



Jose Carlos Solis Tito

Análise Numérica de Escavações Profundas em Solo

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Celso Romanel

Rio de Janeiro
Junho de 2014



Jose Carlos Solis Tito

Análise Numérica de Escavações Profundas em Solo

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

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Bernadete Ragoni Danziger

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Dr^a. Jackeline Rosemery Castañeda Huertas

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de junho de 2014.

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

Jose Carlos Solis Tito

Graduou-se em Engenharia Civil no Departamento de Engenharia Civil da UNSAAC (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco - Peru) em 2010. Em 2012 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Civil na PUC-RIO, na área de Geotecnia, atuando na linha de pesquisa de Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Tito, Jose Carlos Solis

Análise numérica de escavações profundas em solo / Jose Carlos Solis Tito ; orientador: Celso Romanel. - 2014.

189 f.: il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil - Teses. 2. Escavação profunda. 3. Validação de análise. 4. Análise numérica de escavação. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais Ignácio e Elsa, pelo amor, apoio e incentivo
que me ofereceram em todos momentos.
À minha irmã Edith pela ajuda que sempre me ofereceu.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Celso Romanel pela orientação, confiança, conhecimento transmitido e sua disposição prestada na orientação deste trabalho.

Ao programa de CAPES e à PUC-Rio, pelo apoio concedido, que viabilizou a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio, pelos ensinamentos transmitidos em cada uma das disciplinas que cursei.

Aos professores da UNSAAC, pelos ensinamentos da engenharia transmitidos durante a graduação.

Aos meus pais e irmã, pela educação e carinho de todas as horas.

A todos os amigos e familiares, que de uma forma ou de outra me ajudaram.

Resumo

Tito, Jose Carlos Solis; Romanel, Celso. **Análise Numérica de Escavações Profundas em Solo**. Rio de Janeiro, 2014. 189p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na atualidade, devido à necessidade de realizar obras de engenharia de grande porte em ambiente urbano, o engenheiro defronta-se muitas vezes com o desafio de executar escavações profundas, as quais devem ser projetadas para serem estáveis e limitar deformações a níveis aceitáveis. Uma escavação profunda estável é aquela cujas paredes não colapsam e o seu fundo não experimenta levantamento descontrolado. Deformações do solo podem afetar construções vizinhas, vias urbanas e outras instalações públicas, com consequências que dependem tanto da magnitude quanto do padrão do movimento do solo ao redor da escavação. A previsão do comportamento de uma escavação profunda envolve análises tanto de estabilidade quanto de deformação. Análises de estabilidade podem em geral ser feitas através de métodos de equilíbrio limite, mas as análises de deformações, por outro lado, são mais difíceis de serem previstas, necessitando do auxílio de métodos numéricos. Nesta dissertação, o comportamento de escavações profundas é investigado numericamente pelo método de elementos finitos, com especial atenção à ocorrência de deformações, para cuja previsão requer-se a utilização de modelos constitutivos que representem muitos dos aspectos de comportamento de solos reais.

Palavras-chave

Escavação profunda; validação de análise; análise numérica de escavação.

Abstract

Tito, Jose Carlos Solis; Romanel, Celso (Advisor). **Numerical Analysis of Deep Excavations in Soil**. Rio de Janeiro, 2014. 189p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

At the present, due to the need for engineering works of large scale in urban environment, the engineer is confronted often with the challenge of performing deep excavations, which should be designed to be stable and with acceptable levels of deformations. A stable deep excavation is that, whose walls do not collapse and its base does not experience uncontrolled heave. Soil deformations can affect neighboring buildings, urban roads and other public facilities, with consequences that depend on both the magnitude and the pattern of the movement of the soil around the excavation. The prediction of the behavior of a deep excavation therefore involves stability analysis as well as deformation analysis. Stability analysis can generally be made through limit equilibrium methods, but deformation analyses are more difficult to predict, requiring the assistance of numerical methods. In this dissertation the behavior of deep excavations is numerically investigated by the finite element method, with special attention to the occurrence of deformations, for this prediction requires the use of constitutive models that represent many aspects of behavior of real soils.

Keywords

Deep excavation; validation of analysis; numerical analysis of excavation.

Sumário

1 . Introdução	27
2 . Escavações profundas	32
2.1. Sistemas de contenção	32
2.2. Deslocamentos em escavações	42
2.2.1. Procedimentos semi-empíricos	43
2.2.2. Aplicação do método dos elementos finitos (MEF)	54
3 . Aspectos Metodológicos	59
3.1. Descrição do projeto de escavação	59
3.2. Parâmetros empregados no modelo constitutivo	78
3.2.1. Correlação dos parâmetros do solo da informação disponível no projeto.	78
3.2.2. Revisão dos parâmetros dos solos	84
3.2.3. Descrição dos parâmetros empregados no modelo	98
3.2.4. Descrição dos parâmetros dos elementos estruturais	98
3.3. Modelagem de uma escavação	106
3.4. Comportamento tensão-deformação	110
3.4.1. Modelo Mohr Coulomb.	126
3.5. Considerações do modelo	134
4 . Análise e apresentação dos resultados.	138
4.1. Análise axisimétrico, em 2D.	138
4.2. Análise em 3D.	139
4.3. Apresentação e discussão de resultados	141
5 . Conclusões e Sugestões	166
5.1. Conclusões	166
5.2. Sugestões	167

6 . Referências Bibliográficas	168
--------------------------------	-----

ANEXO	175
-------	-----

Lista de figuras

Figura 2.1 - Sistemas de contenção de escavações profundas com paredes verticais, (Massad, 2005).	32
Figura 2.2 - Cortina de estacas-pranchas sem ancoragem (Whitlow, 1994).	34
Figura 2.3 - Cálculo dos fatores de segurança contra levantamento do fundo em solos coesivos: (a) escavação profunda com $H/B > 1$, de acordo com Bjerrum e Eide (1956); (b) para escavação superficial ou larga, com $H/B < 1$, de acordo com Terzaghi (1943), (Puller, 2003).	36
Figura 2.4 - Determinação do gradiente hidráulico máximo na região do fundo da escavação por rede de fluxo (Puller, 2003)	37
Figura 2.5 - Penetração necessária da cortina impermeável para evitar ruptura hidráulica em areia densa ou fofa: (a) maciço de profundidade infinita; (b) camada de profundidade finita (Puller, 2003).	38
Figura 2.6 - Parede de estacas secantes para estacionamento subterrâneo (Rasines e Ramos, 2004).	39
Figura 2.7 - Processo de execução do método seco escandinavo, (1) posicionamento, (2) penetração/desagregação, (3) penetração até a profundidade do projeto, (4) extração com injeção, (5) coluna completa (Palacio, 2004).	40
Figura 2.8 - Esquema de execução com o método úmido europeu (Palacio, 2004).	41
Figura 2.9 - Aplicação da técnica jet-grouting (Pereira, 2008)	42
Figura 2.10 - Movimentos do terreno associados a escavações profundas (Craig, 2007).	43
Figura 2.11 - Faixa de variação de $\delta_{H(max)}/H$ em função do coeficiente de segurança (F_b) contra o levantamento do fundo da escavação (Mana e Clough, 1981).	44
Figura 2.12 - Escavações escoradas: (a) movimento lateral e (b) recalque da superfície, (Clough et al. 1989).	45
Figura 2.13 - Método de Clough e O'Rourke (1990)	46

Figura 2.14 - Definição das variáveis por Ou et al. (1993)	47
Figura 2.15 - Perfis típicos de recalque, Ou et al. (1993)	47
Figura 2.16 - Relação entre o intervalo de influência aparente e o comprimento da parede, Ou et al. (1993)	48
Figura 2.17 - Relação proposta entre os recalques e a distância da parede para o segundo perfil típico de recalque, Ou et al. (1993)	49
Figura 2.18 - Tipos de perfis de recalque, Hsieh e Ou (1998)	49
Figura 2.19 - Método proposto para a previsão do perfil de recalques do tipo “spandrel”. (Hsieh e Ou, 1998).	50
Figura 2.20 - Proposta de Hsieh e Ou (1998) para o perfil do tipo côncavo.	51
Figura 2.21 - Áreas das componentes em balanço e profunda (Hsieh e Ou, 1998)	52
Figura 2.22 - Relação entre as áreas A_s e A_c (Hsieh e Ou, 1998)	52
Figura 2.23 - Relação entre o valor máximo de deslocamento horizontal da parede e o recalque superficial máximo (Hsieh e Ou, 1998)	53
Figura 2.24 - Deslocamento lateral de uma cortina de estacas-prancha e recalques da superfície do terreno (Das, 2001).	54
Figura 3.1 - Plano em planta de localização do poço 39 pertencente ao Sistema de Coletores Troncos do Sistema Alegria.	60
Figura 3.2 - Perfil geológico que atravessa o coletor tronco do sistema alegria, no setor do Poço 39.	62
Figura 3.3 - Perfil geotécnico das seções transversais geotécnicas, a Secção AA está constituída pelas sondagens SP-58, SP-59, SP-60A, SP-61. A Secção BB está constituída pelas sondagens SP-59 e SP-30.	63
Figura 3.4 - Perfil geotécnico do solo para escavação do Poço PS-39.	64
Figura 3.5 - Diagrama do poço PS-39 em planta, onde se mostra a localização dos inclinômetros de controle, dos piezômetros e dos marcos superficiais de recalque.	65
Figura 3.6 - Diagrama da secção transversal 1-1, onde se mostra a localização do inclinômetro de controle I 01, e do piezômetro de controle PZ3.	66
Figura 3.7 - Registro dos deslocamentos verticais nos marcos	

superficiais.	67
Figura 3.8 - Diagrama do inclinômetro empregado para medir os deslocamentos horizontais (Fonte: Projeto).	68
Figura 3.9 - Registro de deslocamentos horizontais no Inclinômetro I 01	69
Figura 3.10 - Registro de deslocamentos horizontais no Inclinômetro I 02	69
Figura 3.11 - Registro de deslocamentos horizontais no Inclinômetro I 03	70
Figura 3.12 - Registro dos deslocamentos horizontais na direção A+, no inclinômetro I 01, do poço de serviço PS-39, correspondente à data da leitura 29 de outubro de 1999.	71
Figura 3.13 - Registro das leituras piezométricas, determinadas com os piezômetros PZ1, PZ2, PZ3.	71
Figura 3.14 - Diagrama do piezômetro empregado para medir o desenvolvimento das poropressões (Fonte: Projeto).	72
Figura 3.15 - Leituras de Piezômetro e nível de água (NA) 59, em função das datas de leitura realizadas.	74
Figura 3.16 - Registro das leituras das cargas totais no piezômetro PZ3, durante o processo de escavação.	75
Figura 3.17 - Diagrama da profundidade do avanço da escavação	77
Figura 3.18 - Relação entre $N_{SPT,60}$ e densidade relativa (Gibbs e Holtz, 1957).	80
Figura 3.19 - Relação entre N_{SPT} e ângulo de atrito interno (De Mello, 1971).	81
Figura 3.20 - Relação entre $N_{SPT,60}$ e a resistência não drenada de argilas (U.S. Navy, 1986).	82
Figura 3.21 - Posição dos nós e pontos de tensão em elementos de placa (Brinkgreve, 2012)	100
Figura 3.22 - Diagrama de distribuição dos tirantes na laje de jet-grouting no fundo da escavação.	104
Figura 3.23 - Simulação numérica de escavações via MEF (Zornberg, 1989).	108
Figura 3.24 - Determinação dos parâmetros de rigidez num ensaio	

triaxial drenado, adaptado de Waterman (2011).	111
Figura 3.25 - Relação linear entre tensão e deformação para (a) compressão e (b) cisalhamento de elementos elásticos (Wood, 2004).	112
Figura 3.26 - Trajetória de tensões totais para um ensaio triaxial de compressão convencional, (Wood, 2004).	114
Figura 3.27 - Propriedades elásticas deduzidas dos estados iniciais de ensaios triaxiais drenados convencionais, (a) plotados em função de deformação distorcional, e (b) plotados em função de deformação axial (Wood, 2004).	115
Figura 3.28 - Comportamento de materiais ideais perfeitamente plástico (Atkinson, 1993).	117
Figura 3.29 - Potencial plástico (Atkinson, 1993)	117
Figura 3.30 - Vetor de deformações plásticas, (Atkinson, 1993)	118
Figura 3.31 - Modelo elástico- perfeitamente plástico, superfície de escoamento separando regiões elástica e inacessível do espaço de tensões (Wood, 2004).	119
Figura 3.32 - Resistência não drenada de acordo com o modelo de Mohr-Coulomb, adaptado de Waterman (2011)	125
Figura 3.33 - Comportamento do modelo elástico perfeitamente plástico (Brinkgreve, 2012).	126
Figura 3.34 - Superfície de escoamento no plano de tensões principais, $c = 0$ (Brinkgreve, 2012).	129
Figura 3.35 - Definição de E_0 e E_{50} para os resultados de ensaios triaxiais drenados (Brinkgreve, 2012).	130
Figura 3.36 - (a) Cisalhamento das camadas em estado fofo, (b) cisalhamento de camadas em estado denso, (c) mudança do volume em cisalhamento das camadas em estado fofo e estado denso (Wood, 2004).	133
Figura 3.37 - Ensaio triaxial drenado com o modelo de Mohr Coulomb, a) Tensão axial contra deformação axial, b) Deformação volumétrica contra deformação axial.	134
Figura 3.38 - Cálculo do tipo estado permanente disponível no programa PLAXIS 3D 2012.02 para a análise desacoplado das poro	

pressões.	137
Figura 4.1 - Problema com simetria rotacional (Lizarza, 2011).	138
Figura 4.2 - Malha deformada no Modelo em 2D, no final do processo de escavação	139
Figura 4.3 - Elemento tetraedro de dez nós (Lizarza, 2011).	140
Figura 4.4 - Modelo em 3D, na ultima etapa do processo de escavação.	141
Figura 4.5 - Deslocamentos totais, nos estágios de escavação, a) (E_1) 0.9 m, b) (E_9) 8.6 m, c) (E_{18}) 16 m.	142
Figura 4.6 - Sistema geral de coordenadas tridimensional e convenção de sinais para tensões.	142
Figura 4.7 - Tensão efetiva horizontal, nos estágios de escavação, a) (E_1) 0.9 m, b) (E_9) 8.6 m, c) (E_{18}) 16 m.	143
Figura 4.8 - Evolução de tensão efetiva horizontal do lado ativo e do lado passivo, durante o processo de escavação.	144
Figura 4.9 - Tensão efetiva vertical, nos estágios de escavação a) (E_1) 0.9 m, b) (E_9) 8.6 m, c) (E_{18}) 16 m.	145
Figura 4.10 - Poropressões no estado permanente, nos estágios de escavação a) (E_1) 0.9 m, b) (E_9) 8.6 m, c) (E_{18}) 16 m.	146
Figura 4.11 - Evolução da poropressão em estado permanente do lado ativo e do lado passivo.	147
Figura 4.12 - Excessos de poropressão, em condição permanente, nos estágios de escavação a) (E_1) 0.9 m, b) (E_9) 8.6 m, c) (E_{18}) 16 m.	148
Figura 4.13 - Evolução do excesso de poropressão do lado ativo.	149
Figura 4.14 - Evolução do excesso de poropressão do lado passivo.	150
Figura 4.15 - Distribuição da carga total (h), nos estágios de escavação a) (E_1) 0.9 m, b) (E_9) 8.6 m, c) (E_{18}) 16 m.	150
Figura 4.16 - Perfil de deslocamentos horizontais	152
Figura 4.17 - Descenso do lençol freático no piezômetro de controle PZ3	153
Figura 4.18 - Comparação dos deslocamentos horizontais empregando os modelamentos usando estado plano de deformações (até uma das etapas iniciais, E_4) e tridimensional (até a etapa final,	

E18).	154
Figura 4.19 - Malha de elementos finitos de escavação de forma retangular, e localização de linhas de controle dos deslocamentos horizontais.	155
Figura 4.20 - Comparação dos deslocamentos horizontais, das duas linhas de controle consideradas na análise de escavação retangular com a análise tridimensional.	156
Figura 4.21 - Pontos de tração e pontos de escoamento plástico gerados durante a análise considerando adensamento (correspondente à etapa E8).	157
Figura 4.22 - Pontos de tração e pontos de escoamento plástico gerados durante a análise plástica (correspondente à etapa E8).	157
Figura 4.23 - Descenso do nível freático (correspondente às 10 primeiras etapas da análise de adensamento), conforme o avanço da escavação do poço.	158
Figura 4.24 - Descenso do nível freático (correspondente às 8 ultimas etapas da análise de adensamento), conforme o avanço da escavação do poço.	159
Figura 4.25 - Descenso do nível freático (correspondente às 10 primeiras etapas da análise plástica), conforme o avanço da escavação do poço.	160
Figura 4.26 - Descenso do nível freático (correspondente às 8 ultimas etapas da análise plástica), conforme o avanço da escavação do poço.	161
Figura 4.27 - Evolução dos deslocamentos horizontais na direção A+, ao longo das 18 etapas de escavação, determinados com a análise plástica.	162
Figura 4.28 - Evolução dos deslocamentos horizontais na direção A+, ao longo das 18 etapas de escavação, determinados com a análise de adensamento.	162
Figura 4.29 - Evolução do lençol freático, ao longo das 18 etapas de escavação, determinado pelas análises plástica e de adensamento.	164

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Ensaio de recuperação nos piezômetros (permeabilidade in situ), com o piezômetro 59.	73
Tabela 3.2 - Registro das leituras executadas com o piezômetro e medidor do nível da água.	74
Tabela 3.3 - Cotas piezométricas registradas durante o processo de escavação.	75
Tabela 3.4 - Cronograma de avanço da escavação.	77
Tabela 3.5 - Peso específico de solos argilosos	80
Tabela 3.6 - Peso específico de solos arenosos	80
Tabela 3.7 - Correlação para solos não coesivos entre D_r , compacidade e $N_{SPT,60}$.	83
Tabela 3.8 - Propriedades comuns de solos não coesivos	83
Tabela 3.9 - Propriedades comuns de solos argilosos	84
Tabela 3.10 - Parâmetros mecânicos do solo	88
Tabela 3.11 - Parâmetros geotécnicos da argila utilizados na modelagem numérica, apresentados por Lima (2007).	89
Tabela 3.12 - Parâmetros dos solos, apresentados por Teixeira.	91
Tabela 3.13 - Valores típicos de parâmetros geotécnicos	91
Tabela 3.14 - Valores médios de permeabilidade para vários tipos de solo	92
Tabela 3.15 - Valores típicos de módulo de elasticidade para os solos e rochas	92
Tabela 3.16 - Valores típicos do coeficiente de Poisson para solos e rochas	93
Tabela 3.17 - Valores dos parâmetros geotécnicos para o material aterro, de acordo com as fontes bibliográficas de referência.	94
Tabela 3.18 - Valores dos parâmetros geotécnicos para a argila mole, de acordo com as fontes bibliográficas de referência.	95
Tabela 3.19 - Valores dos parâmetros geotécnicos para a argila arenosa, de acordo com as fontes bibliográficas de referência.	96

Tabela 3.20 - Valores dos parâmetros geotécnicos para o silte arenoso, de acordo com as fontes bibliográficas de referência.	97
Tabela 3.21 - Parâmetros das camadas de solo do perfil geotécnico	98
Tabela 3.22 - Elemento placa, representando o concreto projetado (modelo 3D)	101
Tabela 3.23 - Elemento placa, representando o concreto projetado (modelo 2D)	102
Tabela 3.24 - Elemento placas, representando o tramo ancorado (bulbo) do tirante (modelo 2D)	102
Tabela 3.25 - Elementos sólido, representando elementos estruturais (modelo 2D e 3D)	103
Tabela 3.26 - Elemento mola, representando tramo de comprimento livre do tirante (modelo 2D)	105
Tabela 3.27 - Elemento mola, representando o tramo de comprimento livre do tirante (modelo 3D)	105
Tabela 3.28 - Elemento estaca, representando o tramo ancorado (bulbo) do tirante (modelo 3D)	106
Tabela 4.1 - Leituras piezométricas por instrumentação e por análise 2D e 3D.	153

Lista de símbolos

$1/K$	Coeficiente de compressibilidade
A	Área da seção transversal do elemento estaca, do elemento tirante.
B	Matriz derivada da função de forma, função de forma de deformações.
c	Parâmetro de resistência ao cisalhamento, coesão.
c'	Parâmetro de resistência ao cisalhamento drenada (tensão efetiva)
c_c	Índice de compressão virgem.
CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade
c_k	Parâmetro de cambio de permeabilidade durante o processo de adensamento.
c_r	Índice de recompressão do solo.
c_s	Índice de expansão
c_v	Coeficiente de adensamento vertical.
c_w	Adesão sem drenagem entre a parede e o solo
c_α	Coeficiente de compressão secundária.
D	Zona de influência dos recalques
D	Diâmetro do bulbo para determinação da permeabilidade no campo.
D	Matriz de rigidez elástica
D	Injeção do ligante por via seca.
D^{ep}	Matriz de rigidez elastoplástica.
d_{eq}	Espessura equivalente da placa
D_r	Densidade relativa.
e	Índice de vazios
E	Modulo de elasticidade, modulo de Young
e	Espessura da parede de contenção.
E	Misturado profundo próximo da parte útil da perfuração
E'	Modulo de Young efetivo
e_0	Índice de vazios inicial
E_0	Módulo elástico tangente, módulo de deformação inicial.

E_1	Módulo de Young na primeira direção axial, para elementos placa 3D.
E_2	Módulo de Young na segunda direção axial, para elementos placa 3D.
E_{50}	Módulo de deformação secante a 50% da resistência de compressão.
EA	Rigidez axial num elemento placa.
EA_1	Rigidez normal num elemento placa.
EA_2	Rigidez na direção de saída do plano
e_{cs}	Índice de vazios na condição de estado crítico para $p' = 1,0$
EI	Rigidez à flexão.
E_u	Módulo de elasticidade não drenado.
E_{ur}	Módulo de descarga-recarrega.
\mathbf{F}	Vetor das forças nodais
F	Coeficiente de segurança.
F	Fator característico para determinar permeabilidade no campo.
$f(\sigma)$	Função de escoamento
F_b	Coeficiente de segurança contra o levantamento do fundo.
F_c	Força de resistência ao cisalhamento ao longo do plano de deslizamento BT.
F_{max}	Máxima força permitida na ponta da estaca incorporada.
$F_{max,comp}$	Força de compressão máxima limite, em elementos mola.
$F_{max,tens}$	Força de tensão máxima limite, em elementos mola.
F_y	Fluência do aço
F_w	Força de resistência ao cisalhamento no plano de interface entre o solo e o muro, AB.
G	Módulo de cisalhamento
$g(\sigma)$	Função potencial plástica
G_{12}	Módulo de cisalhamento no plano.
G_{13}	Módulo de cisalhamento fora do plano, relacionado com a deformação de cisalhamento através da primeira direção.
G_{23}	Módulo de cisalhamento fora do plano, relacionado com a deformação de cisalhamento sobre a segunda direção.
G_s	Massa específica das partículas sólidas

G_u	Módulo de cisalhamento não drenado.
h	Espaçamento vertical médio das escoras
h	Carga total.
H, h	Altura, profundidade
h_0	Profundidade da zona de tração
h_e	Carga de elevação
h_p	Carga de pressão
h_v	Carga de velocidade
I	Momento de inercia à flexão.
I	Inclinômetro de controle
i	Gradiente hidráulico.
k	Fator de correção de cisalhamento, num elemento placa.
K	Modulo volumétrico, modulo de deformação volumétrica.
K'	Modulo volumétrico do esqueleto do solo
K_a	Coefficiente de empuxo ativo
K_p	Coefficiente de empuxo passivo
K_0	Coefficiente de empuxo no repouso
K_{0x}	Coefficiente de empuxo no repouso na direção x
K_{0y}	Coefficiente de empuxo no repouso na direção y
K_{air}	Módulo volumétrico do ar.
k_h, k_v	Coefficientes de permeabilidade nas direções horizontal e vertical.
K_n, K_t	Rigidezes normais elásticas dos elementos da interface incorporados de um elemento estaca.
k_{rel}	Permeabilidade relativa
K_s	Rigidez de cisalhamento elástico, em elementos estaca
K_u	Módulo volumétrico não drenado.
K_w	Modulo volumétrico da água
$K_{w,ref}/n$	Rigidez volumétrica de referência corresponde do fluido dos poros
K_w^0	Rigidez volumétrica real da água pura.
k_x, k_y, k_z	Coefficiente de permeabilidade na direção x, y e z .
L	Comprimento do bulbo para determinação da permeabilidade no campo.
LL	Limite de liquidez

LP	Limite de plasticidade
m_v	Coeficiente de compressibilidade volumétrica
M	Número de elementos escavados que compartilham um ponto nodal no contorno da escavação.
M	Inclinação da linha do estado crítico (LEC) no plano $p' \times q$.
M_p	Máximo momento de flexão, para comportamento elástico num elemento placa.
N	Força axial num elemento mola.
n	Porosidade do solo.
N_p	Máxima força normal, para comportamento elástico num elemento placa.
N_{SPT}	Índice de resistência à penetração
$N_{SPT,60}$	Valor de N_{SPT} corrigido para 60% da energia teórica de queda livre.
\emptyset	Diâmetro
OCR	Razão de pré-adensamento
OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade
P	Força sob a parede de contenção
p'	Tensão efetiva média, tensão efetiva volumétrica, tensão efetiva isotrópica.
p	Tensão média, tensão volumétrica, tensão isotrópica.
p'_0	Pressão de sobrecarga efetiva
p'_0	Tensão efetiva media inicial
p'_f	Tensão efetiva media na ruptura
p_0	Tensão media inicial
p_e	Pressão exterior conformado por pressões de terra
p_f	Tensão media na ruptura
P_A	Empuxo ativo sobre a parede
P_{ha}, P'_{ha}	Componente horizontal da força ativa total e efetiva, empuxo ativo total e efetivo.
P_{hp}, P'_{hp}	Componente horizontal da força passiva total e efetiva, empuxo passivo total e efetivo.
P_t	Turfa
P_w	Empuxo lateral devido à agua na fenda de tração

q	Tensão desviadora.
q_p	Fluxo nos contornos.
q_x, q_y, q_z	Fluxo por unidade de volume nas direções x, y e z.
r_{ext}	Raio exterior da parede
r^{i-1}	Vector de força residual
R	Força de reação do solo
R_{inter}	Fator de redução de resistência da interface
r_m	Raio médio da parede.
S	Grau de saturação
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado (tensão total)
t	Tempo decorrido
T	Fator tempo, para porcentagem média de adensamento= 95%
T_{max}	Máxima tração permitida na superfície da estaca incorporada.
t_n, t_t	Tensões normais, num elemento estaca.
t_s	Força de cisalhamento na direção axial, num elemento estaca.
u	Poropressão, pressão neutra.
u_x, u_y, u_z	Graus de liberdade de translação
u e v	Deslocamentos no plano em direções perpendiculares
u_0	Poropressão permanente
u_e	Excesso de poropressão.
u^p	Deslocamento da estaca, do elemento estaca incorporado.
u^s	Deslocamento do solo, do elemento estaca incorporado.
u_{ss}	Poropressão de percolação permanente.
u_t	Poropressão no instante t.
v	Valores nodais dos deslocamentos.
V_0	Volume do elemento solo em condições naturais.
V_t	Volume do elemento solo no instante t.
V_s	Massa de solo movimentada lateralmente
V_w	Volume de água no interior do elemento de solo.
v_x, v_y, v_z	Componentes da velocidade v, nas direções x, y e z
w	Teor de umidade
W	Peso do solo na cunha
x_{min}	Condição de contorno na direção x menor, no modelo em 3D.

y_{\min}	Condição de contorno na direção y menor, no modelo em 3D.
z_{\min}	Condição de contorno na direção z menor, no modelo em 3D.
α	Ângulo do plano de ruptura
α	Parâmetro utilizado como interruptor, entre material elástico e plástico.
β	Ângulo da inclinação superficial
γ	Peso específico
γ_{sat}	Peso específico saturado; aplica-se a todo material que esta abaixo do lençol freático.
γ_{unsat}	Peso específico não saturado; aplica-se a todo material que esta acima do lençol freático.
δ	Incrementos
Δ	Incrementos
δ	Ângulo de atrito da parede, entre o solo e a parede
δ_a	Deslocamento correspondente a pressões de terra ativas
Δf_u	Incremento do vetor
δ_H	Deslocamento lateral horizontal de uma parede
$\delta_{H(\max)}$	Deslocamento lateral horizontal máximo da parede de contenção.
δ_p	Deslocamento correspondente a pressões de terra passivas
Δt	Passo de tempo
Δu	Excesso de poropressão.
Δu_f	Excesso de poropressão na ruptura.
Δu_t	Excesso de poropressão no instante t.
δ_v	Recalque do terreno
$\delta_{V(\max)}$	Recalque máximo do terreno
ΔV_t	Incremento do volume do corpo no instante t
θ	Ângulo da inclinação posterior da parede
ε_a	Deformação axial
$\varepsilon^e, \varepsilon^p$	Vetor com componentes de deformação cartesianas elásticas e plásticas, componentes normais.
ε_N	Deformação normal, num elemento estaca
ε^p	Vetor de deformação plástica
ε_p	Deformação volumétrica

ε_q	Deformação distorcional, deformação cisalhante
ε_r	Deformação radial
ε_v	Deformação volumétrica
κ	Inclinação da linha de descarregamento/recarregamento, no plano e $-\ln(p')$
λ	Inclinação da linha virgem ou linha de adensamento isotrópica (LCI) e linha do estado crítico (LEC), no plano e $-\ln(p')$
λ	Multiplicador plástico
μ	Multiplicador escala que define o mecanismo de deformação plástica
ν	Coefficiente de Poisson
ν'	Coefficiente de Poisson para carregamento drenado
ν_{12}	Coefficiente de Poisson no plano 12.
ν_u	Coefficiente de Poisson para carregamento drenado
σ	Vetor com componentes de tensão cartesianas, componentes normais.
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	Componentes de tensão do estado de tensão num ponto, no espaço.
σ, σ'	Tensão normal total e efetiva
$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$	Tensões principais efetivas.
σ'_a	Tensão efetiva axial
σ'_c	Tensão confinante efetiva, pressão de adensamento isotrópico.
σ'_r	Tensão efetiva radial
σ'_h e σ'_v	Tensão horizontal e vertical efetiva
σ'_{v1}	Tensões verticais efetivas
σ'_{v0}	Tensão efetiva vertical no campo.
σ'_x, σ'_y	Componentes de tensão efetivas do estado de tensão num ponto no plano.
σ_0	Tensão horizontal total no campo
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais totais.
σ_f	Vetor da tensão de escoamento.
σ_h, σ_v	Tensão horizontal e vertical total.
$\sigma_{ha}, \sigma'_{ha}$	Pressão de terra ativa total e efetiva

$\sigma_{hp}, \sigma'_{hp}$	Pressão de terra passiva total efetiva
σ_{med}	Tensão de compressão média
σ_t	Tensão de tração disponível
$\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \tau_{xy0}$	Tensões vertical, horizontal e de cisalhamento iniciais.
τ	Tensão cisalhante
τ_f	Tensão cisalhante de pico
ϕ	Parâmetro de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito.
ϕ'	Parâmetro de resistência ao cisalhamento drenada (tensão efetiva)
ϕ_u	Parâmetro de resistência ao cisalhamento não drenada (tensão total)
ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z	Graus de liberdade de rotação.
ψ	Ângulo de dilatação

Lista de Abreviaturas

CD	Ensaio de compressão triaxial drenado convencional
CID	Ensaio adensado isotropicamente drenado
CIU	Ensaio adensado isotropicamente não drenado
CRS	Ensaio de adensamento com velocidade de deformação controlada.
DSM	Métodos de misturado profundo do solo.
J	Misturado do ligante com o solo com sistema de jatos de argamassa de alta velocidade tipo jet grouting.
MC	Modelo Mohr-Coulomb.
P	Piezômetro de tubo aberto, piezômetro de controle.
PS	Poço de serviço
R	Misturado do ligante com o solo, mediante rotação de laminas ou hélices.
S	Misturado profundo em forma continua ao longo da tubulação de perfuração, por método de laminas ou hélices.
SIC	Ensaio de adensamento convencional com carregamento incremental.
SP	Sondagens de reconhecimento SPT
SS	Modelo Soft-Soil
SSC	Modelo Soft-Soil-Creep
UU	Ensaio não adensado não drenado.
W	Injeção do ligante por via úmida