreno, e o comportamento mecânico da areia foi representado pelo modelo constitutivo HSM.

A expansão dos bulbos foi executada prescrevendo-se uma deformação volumétrica de 750% do material de injeção (caso A), sendo cada coluna formada por 7 bulbos (Figura 5.7) de raio inicial 0,10m, separados verticalmente da distância de 1m e da distância horizontal de 2m, estabelecida em função dos resultados numéricos de análises 2D (Figura 5.27, por exemplo).

Dois planos de injeção foram examinados, seguindo as recomendações de El-Kelesh & Matsui (2002), com as seguintes execuções sequenciais de colunas: (a) L3-C9; L2-C4; L2-C6; L3-C7; (b) L2-C4; L3-C9; L2-C6; L3-C7.

O melhoramento do depósito de solo foi avaliado em termos da variação do índice de vazios com a profundidade, da razão de sobreadensamento isotrópico e dos módulos de cisalhamento e de deformação volumétrica, em perfis situados a diferentes distâncias horizontais do eixo central que passa pela coluna C9 (Figura 5.34). O depósito de solo foi considerado como areia grossa com coeficiente de permeabilidade $k = 5 \times 10^{-3} \text{ m/dia}$.

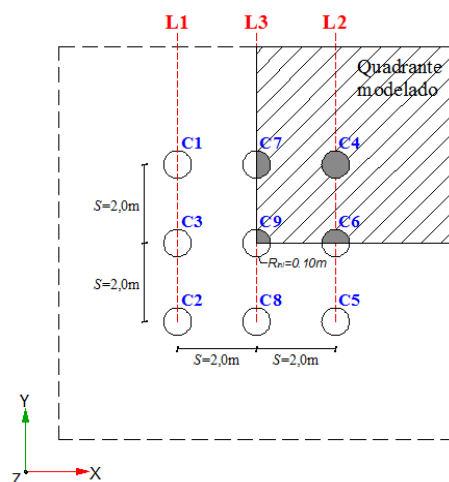


Figura 5.32 – Localização em planta de 9 colunas de injeção com indicação da região de solo modelada por elementos finitos compreendendo 4 colunas.

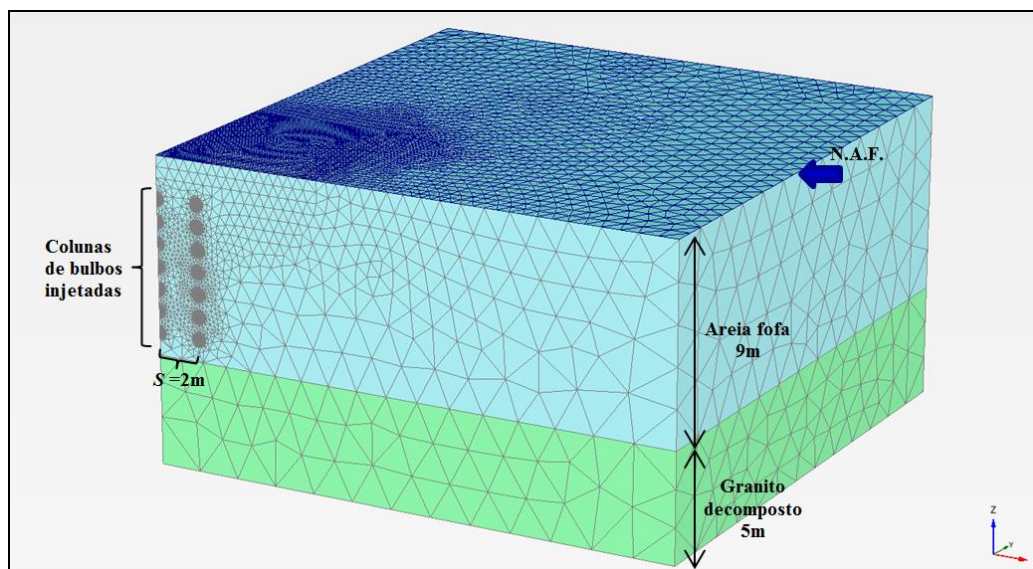


Figura 5.33 – Malha de elementos finitos no programa computacional Plaxis 3D.

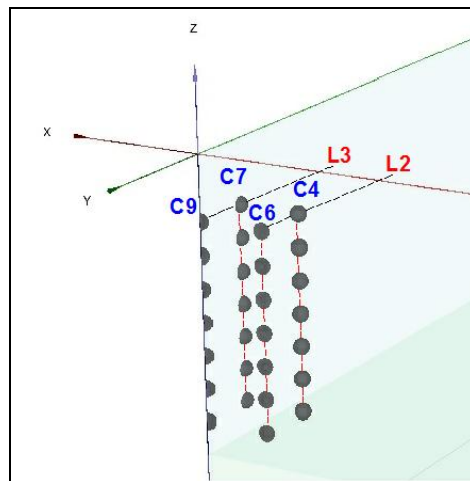
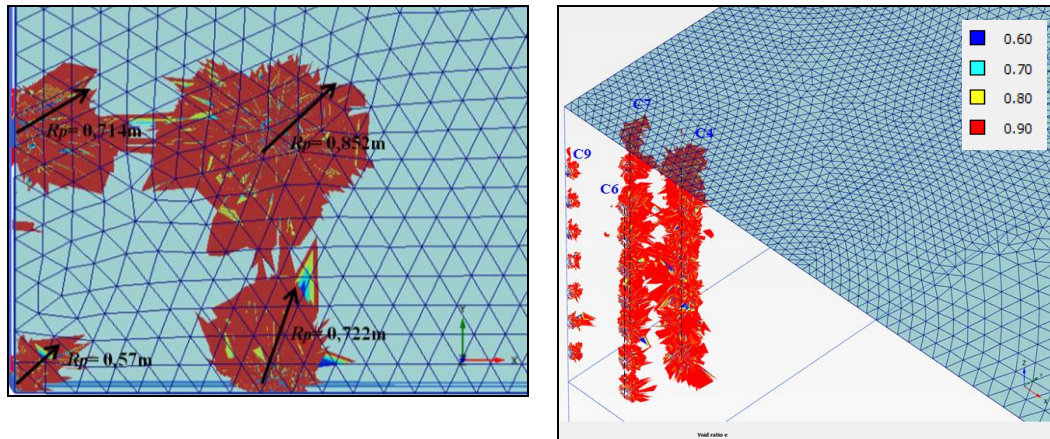


Figura 5.34 – Colunas de injeção C4, C6, C7, C9 e linhas de injeção L2, L3.

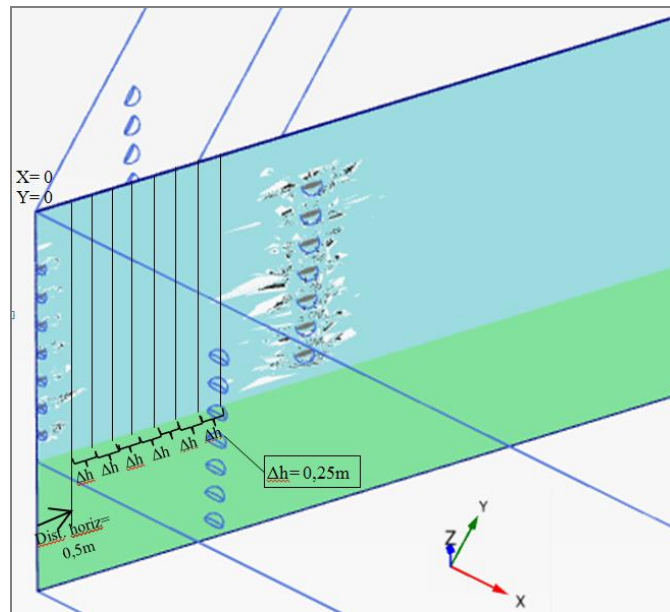
a) Índice de vazios (e)

Não foi possível verificar diferenças na variação do índice de vazios considerando ambas as sequências de execução das colunas de bulbos, possivelmente porque o número de linhas de injeção considerado (apenas 2, dada a simetria do problema) é baixo em relação ao número geralmente utilizado em campo (El-Kelesh e Matsui, 2012, Figura 3.6). A região de solo melhorada pode ser observada na Figura 5.35, atingindo distâncias radiais a partir dos centros das colunas de 0,57m (C9) a 0,85m (C4). Da figura também se percebe que a coluna C4 apresentou o melhor melhoramento com o raio final da cavidade atingindo o valor 0,33m, o que pode ser explicado pelo menor confinamento da mesma em relação às colunas C9, C6 e C7.

Valores finais dos índices de vazios (e respectivas densidades relativas) foram calculados a diferentes distâncias medidas a partir do eixo na coluna C9 (Tabela 5.15) e seus valores comparados com aqueles determinados na análise axissimétrica 2D.



(a)



(b)

Figura 5.35 – Melhoramento da areia saturada em termos do índice de vazios na modelagem 3D: a) PLAXIS 3D: (a) vista em planta na superfície ($z = 0$) e vista vertical 3D; (b) corte vertical com 45° de inclinação em relação aos eixos X e Y.

Tabela 5.15 – Valores médios de índice de vazios finais e densidade relativa final para os modelos 3D e 2D (axissimétrico) no caso de areia saturada.

Coordenadas das colunas de injeção (m)		Distância horizontal ao eixo Z (m)	Modelo Tridimensional		Modelo Axissimétrico	
X	Y		e_{final}	Dr_{final}	e_{final}	Dr_{final}
0,354	0,354	0,50	1,00	20,61%	1,04	13,06%
0,530	0,530	0,75	1,03	14,29%	1,05	11,22%
0,707	0,707	1,00	1,03	13,88%	1,05	10,61%
0,884	0,884	1,25	1,03	14,49%	1,05	10,41%
1,061	1,067	1,50	1,02	16,53%	1,05	10,41%
1,237	1,237	1,75	0,99	22,04%	1,05	10,20%
1,414	1,414	2,00	0,83	54,29%	1,05	10,20%
1,591	1,591	2,25	0,77	68,16%	1,05	10,20%

b) Razão entre módulos de cisalhamento e módulos de deformação volumétrica

A Figura 5.36 mostra a distribuição dos módulos de elasticidade no depósito de areia saturada, após o processo de injeção para as duas sequências de execução de colunas. Uma comparação numérica considerando a variação dos módulos de cisalhamento normalizados e de deformação volumétrica normalizados obtidos nas análises 3D e 2D (axissimétrica) é mostrada na Tabela 5.16. Tais valores foram determinados a partir dos módulos de elasticidade considerando um coeficiente de Poisson constante de 0,3 para a camada de areia.

Esta comparação está sendo feita ao longo de um corte vertical do modelo 3D (45° respeito dos eixos X e Y), a distâncias horizontais de 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0 e 2,25m (como indicado na Tabela 5.16) medidas a partir do eixo da coluna C9 para fins de comparação com o modelo axissimétrico. De acordo com os resultados mostrados, o modelo 3D mostra a influência no melhoramento do solo pelas outras colunas injetadas previamente (furos primários). A Tabela 5.16 mostra que o módulo de elasticidade diminui conforme vai-se afastando horizontalmente do eixo Z (coluna C9) para logo ir em aumento conforme a região avaliada fique dentro da influência da coluna C4. Não entanto, isto não é possível de verificar no modelo axissimétrico onde uma coluna com sete bulbos é apenas modelada não havendo alguma influência de outra coluna de bulbos de argamassa.

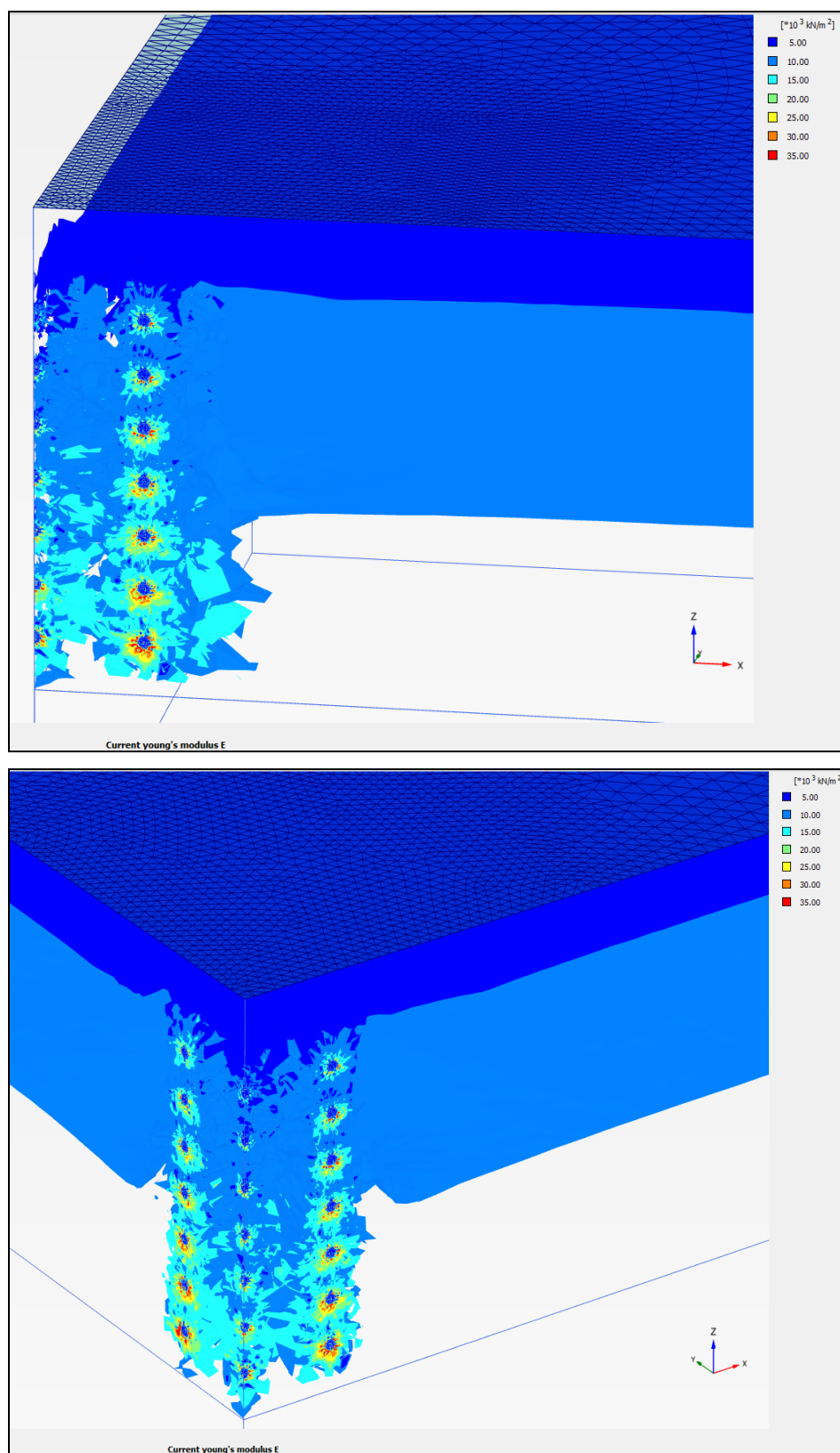


Figura 5.36 – Distribuição dos valores do módulo de elasticidade (modelo HSM) no depósito de areia saturada após processo de injeção para ambas as sequências de execução dos bulbos.

Tabela 5.16 – Valores médios dos módulos de elasticidade (E) finais e dos módulos de cisalhamento (G) / deformação volumétrica (K) normalizados obtidos nos modelos 3D e 2D (axissimétrico).

Coordenadas das colunas de injeção (m)		Distância horizontal ao eixo Z (m)	Modelo Tridimensional		Modelo Axissimétrico	
X	Y		E _{final} (kPa)	G/G _{inib} K/K _{ini}	E _{final} (kPa)	G/G _{inib} K/K _{ini}
0,354	0,354	0,50	16990	2,12	13230	1,65
0,530	0,530	0,75	14780	1,85	11940	1,49
0,707	0,707	1,00	14840	1,86	11820	1,48
0,884	0,884	1,25	14020	1,75	12200	1,53
1,061	1,067	1,50	13800	1,73	12410	1,55
1,237	1,237	1,75	15080	1,89	12580	1,57
1,414	1,414	2,00	23163	2,90	12700	1,59
1,591	1,591	2,25	28990	3,62	12760	1,60