



Christian Claude Elescano Muñoz

**Avaliação numérica da técnica de bulbos
de compactação em um depósito de areia fofa**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Celso Romanel
Co-Orientador: Dr^a. Jackeline Rosemery Castañeda Huertas

Rio de Janeiro
Abril de 2014



Christian Claude Elescano Muñoz

**Avaliação numérica da técnica de bulbos
de compactação em um depósito de areia fofa**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr^a. Jackeline Rosemery Castañeda Huertas

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida

COPPE-UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial

Centro Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de abril de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Christian Claude Elescano Muñoz

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidad Católica del Perú – PUCP, em 2008. Principais áreas de interesse: Mecânica dos Solos, Mitigação e Melhoramento de Solos e Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Muñoz, Christian Claude Elescano

Avaliação numérica da técnica de bulbos de compactação em um depósito de areia fofa / Christian Claude Elescano Muñoz; orientador: Celso Romanel; co-orientador: Jackeline Rosemery Castañeda Huertas. – 2014.

127 f. il; 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Bulbos de compactação. 3. Melhoria do solo. 4. Expansão de cavidade esférica. 5. Análise numérica. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

In memoriam: a meus avós Pedro e Marcelina, sempre presentes em todos os dias da minha vida, sei que desde o seu lugar olham por mim, os amo muito.

Agradecimentos

A Deus pelo dom da vida, e por estar comigo sempre me amparando nos momentos difíceis.

A meus pais Marcelo e Aracelli que me deram a vida e por estarem comigo em todo momento. Obrigado por tudo, pai e mãe, por todo o sacrifício para dar-me uma carreira, um futuro e por acreditarem em mim e, principalmente, por brindar-me com seu amor. Eu os amo muito.

Às minhas irmãs Akemi e Naysha pelo carinho, vocês eu nunca vou me sentir sozinho.

Ao professor Celso Romanel pela dedicada orientação no desenvolvimento deste trabalho e por todos os seus ensinamentos. Obrigado, professor.

A Jackeline Castañeda pela amizade desinteressada e pelo apoio incondicional na elaboração desta dissertação. Sem o seu acompanhamento, inclusive nas muitas noites passadas na Universidade, este trabalho não tivesse alcançado o resultado aqui apresentado. Obrigado, Jackecita.

Aos professores Marcio de Souza Almeida e Pedricto Rocha Filho pelas sugestões para o aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos conhecimentos transmitidos em cada uma das disciplinas que eu cursei.

Aos meus amigos que eu conheci durante esta etapa de mestrado, em especial a Vanessa Rodrigues, Fernando Barbosa, Miguel Parodi e David Ninanya, pela amizade e por fazer muito agradável a minha estadia no Brasil.

A dona Carmen Abreu, a minha “mãe brasileira”, e a Allan Abreu pela ajuda durante a minha permanência no Brasil. Vocês sempre serão a minha segunda família.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial à Rita, pela atenção, dedicação e paciência com os alunos de pós-graduação.

À “cidade maravilhosa” do Rio de Janeiro, pelos belos momentos aqui vividos que nunca vou esquecer.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Muñoz, Christian Claude Elescano; Romanel, Celso (orientador); Huertas, Jackeline Rosemary Castañeda (Co-orientador). **Avaliação numérica da técnica de bulbos de compactação em um depósito de areia fofa**. Rio de Janeiro, 2014. 127 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Bulbos de compactação é uma técnica de melhoramento de solos cujo objetivo consiste na injeção controlada de argamassa para deslocar e densificar o solo sem o fraturar. A principal aplicação desta técnica foi para a correção de problemas de recalques em estruturas, portanto, não estava voltada para a melhoria solo. Este estudo apresenta alguns resultados da melhoria do solo mediante injeção de bulbos em um depósito de areia fofa seca e saturada comparando soluções numérica e analítica. A análise numérica consiste em sequências de expansões de cavidade esférica do bulbo de compactação utilizando um modelo axissimétrico no Plaxis 2D e um modelo tridimensional no Plaxis 3D, em ambos representando o comportamento mecânico do solo com os modelos constitutivos de Mohr-Coulomb ou HSM, enquanto a solução analítica considera hipóteses de ruptura por cisalhamento cônico no solo acima do ponto de injeção. A eficiência da técnica dos bulbos de compactação é avaliada principalmente em termos do aumento da razão entre tensões radiais iniciais e finais e do módulo de cisalhamento ao longo da profundidade, assim como do aumento da densidade relativa D_r . O alcance da técnica de bulbos de compactação estendeu-se a uma distância radial aproximada de 1,5m a partir do eixo de injeção. As pressões limite obtidas no modelo axissimétrico estão nos intervalos recomendados pela literatura e mostram uma diferença importante com as obtidas com a solução analítica. A melhoria do solo verificada no modelo tridimensional resultou maior do que no modelo axissimétrico devido à influência das colunas injetadas previamente.

Palavras-chave

Bulbos de compactação; melhoria do solo; expansão da cavidade esférica; análise numérica.

Abstract

Muñoz, Christian Claude Elescano; Romanel, Celso (advisor); Huertas, Jackeline Rosemery Castañeda (Co-advisor). **Numerical evaluation of the compaction grouting technique in a loose sand deposit**. Rio de Janeiro, 2014. 127 p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Compaction grouting is an improvement technique whose objective is to inject controlled grout masses to displace and compact the surrounding soil without fracturing it. The main application of this technique was for correction of settlement problems in structures, therefore, it was not specifically focused on soil improvement. This study presents some results on soil improvement by grout injection, in a deposit of dry or saturated loose sand, comparing numerical and analytical analyses. The numerical model consisted in a sequence of spherical cavity expansions of a grout bulb made by axisymmetric model with Plaxis 2D and tridimensional model with Plaxis 3D, both representing the soil mechanical behavior by either the Mohr-Coulomb or the HSM constitutive models, while the analytical consider the assumption of general shear failure of the soils overlying the injected masses in the form of a conical shear. The efficiency of thaction grouting is evaluated mainly in terms of the increase in the ratio between initial and final radial stresses and shear modulus G with depth, as well as the increase of relative density D_r . The effective radius of compaction grouting extended to a radial distance close to 1,5m from the injection axis. The limiting pressures computed with axisymmetric model are all within the range of values reported in the literature and showed a significant difference with those obtained by the analytical solution. Another observation is that soil improvement analyzed by tridimensional model resulted greater than that obtained by the axisymmetric model due to the influence of the columns injected previously.

Keywords

Compaction grouting; soil improvement; spherical cavity expansion; numerical analysis.

Sumário

Sumário	8
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	15
Lista de Símbolos	16
Lista de Abreviaturas	21
1 Introdução	22
2 Técnicas de melhoramento de solos	25
2.1. Técnicas de vibração	25
2.1.1. Vibrocompactação	26
2.1.2. Vibrosubstituição	28
2.2. Jet Grouting	29
2.3. Permeation Grouting	33
2.4. Compensation Grouting	34
3 Bulbos de compactação	37
3.1. Desenvolvimento da técnica	39
3.2. Aplicação da técnica em campo	41
3.2.1. Métodos de injeção	43
3.2.2. Padrão de malhas	44
3.2.3. Tecnologia da argamassa	46
3.2.4. Estimativa da quantidade de argamassa	47
3.2.5. Pressão de injeção	49
3.2.6. Critério de interrupção	51
3.2.7. Limitações dos bulbos de compactação	51
4 Metodologias de análise	53
4.1. Método analítico - expansão de cavidade esférica (Vesic,1972)	54
4.2. Método analítico - ruptura por cisalhamento Wong (1974)	58
4.3. Método analítico - modelo de bulbos de compactação El-Kelesh <i>et al.</i> (2001)	61
4.3.1. Cálculo da pressão de injeção limite	64

4.3.2. Espaçamento das colunas de bulbos	67
4.3.3. Verificação do melhoramento do solo	67
4.3.4. Aplicação do modelo El-Kelesh <i>et al.</i> (2001)	68
4.3.5. Verificação da melhora do terreno – Henriquez (2007)	69
4.4. Método dos elementos finitos	71
4.4.1. Hardening Soil Model (HSM)	72
5 A técnica de bulbos de compactação em um depósito de areia fofa	77
5.1. Introdução	77
5.2. Método analítico – El-Kelesh <i>et al.</i> (2001)	78
5.3. Análise Numérica	85
5.3.1. Descrição do modelo	85
5.3.2. Eficiência do tratamento com o modelo de Mohr-Coulomb	90
5.3.3. Eficiência do tratamento com o modelo HSM	92
5.3.4. Influência da base rígida	98
5.4. Influência do nível do lençol freático	103
5.4.1. Método analítico de El-Kelesh <i>et al.</i> (2001)	103
5.4.2. Método numérico	107
5.5. Comparação das soluções analítica e numérica	109
5.5.1. Camada de areia seca	109
5.5.2. Camada de areia saturada	111
5.6. Análise de um grupo de colunas de injeção	113
6 Conclusões e Sugestões	120
6.1. Conclusões	120
6.2. Sugestões	122
Referências Bibliográficas	123

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Bulbos de compactação para compensação de recalques em estruturas.	23
Figura 2.1-Esquemas de diferentes categorias da tecnologia de injeção com argamassa.	26
Figura 2.2 - Vibrocompactação: (a) esquema da técnica, (b) execução em campo. (Fonte: Hussin, 2006).	26
Figura 2.3 - Modificação da estrutura do solo por vibrocompactação.	27
Figura 2.4 - Esquema do processo de execução de vibrocompactação (Hussin, 2006).	27
Figura 2.5 - Vibrosubstituição: (a) esquema da técnica, (b) execução em campo (http://www.nce.co.uk)	28
Figura 2.6 - Esquema do processo de execução da vibrosubstituição (http://www.oyp.ucsc.cl/6/rodriguez1/Rodriguez/assets/seo/page2.html).	28
Figura 2.7 - Granulometria de tipos de solo tratados por vibrocompactação e vibrosubstituição.	29
Figura 2.8 - Jet Grouting: (a) esquema de uma coluna de jet grouting e (b) execução em campo. (Fonte: Hussin, 2006).	30
Figura 2.9 - Esquema de hastes nos sistemas de execução de jet grouting: (a) simples (CCP), (b) duplo (JSG ou JG) e (c) triplo (CJG). (Fonte: Roberto, 2012).	31
Figura 2.10 - Utilização da técnica de jet grouting: (a) estabilização de taludes; (b) reforço de fundações; (c) aplicação sub-horizontal em reforço de túneis; (d) cortina impermeável em fundação de barragem. (Fonte: Roberto, 2012).	32
Figura 2.11 - Permeation grouting: (a) esquema da técnica, (b) detalhe do escoamento da argamassa injetado através dos vazios do solo. (Fonte: Hussin, 2006 e Henriquez, 2007).	33
Figura 2.12 - Compensation grouting: (a) esquema da técnica, (b) execução em campo. (Fonte: Hussin, 2006).	34
Figura 2.13 – Fraturas originadas pela injeção de argamassa: (a) início do tratamento; (b) durante o tratamento (levantamento do terreno).....	35
Figura 2.14 - Esquema do equipamento para execução da técnica compensation grouting: (a) tubos de injeção (TAM); (b) componentes do TAM. (Fonte: Bezuijen, 2010).	35
Figura 3.1 - Coluna formada com a técnica de bulbos de compactação (ASCE, 2010).	37
Figura 3.2 - Esquema do processo de execução da técnica de bulbos de compactação (Fonte: Hussin, 2006).	38

Figura 3.3 - Influência do tipo do solo na forma da coluna de argamassa (ASCE, 2010).	39
Figura 3.4 - Esquema do processo de execução dos bulbos de compactação (Grupo KELLER).	42
Figura 3.5 - Método de injeção descendente na 1 ^{ra} e 2 ^{da} etapa de injeção (duas primeiras figuras) e método de injeção ascendente na última etapa (Henriquez, 2007).	43
Figura 3.6 - Separação e distribuição das linhas de injeção (El-Kelesh e Matsui, 2002).	45
Figura 3.7 - Distribuições granulométricas para os agregados da argamassa.	47
Figura 3.8 - (a) Planta da futura edificação; (b) Perfil geotécnico do depósito de solo mostrando a camada 2 a ser densificada (ASCE, 2010).	48
Figura 4.1 - (a) Bulbo injetado representado pela expansão de cavidade esférica; (b) coluna de argamassa injetada formada por bulbos esféricos individuais.	55
Figura 4.2 - Expansão de cavidade esférica (Vesic, 1972).	55
Figura 4.3 - Ruptura por cisalhamento cônica causada pela injeção de argamassa (Graf, 1969).	59
Figura 4.4 - Ruptura por cisalhamento do solo devido à expansão do bulbo (Wong, 1974).	60
Figura 4.5 - Modelo de expansão do bulbo de argamassa (El-Kelesh <i>et al.</i> , 2001).	62
Figura 4.6 - (a) Expansão do bulbo até atingir uma condição limite; (b) variação da pressão limite antes e após a profundidade crítica (adaptado de El-Kelesh <i>et al.</i> 2001).	66
Figura 4.7 – (a) Zona de influência de uma coluna de bulbos, (b) vista em planta da zona de influência entre duas colunas de bulbos adjacentes.	67
Figura 4.8 - Procedimento para utilização do modelo de El-Kelesh <i>et al.</i> (2001) para melhoramento de solos por bulbos de compactação.	69
Figura 4.9 - Superfície de escoamento no espaço das tensões principais. (Schanz <i>et al.</i> , 1999)	73
Figura 4.10 - Relação tensão-deformação hiperbólica em ensaios triaxiais convencionais, consolidados e drenados (Schanz <i>et al.</i> , 1999)	74
Figura 4.11 - Módulo E_{oed}^{ref} obtido a partir do ensaio odométrico (Brinkgreve <i>et al.</i> , 2012)	75
Figura 5.1 - Perfil do depósito de solo.	77
Figura 5.2 - Incremento do raio do bulbo durante o processo de injeção até atingir uma condição limite.	79

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.	80
Figura 5.4 - Incremento das pressões limite considerando os efeitos da injeção por estágios.	83
Figura 5.5 - Incremento das pressões limites de injeção considerando carregamentos de 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa aplicados na superfície do terreno.	84
Figura 5.6 - Variação das pressões de injeção P_{uph} e P_{ex-df} para identificação da profundidade crítica de injeção.	85
Figura 5.7 - Geometria do problema com indicação dos bulbos de injeção (B-01 a B-07).	86
Figura 5.8 - Malha de elementos finitos para a análise axissimétrica.	87
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.	88
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.	89
Figura 5.11 - Recalque (deslocamento vertical negativo) na superfície do terreno para os casos A, B e C. Valores em m.	91
Figura 5.12 - Variação do índice de vazios com a distância radial para os casos A, B e C.	93
Figura 5.13 - Variação da densidade relativa (D_r) com a distância radial para os casos A, B e C.	94
Figura 5.14 - Variação da razão entre tensões radiais, ao longo da profundidade, nas distâncias radiais $r = 0,5, 0,75, 1$ e $1,5m$ para os casos A, B e C.	94
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.	95
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.	96
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.	97
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.	98
Figura 5.19 - Esquema da variação da distância vertical entre o bulbo B-01 e o estrato de granito decomposto.	99

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.	100
Figura 5.21 - Variação da densidade relativa com a distância radial ao bulbo B-01 para diferentes distâncias do estrato inferior de granito decomposto.....	100
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.	101
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.	102
Figura 5.24 - Pressões limites de injeção calculadas pelo método analítico de El-Kelesh <i>et al.</i> (2001) para as condições de areia seca e saturada.	104
Figura 5.25 – Variação das pressões limites de injeção para condições de areia seca e saturada, com identificação das respectivas profundidades críticas.	105
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).	107
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.	108
Figura 5.28 – Comparação da pressão limite de injeção determinada nos métodos analítico (El-Kelesh <i>et al.</i> , 2011) e numérico (elementos finitos na condição de axissimetria).	110
Figura 5.29 - Comparação do raio final dos bulbos após aplicação da injeção nos métodos analítico e numérico.....	111
Figura 5.30 - Comparação da pressão limite de injeção nos métodos analítico e numérico para os casos de depósito de areia seca e saturada.	112
Figura 5.31 - Comparação do raio final do bulbo após injeção nos métodos analítico e numérico para depósitos de areia seca e saturada.	113
Figura 5.32 – Localização em planta de 9 colunas de injeção com indicação da região de solo modelada por elementos finitos compreendendo 4 colunas.	114
Figura 5.33 – Malha de elementos finitos no programa computacional Plaxis 3D.	114
Figura 5.34 – Colunas de injeção C4, C6, C7, C9 e linhas de injeção L2, L3.	115
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..... 116

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. 118

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Valores limites de pressão de injeção em solos granulares.	50
Tabela 4.1 - Parâmetros do modelo HSM (Brinkgreve <i>et al.</i> 2012)	76
Tabela 5.1 - Parâmetros geotécnicos para a areia (Henriquez, 2007) e para o granito decomposto (Chan, 2005).	78
Tabela 5.2 - Propriedades e parâmetros do material dos bulbos (Chan, 2005).	78
Tabela 5.3 - Resumo das pressões limites obtidas para diferentes profundidades de injeção do depósito de areia.	81
Tabela 5.4 - Melhoramento do terreno em termos de densidade relativa e índice de vazios final.	82
Tabela 5.5 - Variação do raio plástico para atingir a nova densidade relativa.	82
Tabela 5.6 - Sequência de injeção dos bulbos.	87
Tabela 5.7 - Pressões de injeção aplicadas no contorno da cavidade para o caso B.	89
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.	102
Tabela 5.9 – Pressões limites de injeção para diferentes profundidades de bulbo nas condições de areia seca e saturada.	104
Tabela 5.10 – Melhoramento do depósito de areia saturada em termos de índice de vazios e da densidade relativa.	105
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	106
Tabela 5.12 – Diminuição da zona de influência do tratamento por bulbos de compactação para atingir maior densidade relativa final.	106
Tabela 5.13 – Comparação da pressão limite de injeção (P_{lim}) das soluções analítica e numérica.	110
Tabela 5.14 – Comparação do raio final dos bulbos após aplicação da injeção nos métodos analítico e numérico.	111
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.	117
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).	119

Lista de Símbolos

Romanos

$R(\%)$	Melhoramento relacionado à compactação relativa
a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5	Constantes dependentes do tipo do solo
a	Gradiente da função de plastificação
a_h	Variação da superfície de plastificação
b	Vetor que define a direção do fluxo plástico
B-01, B-02, B-03, B-04, B-05, B-06 e B-07	Pontos de injeção de bulbos
c	Coesão
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9	Colunas de bulbos injetados - modelo 3D
D_r	Densidade relativa
$D_{r\ final}$	Densidade relativa final
D_t	Matriz constitutiva tangente continua ou elastoplástica
e	Índice de vazios
$e_{\ final}$	Índice de vazios final
$e_{\ ini}$	Índice de vazios inicial
$e_{\ máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{\ mín}$	Índice de vazios mínimo
E	Módulo de deformação
E	Matriz de endurecimento
E_{50}	Módulo elástico tangente (50% da tensão de ruptura). Modelo HSM
$E_{\ oed}$	Módulo de compressão confinada. Modelo HSM
$E_{\ ur}$	Módulo de carregamento/descarregamento. Modelo HSM

E_{50}^{ref}	Rigidez de referência em carregamento. Modelo HSM
E_{oed}^{ref}	Rigidez de referência em compressão confinada. Modelo HSM
E_{ur}^{ref}	Rigidez de referência em carregamento/descarregamento. Modelo HSM
f	Função de qualquer tensor de tensão ou parâmetro de endurecimento
\bar{f}	Superfície de escoamento
f^c	Superfície <i>cap</i>
F	Função de escoamento
F_c, F_q	Fatores adimensionais de cavidade esférica
g	Superfície de potencial plástico
G	Módulo de cisalhamento
G	Função potencial plástico
h	Profundidade do solo
h	Parâmetro de endurecimento
H	Módulo de endurecimento
I_r	Índice de rigidez reduzida
I_{rr}	Índice de rigidez reduzida
K	Módulo de deformação volumétrica
K_0^{nc}	Coefficiente de pressão lateral
L1, L2 e L3	Linhas de injeção - Modelo 3D
l_j	Cossenos diretores
m	Parâmetro do modelo HSM
n_{final}	Porosidade final
n_{ini}	Porosidade inicial
N_{SPT}	Número de golpes do ensaio SPT
N_1	Número de golpes (N_{SPT}) corrigido por tensão efetiva de sobrecarga e história de tensões
p	Tensão uniformemente distribuída aplicada na cavidade esférica
p'	Tensão isotrópica no espaço de Cambridge
p^{ref}	Tensão de referência arbitraria. Modelo HSM
p_p	Tensão de pré-adensamento isotrópico

p_u	Pressão de injeção última no contorno da cavidade esférica (Teoria de Vesic)
P_{ex-df}	Pressão associada ao excesso de deformação
P_{lim}	Pressão de injeção limite
P_{uph}	Pressão que origina o levantamento vertical do terreno
P_{ult}	Pressão última de injeção (assintótica)
q	Tensão efetiva isotrópica do solo - Solução de Vesic (1972)
q	Tensão desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$) – Modelo HSM
q_{50}	Valor da resistência correspondente a 50% da tensão na ruptura. Modelo HSM
q_a	Valor assintótico da resistência cisalhante. Modelo HSM
q_f	Valor da resistência cisalhante na ruptura. Modelo HSM
Q	Quantidade de argamassa injetada por etapa de injeção
r	Distância radial a partir do centro da cavidade
R	Raio da cavidade expandida após aplicação da pressão p
R_f	Razão de ruptura do modelo HSM
R_{final}	Raio final da cavidade esférica
R_{ini}	Raio inicial da cavidade esférica
R_{lim}	Raio limite correspondente à aplicação da pressão P_{lim}
R_p	Raio plástico
R_u	Raio da cavidade esférica na condição última (Teoria de Vesic)
S	Espaçamento horizontal entre colunas de bulbos
$U_{r\ max}$	Deslocamento radial máximo da cavidade
$U_{y\ max}$	Deslocamento vertical máximo na superfície do terreno
V_{cav}	Volume da cavidade esférica expandida
Vol_f	Volume inicial do depósito do solo seco após de injeção de bulbos
Vol_i	Volume inicial do depósito do solo seco antes de injeção de bulbos

Gregos

α	Ângulo de inclinação da tensão normal com a vertical
α, β	Fatores de ruptura adimensionais
Δ	Variação volumétrica media do solo na zona plástica
ΔV_p	Redução do volume na zona plástica
ε_l	Deformação axial
ε_l^p	Deformação axial plástica
ε_a^e	Componente elástica de deformação axial
ε_r^e	Componente elástica de deformação radial
$\dot{\varepsilon}_v^p$	Deformação volumétrica plástica
ϕ	Ângulo de atrito interno
γ	Peso específico natural
γ_{d0}	Peso específico seco inicial
γ_{d1}	Peso específico seco na zona de injeção
γ^p	Deformação plástica de desvio ou distorção
γ_w	Peso específico da água
λ	Constante de Lamé
u_p	Deslocamento radial no limite da zona plástica
ν	Coefficiente de Poisson
ν_{ur}	Coefficiente de Poisson em carregamento/descarregamento
θ	Ângulo de inclinação da superfície de ruptura cônica
θ	Ângulo de Lode
σ'_1	Tensão principal maior
σ'_3	Tensão principal menor
σ_i	Tensões principais
σ_{ij}	Tensor de tensões
σ_i^p	Vetor de tensão em um plano
σ_n	Tensão normal radial
σ_n^p	Tensão normal a um plano
σ_p	Tensão radial no limite na zona plástica

σ_r	Tensão radial (tensão principal maior)
σ_θ	Tensão tangencial (tensão principal menor)
σ_{rini}	Tensão radial inicial
σ'_h	Tensão efetiva horizontal
σ'_v	Tensão efetiva vertical
σ'_{vmax}	Tensão de sobreadensamento
σ'_{vo}	Tensão vertical efetiva <i>in-situ</i>
σ_{yield}	Tensão de escoamento
τ	Tensão cisalhante
τ^p	Tensão cisalhante em um plano
Ψ	Ângulo de dilatância

Lista de Abreviaturas

ASCE	American Society of Civil Engineers
CCP	Jet Grouting - Sistema Simples
CJG	Jet Grouting - Sistema Triplo
CPT	Ensaio de penetração de cone (Cone Penetration Test)
DMT	Ensaio de dilatômetro
HSM	Modelo Hardening Soil
JSG-JG	Jet Grouting - Sistema Duplo
MCM	Modelo Mohr-Coulomb
NAF	Lençol freático
SPT	Ensaio de simples reconhecimento (Standard Penetration Test)
TAMs	Tubos de injeção - compensation grouting (tubes a manchetes)