



Jackeline Rosemery Castañeda Huertas

**Procedimentos de Análise Não-linear
para Previsão de Resposta
Sísmica em Geoestruturas**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Celso Romanel

Volume I

Rio de Janeiro
Junho de 2012



Jackeline Rosemery Castañeda Huertas

**Procedimentos de Análise Não-linear
para Previsão de Resposta
Sísmica em Geoestruturas**

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora
abaixo assinada.

Prof. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Nelson Inoue

GTEP- PUC-Rio

Prof. Andréa Abreu Diniz de Almeida

Universidade Federal Fluminense

Prof. Maria Cascão Ferreira de Almeida

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico
Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de junho de 2012

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

Jackeline Rosemary Castañeda Huertas

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO), de Trujillo – Peru, em 1999, tendo exercido a profissão de engenheira civil na cidade de Iquitos – Peru até 2003. Ingressou em 2004 no curso de Mestrado e em 2007 prosseguiu no curso de Doutorado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo investigações na linha de pesquisa em Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Huertas, Jackeline Rosemary Castañeda

Procedimentos de análise não-linear para previsão de resposta sísmica em geoestruturas/ Jackeline Rosemary Castañeda Huertas ; orientador: Celso Romanel. – 2012.

2v. il; 29,7 cm.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Modelagem numérica. 3. Liquefação dinâmica em solos. 4. Análise sísmica. 5. Estruturas nucleares. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

Aos meus amados pais,
Lydia Norma e Henry Alejandro.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Em especial ao professor Celso Romanel pela presente orientação e formação ao longo de todo esse tempo de trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora, Paulo Batista Gonçalves, Pedricto Rocha Filho, Andréa Abreu Diniz de Almeida, Maria Cascão Ferreira de Almeida, Nelson Inoue e Celso Romanel, pelas valiosas contribuições buscando o aperfeiçoamento deste trabalho.

Um agradecimento especial aos meus colegas e amigos pelas discussões e contribuições ao longo desta pós-graduação, Carmen Ayquipa, Fanny Herrera, Grisel Portillo, Flávia Falcão, Thaís Abreu, Vivian Marchesi, Mariana Benessuiti, Eliot Pezo, Fabrício Zuleta, Ramiro Piedra, Carlos Soto, Wagner Nahas, Julio Bizarreta, Danilo Ramos, Martin Purizaga, Christian Elescano e Frank Pérez. Da mesma forma para Zenón Aguilar Bardales, José Huertas Polo, Ana Paula Martins Názario e à dona Vane Serra Pedroso.

Às prezadas amigas do Departamento de Engenharia Civil, Rita de Cássia do Nascimento Leite, Paula Enoy Nobrega Teixeira e Maria de Fátima de Castro Dinoá.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas respectivas concessões de bolsa de estudos que viabilizaram minha permanência durante o curso.

Resumo

Huertas, Jackeline Rosemery Castañeda; Romanel, Celso (Orientador). **Procedimentos de análise não-linear para previsão de resposta sísmica em geoestruturas**. Rio de Janeiro, 2012. 348 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo do comportamento de solos sob carregamento sísmico é de grande importância para o projeto de geoestruturas situadas em regiões de alta atividade sísmica, como nos países andinos ao longo da borda da placa tectônica sul-americana. No Brasil, localizado no interior desta placa, onde eventos sísmicos são menos frequentes e de menor magnitude, um projeto sísmico detalhado é necessário para algumas obras de engenharia de alta importância como centrais nucleares. O objetivo principal desta dissertação é investigar o comportamento sísmico de geoestruturas, descrevendo e discutindo os vários pontos que devem ser cuidadosamente considerados pelos projetistas sob ponto de vista da engenharia geotécnica. Em particular, o comportamento de um cais para submarinos nucleares, projetado para ser construído no litoral do estado do Rio de Janeiro - Brasil, é analisado considerando aspectos relacionados com o potencial de liquefação dinâmica e a resposta sísmica dos solos em termos de histórias de aceleração, espectros de resposta e deslocamentos permanentes. O modelo constitutivo UBCSAND foi usado para representar a resposta de liquefação de areais saturados sob carregamento cíclico e alguns programas computacionais (FLAC, SHAKE2000) foram empregados para calcular as respostas esperadas das geoestruturas.

Palavras – chave

Modelagem numérica; liquefação dinâmica em solos; resposta sísmica de geoestruturas.

Abstract

Huertas, Jackeline Rosemery Castañeda; Romanel, Celso (Advisor). **Procedures for nonlinear analysis prediction of seismic response of geostructures.** Rio de Janeiro, 2012. 348p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The study of the soil behaviour under seismic loading is of great importance for the design of geostructures situated in regions of high seismic activity such as in the Andean countries along the border of the South American tectonic plate. In Brazil, situated in the interior of this plate, where seismic events are less frequent and of the smaller magnitude, a detailed seismic design is necessary for some engineering works of high importance such as nuclear power plants. The main objective of this thesis is to investigate the seismic behaviour of geostructures, describing and discussing the several points that should be carefully considered by the designers under the geotechnical engineering standpoint. In particular, the behavior of a nuclear wharf planned to be built on the seashore of the state of Rio de Janeiro - Brazil, is analyzed considering aspects related to the potential of dynamic soil liquefaction and the seismic response of soils in terms of accelerations histories, response spectra and permanent displacements. The UBCSAND constitutive model was used to represent the liquefaction response of saturated sands under cyclic loading and some computational programs (FLAC, SHAKE2000) were used in order to calculate the expected response of the geostructures.

Keywords

Numerical model; soil dynamic liquefaction; seismic response of geostructures.

Sumário

1	Introdução	27
1.1	Abordagem desta pesquisa	27
1.1.1	Estudo de caso	31
1.2	Motivação e objetivos da tese	31
1.3	Organização da tese	33
2	Comportamento das Areias Sob Carregamento Cíclico	34
2.1	Introdução	34
2.2	Mecanismo da dilatação	36
2.3	Comportamento monotônico e cíclico das areias saturadas	40
2.3.1	Carregamento monotônico	42
2.3.2	Carregamento cíclico	49
2.4	Resistência	53
2.5	Rotação das tensões principais	55
2.6	Ensaio dinâmico para a obtenção das propriedades dinâmicas dos solos	60
3	Liquefação e Pós-Liquefação Dinâmica em Solos Saturados	64
3.1	Introdução à liquefação dinâmica	64
3.2	Parâmetros de estado na abordagem do estado crítico	67
3.3	Mecânica da Liquefação	71
3.3.1	Mecanismos de Início de Liquefação	72
3.3.1.1	Fluxo por liquefação	72
3.3.1.2	Mobilidade cíclica	74
3.3.2	Susceptibilidade à liquefação	76
3.4	Avaliação do início de liquefação	78
3.4.1	Caracterização baseada em ensaios de laboratório	85
3.4.2	Caracterização baseada em ensaios <i>In Situ</i>	87
3.4.2.1	Ensaio de penetração padrão (SPT)	89
3.4.2.2	Ensaio de penetração de cone (CPT)	92
3.4.2.3	Velocidade das ondas cisalhantes, v_s	94
3.4.3	Fator de segurança contra liquefação	97
3.5	Resistência residual mobilizada	98
3.6	Método simplificado de análise de liquefação para taludes de solos (Olson & Stark)	101
3.6.1	Análise de suscetibilidade à liquefação	104
3.6.2	Análise de iniciação de liquefação	104
3.6.3	Análise de estabilidade pós-liquefação	106
3.7	Análise de estabilidade pseudo-estática	107
3.7.1	Coefficiente sísmico, k	109
3.7.2	Parâmetros de resistência	112

3.7.3	Análise pós-sismo	113
3.7.4	Comentários finais	114
4	Aspectos da Análise Sísmica em Geoestruturas	116
4.1	Introdução	116
4.2	Conceitos básicos de sismicidade	116
4.2.1	Sismicidade e tectônicas das placas	117
4.2.1.1	Regiões intraplacas	118
4.2.1.2	Ondas sísmicas	120
4.2.1.3	Atenuação das ondas sísmicas	123
4.2.2	Sismos	124
4.2.2.1	Localização de um sismo	125
4.2.2.2	Grandeza de um sismo: magnitude e intensidade	126
4.2.2.3	Energia de um terremoto	129
4.2.3	Efeitos dos sismos	133
4.3	Movimento do terreno	133
4.3.1	Caracterização e estimativa dos parâmetros do movimento do terreno	133
4.3.2	Amplitude do movimento do terreno	134
4.3.3	Conteúdo de frequências	136
4.3.4	Duração do movimento	139
4.3.5	Relações de prognóstico para a estimativa dos parâmetros de movimento	140
4.4	Avaliação da ameaça sísmica	144
4.4.1	Identificação e caracterização da fonte sísmica	146
4.4.2	Sismo de magnitude máxima	148
4.4.3	Relações e intervalo de recorrência	148
4.4.4	Relações de prognóstico	150
4.4.5	Curva de ameaça sísmica	151
4.5	Efeitos do sítio local	153
4.6	Carregamento sísmico: espectros e sismos de projeto	156
4.6.1	Métodos para determinação de espectros de projeto	157
4.6.2	Métodos para geração de acelerogramas artificiais	164
4.7	Processamento de registros sísmicos	168
4.8	Caracterização das propriedades dinâmicas: módulo de cisalhamento e razão de amortecimento	171
4.8.1	Módulo cisalhante	172
4.8.2	Razão de amortecimento	177
4.9	Amortecimento	179
4.9.1	Amortecimento de Rayleigh	180
4.9.2	Amortecimento histerético	183
5	Métodos de Análise Sísmica	185
5.1	Aplicação dos métodos de análise sísmica	185
5.2	Análise de reposta sísmica do terreno <i>de campo livre</i>	186
5.2.1	Aproximação linear equivalente da resposta não-linear	189
5.2.2	Abordagem não-linear unidimensional	191
5.2.3	Análise de deconvolução e/ou convolução	193
5.3	Análises simplificadas de resposta sísmica por deslocamento	196
5.4	Análise sísmica não-linear	197
5.4.1	Método das diferenças finitas (FLAC)	198

5.4.2 Passo de tempo dinâmico	204
5.4.3 Considerações da modelagem dinâmica	208
5.4.4 Aferição das propriedades dinâmicas	213
5.4.5 Fator de segurança pós-sismo	215
5.5 Comentários finais	216
6 Modelos Constitutivos Cíclicos para Solos Arenosos	218
6.1 Relações tensão-deformação para solos	218
6.2 Uma breve descrição dos elementos básicos da teoria elasto-plástica incremental	219
6.3 Modelo UBCSAND (Byrne <i>et al.</i> , 1995)	226
6.3.1 Descrição das assunções e características do modelo	227
6.3.2 Resposta elástica	230
6.3.3 Resposta plástica	231
7 Estudo de Caso: Análise dos Solos de Fundação e Maciço de Enrocamento para um Cais Nuclear	235
7.1 Local e condições da região em estudo	235
7.1.1 Aspectos geológicos e tectônicos	237
7.2 Análise do nível de ameaça sísmica	238
7.3 Descrição do sismo de projeto adotado nas análises sísmicas	240
7.4 Análise de deconvolução do sismo de projeto	242
7.5 Processamento do registro sísmico	243
7.6 Verificação da resposta do terreno <i>de campo livre</i>	245
7.7 Análise de liquefação sísmica	247
7.8 Análise de resposta sísmica	250
7.8.1 Modelo constitutivo	253
7.8.2 Amortecimento	253
7.8.3 Parâmetros geotécnicos	254
7.8.4 Condições de contorno na modelagem numérica com o programa FLAC	254
7.8.5 Resultados das análises	258
7.8.5.1 Seção A-A'	258
7.8.5.2 Seção C-C'	280
8 Conclusões e Sugestões	299
8.1 Conclusões	299
8.2 Sugestões	301
Referências Bibliográficas	303
A Anexo	319
A.1. Procedimento simplificado para a avaliação de tensões induzidas por terremotos	319
A.2. Cálculo da resistência N_{1-60} corrigida para areia limpa (teor de finos)	322
A.2.1. Youd <i>et al.</i> (2001)	323
A.2.2. Idriss & Boulanger (2004)	323
A.2.3. Outras correções aplicadas à resistência à penetração, N1-60	324
A.3. Ajustes e correções na resistência à penetração do cone	325
A.3.1. Ajuste e normalização da resistência de ponta do cone	326
A.3.2. Correção por areia limpa da resistência de ponta	326
A.3.3. Correção da resistência à penetração do cone por camadas de solos fofos (ou moles)	329

A.4. Fatores de escala de magnitude de terremotos (MFS)	330
A.5. Procedimentos alternativos dos fatores de correções K_σ , (por pressões de sobrecarga), K_α (por tensão cisalhante estática)	334
A.5.1. Fator de correção K_σ	334
A.5.2. Fator de correção K_α	337
A.6. Razão de poropressão	339
B Anexo	341
B.1. Coeficientes das equações de atenuação do Toro <i>et al.</i> (1997)	341
B.2. Resumo de leis de atenuação para diferentes sítios	343
C Anexo	344
C.1. Geração de sismos artificiais no domínio do tempo	344

Lista de Figuras

Figura 2.1- (a) Cisalhamento de camadas de materiais, de discos circulares, fracamente empacotados; (b) Cisalhamento de camadas de materiais, de discos circulares, densamente empacotados; (c) mudança de volume durante o cisalhamento de camadas de materiais, de discos circulares, fracamente e densamente empacotados. (Wood, 2004).	36
Figura 2.2- Superfícies de cisalhamento inclinadas causando dilatação ψ e consequentes ângulos de atrito mobilizado ϕ_m . (Wood, 2004).	37
Figura 2.3- Relações entre razão de tensões normal e cisalhante, $\eta = t/\sigma'$, e razão de incremento de deformações, $-(\Delta\epsilon_v/\Delta\gamma)$, para a areia de Ottawa em ensaios de cisalhamento simples drenado (dados básicos obtidos a partir de Vaid <i>et al.</i> , 1981) (Puebla, 1999).	39
Figura 2.4- Trajetórias de tensões para carregamento drenado monotônico com p' e carregamento não drenado (cisalhamento a volume constante) de areias saturadas fofas-a partir do-estado crítico e densas-a partir do-estado crítico (Idriss & Boulanger, 2008).	42
Figura 2.5- Resposta ao carregamento monotônico de amostras fofas (DR=38%) e densas (DR=100%) da areia de do Rio Sacramento em ensaios de compressão triaxial drenado, como se mostra nos gráficos (a) e (b) respectivamente (Idriss & Boulanger, 2008, adaptado de Lee & Seed, 1967).	44
Figura 2.6 - Classificação de comportamento não drenado de solos arenosos baseados em fenômenos de dilatação e amolecimento (Ishihara, 1996).	45
Figura 2.7- Reposta ao carregamento monotônico da areia de Toyoura saturada em ensaios de compressão triaxial CIU (Ishihara, 1993).	47
Figura 2.8- Estado quase permanente (QSS) e comportamento quase permanente de areia Toyoura muito fofa em ensaios de compressão triaxial CIU (Ishihara 1993).	48
Figura 2.9 - Mecanismo de geração de poropressão durante o carregamento (Idriss & Boulanger, 2008)	50
Figura 2.10 - Resposta da areia de Sacramento ao carregamento triaxial cíclico não drenado (ensaios de Boulanger & Truman, 1996)	51
Figura 2.11 - Resultados de ensaios de rotação contínua: (a) variação da direção das tensões principais e razão de tensões, e (b) deformação acumulada principal maior em areias densas (Arthur <i>et al.</i> , 1980).	55
Figura 2.12 - Resultados de ensaios de rotação de tensões em areia fofa de Toyoura (Ishihara & Towhata, 1983).	56
Figura 2.13 - Resposta das trajetória de tensões e deformações não drenada da areia de Rio Fraser testado ao longo das diferentes trajetórias de tensões em um <i>torsional hollow cylinder</i> (after Vaid & Eliadorani, 1998)	58

Figura 2.14 – Coeficiente de poropressão versus direções da tensão principal maior (Kumruzzaman & Yin (2010).	59
Figura 2.15– Métodos sísmicos para a determinação de perfis da rigidez do solo com a profundidade (McDowell <i>et al.</i> , 2002).	63
Figura 3.1 – Esquema de resposta não drenada de um solo arenoso, contrativo e saturado (Olson, 2001).	73
Figura 3.2 – Três casos de mobilidade cíclica mostrado no espaço de trajetória de tensões: (a) sem reversão de tensões e tensões cisalhantes cíclicas e estáticas combinadas menores do que a resistência no estado permanente; (b) sem reversão de tensões e períodos temporários onde as tensões cisalhantes cíclicas e estáticas combinadas excederam a resistência no estado permanente; e (c) com reversão de tensões e tensões cisalhantes estáticas e cíclicas combinadas menores do que a resistência no estado permanente (Kramer, 1996).	75
Figura 3.3 – Razão de tensões cíclicas requerida para alcançar o início da liquefação ($r_u=100\%$), de ensaios da mesa vibratória por De Alba <i>et al.</i> (1976) (adaptado por Idriss & Boulanger, 2008).	82
Figura 3.4– (a) Definição do índice de parâmetro de estado relativo, ζ_R (Boulanger, 2003), (b) CRR versus ζ_R para amostras reconstruídas da Areia de Fraser Delta (Boulanger, 2003) (Idriss & Boulanger, 2008).	84
Figura 3.5– (a) Curva base para areias limpas para ensaios SPT, para magnitude de terremotos de 7,5 com dados extraídos de casos históricos com ocorrência de liquefação (Youd <i>et al.</i> , 2001, modificado a partir de Seed <i>et al.</i> , 1985); (b) Casos Históricos de SPT para solos sem coesão com $FC \geq 35\%$, curvas da NCEER (1997) e a recomendada por Idriss & Boulanger (2004).	90
Figura 3.6– Curvas recomendadas para o cálculo da CRR para terremotos de magnitude $M_w=7,5$ elaboradas a partir de ensaios CPT baseadas em dados de liquefação (NCEER 1997).	93
Figura 3.7 – Curvas recomendadas para cálculo da CRR a partir de medidas de v_{s1} para solos limpos não cimentados baseados em dados históricos (Andrus & Stokes, 2000).	96
Figura 3.8 – Zona esperada a ser liquefeita determinada pela comparação das tensões cíclicas induzidas por terremotos, com as resistências cíclicas do solo (Idriss & Boulanger, 2008).	98
Figura 3.9– Características do comportamento não drenado de areias fofas (Ishihara, 1996).	100
Figura 3.10– Análise de suscetibilidade à liquefação (Olson, 2003)	104
Figura 3.11 – Razão de resistência de escoamento para análise de iniciação de liquefação (Olson, 2003)	105
Figura 3.12 – Razão de resistência liquefeita para análise pós- liquefação (Olson, 2003).	106
Figura 3.13– Conceitualização do método pseudo-estático (Franklin & Chang, 1977)	108
Figura 3.14– Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos de classe B (Rocha) (NRB 15421/2006).	112

Figura 4.1- A Litosfera, a camada mais superficial da Terra, está dividida em grandes porções, chamadas de PLACAS LITOSFÉRICAS (USGS, Washington, 2001).	117
Figura 4.2 – Esquematização de movimentos interplacas	118
Figura 4.3 – Sismicidade natural do Brasil – Universidade de Brasília.	119
Figura 4.4 - Principais ondas sísmicas com propósitos de engenharia (Kuroiwa, 2002), <i>apud</i> Gamarra (2009).	121
Figura 4.5 – Reflexão e Refração: (a) de ondas P ou SV; (b) de ondas SH (Adaptado de Kramer, 1996).	122
Figura 4.6 – Decréscimo de amplitude de ondas sísmicas com a distância (r) a partir da fonte (amortecimento geométrico), (Woods, 1968) <i>apud</i> Towhata (2008).	124
Figura 4.7 – Elementos para descrição da localização de um sismo	125
Figura 4.8 – Ilustração da relação entre magnitude e a escala de saturação de várias magnitudes: M_W (Magnitude do Momento Sísmico), M_L (Magnitude Local Richter), M_S (Magnitude de ondas superficiais), m_b (Magnitude de ondas de corpo de período curto), m_B (Magnitude de ondas de corpo de período longo) e M_{JMA} (Magnitude da Agência Meteorológica Japonesa) (Kramer, 1996).	127
Figura 4.9 – Energia relativa de vários fenômenos humanos e naturais (Johnston, 1990) <i>apud</i> Kramer (1996).	130
Figura 4.10 – Principais fatores que influenciam os efeitos dos sismos: fonte, trajetória percorrida do sismo e características do sítio. Ponto A equivalente a solo, amplificando a baixas frequências, e ponto B, equivalente a rocha, amplificando a altas frequências.	154
Figura 4.11 – Espectros de resposta de projeto independentes do tipo de solo (Almeida, 1997).	158
Figura 4.12 – (a) Espectro de resposta da componente N-S do terremoto El Centro (18-maio-1940) e (b) Espectro de resposta dependente de a_{max} , v_{max} e d_{max} . (Clough & Pezzen, 1993).	159
Figura 4.13 – Espectros de resposta de projeto (S_a/a_{gs0}) em função do período $T(s)$ da NBR 15421.	161
Figura 4.14 – Espectros de resposta de projeto suavizado (Adaptado de Almeida 1997).	163
Figura 4.15 - Geração artificial de movimentos de terreno (adaptado de Kramer, 1996).	166
Figura 4.16 – Exemplo de uma função sintética no tempo gerada no domínio da frequência (modificado de Kramer, 1996).	167
Figura 4.17 – Ajuste de Linha base. (after Carreño <i>et al.</i> ,1999).	170
Figura 4.18 – Módulo de cisalhamento secante, G_{sec} , e módulo de cisalhamento tangente, G_{tan} . (Kramer, 1996).	172
Figura 4.19 – Curvas de redução de módulos para solos granulares finos de diferentes plasticidades (After Vucetic & Dobry, 1991).	176
Figura 4.20 – Variação da razão de amortecimento de solos granulares finos com a amplitude de deformação cisalhante cíclica e o índice de plasticidade (After Vucetic & Dobry,1991).	178

Figura 4.21 – Variação da razão de amortecimento crítica normalizada com a frequência angular. Nesta figura, a linha azul, $\alpha=0$, a linha vermelha, $\beta=0$, e a linha verde, o total.	181
Figura 4.22– Relações entre o laço histerético e a razão de amortecimento. (Kramer, 1996)	183
Figura 5.1 – Esquema para a nomenclatura da resposta do terreno: (a) solo sobrejacente; (b) sem solo sobrejacente (Kramer, 1996).	188
Figura 5.2 – Processo para obter a resposta do terreno em um perfil como o esquematizado em (a). Em (b) o registro sísmico de entrada na rocha, (c) é a transformada de Fourier do sismo de entrada. Em (d) a função de transferência. A série de Fourier do sismo na superfície do terreno foi calculada com o produto da função de transferência e série de Fourier do sismo na rocha. A inversão da série de Fourier produz a história no tempo das acelerações na superfície do terreno, mostrado em (e) (Kramer, 1996).	190
Figura 5.3 – Processo de deconvolução e amplificação (convolução) para registros de terremotos.	193
Figura 5.4 – Sismo de entrada para análises numéricas (Mejia & Dawson, 2006).	194
Figura 5.5 – Processo de deconvolução condições de contorno a) base rígida e, b) base flexível (Mejia & Dawson, 2006)	196
Figura 5.6 – Ciclo básico de cálculo explícito (Cundall, 2009).	199
Figura 5.7 – Elemento básico da malha de diferenças finitas: (a) elementos quadrangulares sobrepostos; (b) elementos triangulares típicos com vetores de velocidade; e, (c) vetor de forças nodais (Cundall, 2009).	200
Figura 5.8 – Modelagem do contorno silencioso implementado no FLAC (adaptado por Loayza (2009) de Cundall (2009).	211
Figura 5.9 – Malha de campo livre (<i>free-field</i>) utilizada na avaliação dinâmica no FLAC (adaptado por Loayza (2009).	212
Figura 5.10 – Condições de contorno aplicadas à geoestruturas no <i>FLAC</i> (adaptado por Loayza (2009).	213
Figura 6.1– Superfície de escoamento de forma de uma bala como proposta por Drucker <i>et al.</i> (1955) para condições triaxiais.	221
Figura 6.2 – Lei de fluxo usada no UBCSAND. Deformações cisalhantes induzem contração volumétrica sob ϕ_{cv} ou ϕ_{pt} ; e sobre esta, induzem dilatação volumétrica (Naesgaard, 2011).	228
Figura 6.3 - Relação Hiperbólica Tensão-Deformação (adaptado de Park, 2005).	230
Figura 7.1 - Mapa Tectônico da região de estudo, mostrando as principais feições tectônicas da região Sudeste do Brasil e áreas vizinhas. PEM representa a Província Estrutural Mantiqueira, CSF o Craton de São Francisco, CDB o Cinturão de Dobramentos Brasília e BP a Bacia do Paraná. O triângulo vermelho representa o local de interesse do presente projeto. A legenda das unidades geológicas não se encontra aqui referenciado, recomenda-se procurar o mapa elaborado por Schobbenhaus <i>et al.</i> (1984).	236

Figura 7.2 - Mapa da região que abrange a AII, mostrando as principais unidades tectônicas. Simplificado por Heilbron <i>et al.</i> (2000), Ferrari (1990) e Mohriak & Barros (1990). Ferrari (2001).	238
Figura 7.3 – Acelerograma do sismo de projeto SH-2.	241
Figura 7.4 – Comparação do espectro de projeto do sismo SH-2 e da Norma Brasileira NBR15421/2006.	241
Figura 7.5 – Acelerograma do sismo SH-2, com deconvolução em rocha, aplicado em base flexível situada na cota $y = -60\text{m}$, corrigido por linha base e filtro de frequências passa-baixa com corte em $f_c = 20\text{ Hz}$.	242
Figura 7.6 – Comparação dos espectros de resposta das acelerações horizontais antes e após a filtragem das acelerações horizontais superiores a 20 Hz.	244
Figura 7.7 – Espectro de Fourier das acelerações.	244
Figura 7.8 – Espectro de Fourier das velocidades.	245
Figura 7.9 – Esquema de localização dos furos de sondagem na região do enrocamento.	246
Figura 7.10 – Amplificação do sismo na localização da NSP-35 para o sismo SH-2.	247
Figura 7.11 – Amplificação do sismo na localização da SM-63 para o sismo SH-2.	247
Figura 7.12 – Planta de locação das seções A-A' e C-C'.	251
Figura 7.13 – Configuração geométrica e camadas de solo da seção A-A'	252
Figura 7.14 – Configuração geométrica e camadas de solo da seção C-C'	252
Figura 7.15 – Curvas experimentais (linha tracejada) e ajustadas numericamente (linha cheia) para a variação da razão de módulos cisalhantes G/G_{\max} com a deformação cisalhante para o caso de areias (curva limite superior de Seed & Idriss, 1970), enrocamento (curva média de Seed <i>et al.</i> , 1986) e silte/argilas (curva limite superior de Sun <i>et al.</i> , 1988).	254
Figura 7.16 – Modelo discreto da seção A-A', formado por 11.023 elementos (zonas).	258
Figura 7.17 – Fatores de segurança estático do talude de enrocamento da seção A-A'.	259
Figura 7.18 – Distribuição dos excessos de poropressão no tempo $t = 15\text{s}$ (final do sismo) na seção A-A'. (unidade Pa).	261
Figura 7.19 – Distribuição dos valores da razão de poropressão ao final do sismo ($t = 15\text{s}$) na seção A-A'.	261
Figura 7.20 – Indicação de áreas (em vermelho) onde $r_u \geq 1$ ao longo dos 15s do sismo.	261
Figura 7.21 – Indicação de áreas (em vermelho) onde $r_u \geq 1$ ao final do sismo ($t = 15\text{s}$).	261
Figura 7.22 – Localização dos pontos de controle para análise da variação no tempo da razão de poropressão r_u na seção A-A'.	262
Figura 7.23 – Distribuição dos deslocamentos horizontais ao final do sismo ($t = 15\text{s}$). Unidades em m.	263
Figura 7.24 – Malha distorcida da seção A – A' ao final do sismo ($t = 15\text{s}$).	263

Figura 7.25 – História da razão de poropressão r_u durante a ocorrência do sismo em pontos de controle na seção A-A'.	264
Figura 7.26 – Pontos de controle das histórias de aceleração horizontal, espectros de resposta e histórias de deslocamento horizontal na seção A-A'.	265
Figura 7.27– Histórias de aceleração horizontal em pontos de controle situados na superfície da seção A-A'.	268
Figura 7.28 – Histórias de aceleração horizontal em pontos situados no interior do maciço de solo e na base do modelo da seção A-A'.	269
Figura 7.29 – Espectros de resposta da aceleração horizontal em diferentes pontos de controle situados na superfície da seção A-A'.	270
Figura 7.30 – Espectros de resposta da aceleração horizontal em diferentes pontos de controle situados no interior do maciço de solo e na interface solo-rocha.	271
Figura 7.31 – Localização das colunas de solo para comparação dos resultados obtidos com os programas SHAKE e FLAC na seção A-A'.	272
Figura 7.32 – Comparação dos espectros de resposta calculados com os programas SHAKE e FLAC na seção A-A'.	272
Figura 7.33 – Histórias de deslocamento horizontal em diferentes pontos de controle situados na superfície da seção A-A'.	273
Figura 7.34 – Histórias de deslocamento horizontal em diferentes pontos de controle situados no interior do maciço de solo (seção A-A').	274
Figura 7.35 – Distribuição de deslocamentos horizontais no tempo $t = 6.5s$ (unidade m).	275
Figura 7.36 – Distribuição de deslocamentos horizontais no tempo $t = 15s$ (unidade m).	275
Figura 7.37 – Histórias de tensão e de poropressão no ponto H (convenção de sinais da Resistência dos materiais).	275
Figura 7.38 - História de deformação cisalhante máxima em diferentes pontos de controle da seção A-A'.	276
Figura 7.39 – Distribuição das deformações cisalhantes máximas no tempo $t = 6.5s$	277
Figura 7.40 – Distribuição das deformações cisalhantes máximas no tempo $t = 15s$.	277
Figura 7.41 – Posição dos eixos das estacas E-1, E-2, E-3, E-4, E-5 com pontas situadas na cota $y = -42m$ (seção A-A').	277
Figura 7.42 - Deslocamentos horizontais ao longo dos eixos das “estacas”, relativos às pontas situadas na cota $y = -42m$, ao final do sismo (deslocamentos permanentes) e deslocamentos máximos durante o sismo. Os maiores deslocamentos na parte superior da “estaca 1” são devidos ao movimento do talude de enrocamento. (Figura 7.44).	278
Figura 7.43 – Modelo discreto da seção C-C', formado por 11.325 elementos (zonas).	280
Figura 7.44 – Fatores de segurança estática do talude de enrocamento da seção C-C'	280
Figura 7.45 – Distribuição dos excessos de poropressão no tempo $t = 15s$ (final do sismo) na seção C-C'. (unidade Pa)	281

Figura 7.46 – Distribuição da razão de poropressão no tempo $t = 15s$ (final do sismo) na seção C-C'.	281
Figura 7.47 – Indicação de áreas (em vermelho) onde $r_u \geq 1$ ao final do sismo ($t = 15s$).	281
Figura 7.48 – Indicação de áreas (em vermelho) onde $r_u \geq 1$ ao longo dos 15s do sismo.	281
Figura 7.49 – Localização dos pontos de controle para acompanhamento da variação da razão de poropressão r_u no intervalo $0 \leq t \leq 15s$	282
Figura 7.50 – História da razão de poropressão r_u durante a ocorrência do sismo em pontos de controle da seção C-C'	283
Figura 7.51 – Distribuição do deslocamento horizontal ao final do sismo ($t = 15s$). (unidades em m)	284
Figura 7.52 – Malha distorcida da seção C-C' ao final do sismo ($t = 15s$).	284
Figura 7.53 – Pontos de controle das histórias de aceleração horizontal, espectros de resposta e histórias de deslocamento horizontal na seção C-C'.	286
Figura 7.54 – Histórias de aceleração horizontal em pontos de controle situados na superfície da seção C-C'.	287
Figura 7.55 – Histórias de aceleração horizontal em pontos de controle situados no interior do maciço de solo da seção C-C'.	288
Figura 7.56 – Espectros de resposta em diferentes pontos de controle situados na superfície da seção C-C'.	289
Figura 7.57 – Espectros de resposta em diferentes pontos de controle situados no interior do maciço de solo e na interface solo-rocha da seção C-C'.	290
Figura 7.58 – Localização das colunas de solo para comparação dos resultados obtidos com os programas SHAKE e FLAC na seção C-C'.	291
Figura 7.59 – Comparação dos espectros de resposta calculados com os programas SHAKE e FLAC na seção C-C'.	291
Figura 7.60 – Histórias de deslocamento horizontal em diferentes pontos de controle na superfície da seção C-C'.	292
Figura 7.61 – Histórias de deslocamento horizontal em diferentes pontos de controle no interior do maciço de solo da seção C-C'.	293
Figura 7.62 – Distribuição de deslocamentos horizontais no tempo $t = 7s$ (unidade m).	294
Figura 7.63 – Distribuição de deslocamentos horizontais no tempo $t = 15s$ (unidade m).	294
Figura 7.64 – Histórias de tensão e de poropressão no ponto H (convenção de sinais da Resistência dos Materiais).	294
Figura 7.65 - Histórias de deformações cisalhantes máximas em diferentes pontos de controle da seção C-C'.	295
Figura 7.66 – Distribuição das deformações cisalhantes máximas no tempo $t = 7s$	296
Figura 7.67 – Distribuição das deformações cisalhantes máximas no tempo $t = 15s$	296
Figura 7.68 – Posição dos eixos das “estacas” E-1, E-2, E-3, E-4, E-5 com pontas situadas na cota	296

Figura 7.69 - Deslocamentos horizontais ao longo dos eixos das “estacas”, relativos às pontas situadas na cota $y = -28\text{m}$, ao final do sismo (deslocamentos permanentes) e deslocamentos máximos durante o sismo. Nota-se que os deslocamentos na parte superior do eixo da “Estaca” 1 são devidos aos movimento do talude (Figura 57).	297
Figura A. 1- Número de ciclos de tensão uniforme equivalente, N_{eq} , para terremotos de diferentes magnitudes (After Seed <i>et al.</i> , 1975).	320
Figura A. 2 – Variação do coeficiente de redução de tensões, r_d , com a profundidade e magnitude de terremoto (Idriss, 1999).	321
Figura A. 3 – Fator de redução para a estimativa da variação das tensões cisalhantes cíclicas com a profundidade sob a superfície do terreno ou sob taludes suavizados (<i>after</i> Seed & Idriss, 1971)	322
Figura A. 4 – Fator de correção das características do grão, K_c , para determinação da resistência CPT equivalente a areias limpas (Robertson & Wride, 1998).	327
Figura A. 5 – Gráfico sobre o tipo de comportamento baseado em resultados de CPT proposto por Robertson (1990).	328
Figura A. 6 – Fator de correção para camadas finas, K_H , para a determinação da resistência do CPT para camadas de espessura equivalente (Robertson & Fear, 1995).	330
Figura A. 7 – Fatores de escala da magnitude derivados de varios investigadores (reproduzido por Youd & Noble, 1997 e adaptado por Youd <i>et al.</i> , 2001)	332
Figura A. 8 – Curvas recomendadas por Hynes & Olsen (1999) para estimativas mínimas e/ou conservativas de K_σ no caso de areias limpas, siltosas e pedregulhos para serem o usadas na prática da engenharia (Youd <i>et al.</i> (2001).	336
Figura A. 9 – Relações de K_σ derivadas a partir de relações de ζ_R . Figura do dolo esquerdo de Boulanger & Idriss, 2004), e figura do lado direito de Idriss & Boulanger (2003).	337
Figura A. 10 – Variação do fator de correção, K_α , com a razão de tensões normal/cisalhante iniciais. (<i>after</i> Seed & Harder, 1990. H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings, vol. 2) (adaptado por Kramer, 1996).	338
Figura A. 11 – Taxa de geração de poropressões de ensaios de cisalhamento simples cíclico. A linha tracejada foi gerada a partir da equação (A6.1) com $\alpha=0.7$ (<i>After</i> De Alba <i>et al.</i> 1975)	340
Figura A. 12 – Razão de excesso de poropressão versus FS_L para materiais em condições sob a superfície do terreno, dados obtidos a partir de ensaios de laboratório (<i>after</i> Marcuson <i>et al.</i> , 1990).	340
Figura C. 1 – Acelerograma com duração de 15s gerado a partir da FDEP (Figueiredo, 2004).	345
Figura C. 2 – Função Intensidade para um sismo com duração total de 15s (Figueiredo, 2004).	346

Figura C. 3 – Acelerograma após aplicado a Função Intensidade e correção de Linha base (Figueiredo, 2004).	347
Figura C. 4 - Diagrama de blocos que descreve o procedimento de geração de sismos artificiais (Notas de aula da disciplina CIV2122- Tópicos Especiais em Dinâmica de Estruturas, PUC-Rio, 2007).	348

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Alguns eventos importantes de deformação e liquefação induzida por terremotos. (adaptado e atualizado de Beaty, 2001)	29
Tabela 3.1 – Valores de Fatores de correção para a CRR, c_r (adaptado de Kramer, 1996)	86
Tabela 3.2 – Comparação das vantagens e desvantagens dos vários ensaios de campo para avaliação da resistência à liquefação (Youd <i>et al.</i> 2001)	88
Tabela 3.3 – Coeficientes sísmicos (horizontais) recomendados (Melo & Sarma, 2004)	111
Tabela 3.4 – Definição das zonas sísmicas no Brasil (NBR 15421/2006)	111
Tabela 4.1 – Velocidade das ondas sísmicas.	122
Tabela 4.2 – Comparação entre as escalas de Richter e Mercalli modificada.	128
Tabela 4.3 – Coeficientes j da lei de atenuação de Joyner & Boore (1988) para a Equação 4.16 (<i>apud</i> Kramer, 1996)	142
Tabela 4.4 - Definição de categorias do terreno pela NEHRP (Anbazhagan <i>et al.</i> 2007)	155
Tabela 4.5 – Classe de terreno usada na Norma Brasileira NBR 15421 (1996).	156
Tabela 4.6 - Fatores de Amplificação sísmica no solo usados na NBR 15421.	162
Tabela 4.7 – Exponente da razão de pre-adensamento, k (Kramer, 1996).	173
Tabela 4.8 – Estimação de $K_{2,max}$ (Kramer, 1996).	174
Tabela 4.9 – Valores de G_{max}/S_u^a (Kramer, 1996).	174
Tabela 4.10 – Relações empíricas de correlação entre G_{max} e parâmetros de ensaios <i>in situ</i> (modificado a partir de Kramer, 1996).	174
Tabela 4.11 – Efeitos das condições de carregamento e ambientais sobre os módulos de cisalhamento máximo, razão de módulos e razão de amortecimento de solos normalmente adensados e moderadamente sobreadensados (adaptado de Kramer, 1996).	175
Tabela 6.1 – Comparação de modelos plásticos típicos para areias sob carregamentos cíclicos e suas potencialidades (adaptado de Park, 2005).	225
Tabela 7.1 – Características dos sismos artificiais gerados pela empresa EGT Engenharia Ltda.	240
Tabela 7.2 – Amplificação do terreno.	246
Tabela 7.3 - Modelos constitutivos e parâmetros dos materiais da seção A-A'	256
Tabela 7.4- Modelos constitutivos e parâmetros dos materiais da seção C-C'	257
Tabela 7.5 – Valores máximos de aceleração horizontal calculados com os programas SHAKE e FLAC para a seção A-A'.	266

Tabela 7.6 - Deslocamentos horizontais relativos à ponta das “estacas”, ao longo dos respectivos eixos, ao final do sismo (deslocamentos permanentes) e deslocamentos máximos durante o sismo na seção A-A’	279
Tabela 7.7 – Valores máximos de aceleração horizontal calculados com os programas SHAKE e FLAC para a seção C-C’.	285
Tabela 7.8 - Deslocamentos horizontais relativos à ponta das “estacas”, ao longo dos respectivos eixos, ao final do sismo (deslocamentos permanentes) e deslocamentos máximos durante o sismo na seção C-C’.	298
Tabela A. 1– Correlação do SPT (Modificado de Skempton, 1986) por Robertson & Wride (1998) (Youd <i>et al.</i> 2001)	324
Tabela A. 2 – Valores de fatores de escala da magnitude definidos por vários investigadores (modificado de Youd <i>et al.</i> , 2001)	331
Tabela B. 1 – Coeficientes das equações de atenuação	341
Tabela B. 2 – Valores da Incertezas aleatórias dependentes da magnitude ($\sigma_{a,modelo+\Delta\sigma}$) para magnitudes críticas.	342
Tabela B. 3 – Valores da Incertezas aleatórias dependentes da distância ($\sigma_{a,profundidade+Q+\kappa}$) para distâncias críticas.	342
Tabela B. 4- Leis de atenuação para diferentes sítios (Abrahamson, Norman A. e Shedlock, Kaye M., "Overview", Seismological Research Letters, 68-1, 1997)	343

Lista de Símbolos

a	Aceleração
ACU	Ensaio triaxiais cíclicos não drenados adensados anisotropicamente
BPT	Ensaio de penetração Becker
c	Coesão
C	Matriz de amortecimento
C_B	Fator de correção por diâmetro do furo de sondagem do ensaio SPT
C_E	Fator de correção por energia do martelo do ensaio SPT
c_n	Amplitude do enésimo harmônico das séries de Fourier
C_N	Fator de correção por sobrecarga
C_R	Fator de correção por comprimento da haste
C_S	Fator de correção por amostradores com ou sem camisa
CIU	Ensaio de compressão triaxial adensados isotropicamente
CPT	Ensaio de penetração de cone
CSL	Linha do estado crítico
CSR	Razão de tensões cíclicas ou demanda sísmica
CRR	Razão de resistência cíclica ou resistência à liquefação do solo
CSW	Análise ondas de superfície contínuas
D	Relação tensão-dilatância
d_c	Diâmetro do cone
DR	Densidade relativa
dx/dy	Inclinação de curva
E	Módulo de Elasticidade
E	Energia do sismo
\bar{E}_r	Módulo tangencial da curva de descarregamento unidimensional
e	Índice de vazios
e_{ss}	Índice de vazios na condição de estado permanente
FC	Teor de finos
f_c	Frequência de esquina
f_{max}	Frequência de corte
$F_{M(m)}$	Função densidade de probabilidade de magnitude m
FS	Fator de segurança ($FS_{estático}$)
FS_L	Fator de segurança contra a liquefação
FS_{flow}	Fator de segurança contra a liquefação pós-liquefação
g	Aceleração gravitacional ou gravidade
G	Módulo de cisalhamento
G_i^e	Módulo de cisalhamento elástico
G_i^p	Módulo de cisalhamento plástico
G_{mn}	Módulo de cisalhamento tangente inicial máximo para o ciclo n
G_{mo}	Módulo de cisalhamento tangente inicial máximo
$G_{(\omega)}$	Espectro de potência ou função densidade espectro de potência
H_1, H_2, H_3, H_4	Constantes

I_c	Indicador do tipo de comportamento do solo para o ensaio CPT
$I_A(t)$	Função intensidade
ICD	Ensaio triaxiais de compressão isotrópica drenada
k	Permeabilidade intrínseca ou coeficiente de mobilidade
k	Coeficiente sísmico
k_H	Condutividade Hidráulica
K_H	Fator de correção do ensaio CPT para camadas
K	Parcela de amortecimento proporcional à rigidez
K	Módulo de compressão volumétrica
K_c	Fator de correção do ensaio CPT por características de grãos
K^e	Módulo de deformação volumétrica na condição elástica
K_o	Coeficiente de empuxo em repouso
K_c	Coeficiente de empuxo em condições de carregamento anisotrópico
K_w	Módulo de compressão volumétrica da água
k_2	Constante
$K_{2,max}$	Parâmetro utilizado para estimar o módulo de cisalhamento
K_m	Constante
K_α	Fator de correção por tensão cisalhante estática
K_σ	Fator de correção por sobrecarga
K^e_G	Número do módulo de cisalhamento na condição elástica
L	Onda Love
M	Parcela de amortecimento proporcional à massa
$[M]$	Matriz de massa
M	Módulo tangente restrito da tensão efetiva
MASW	Análise multicanais para ondas de superfície
MMI	Intensidade Mercalli Modificada
m_b	Magnitude das ondas de corpo de período curto
m_B	Magnitude das ondas de corpo de período largo
M_L	Magnitude local
M_S	Magnitude de ondas superficiais
M_w	Magnitude do momento sísmico
m_o	Magnitude mínima
m_{max}	Magnitude máxima
n	Porosidade
η	Razão de tensões mobilizadas
N_{BC}	Contagem do número de golpes do ensaio BPT
N_{corr}	Função de porcentagem de finos
N_{eq}	Número de ciclos de tensões uniformes equivalente
N_l	Número de ciclos necessários para o início da liquefação
N_m	Contagem do número de golpes do ensaio SPT medido no campo
N_{1-60}	Contagem do número de golpes do ensaio <i>SPT</i> normalizado
N_{1-60CS}	Contagem do número de golpes do ensaio <i>SPT</i> normalizado para areia limpa
OCR	Razão de pré-adensamento
p	Tensão total média
p'	Tensão efetiva média

P	Onda primária
P_a	Pressão atmosférica
$P_{(n)}$	Função do modelo de Poisson
q	Tensão de desvio
q_{cl}	Resistência à penetração da ponta do ensaio CPT
q_{CA}	Resistência à penetração da ponta do ensaio CPT para camadas rijas
q_{CB}	Resistência à penetração da ponta do ensaio CPT para camadas moles
q_{cl-Ncs}	Resistência de ponta do ensaio CPT para areias limpas normalizada
QSS	Estado quase permanente
R	Onda Rayleigh
r_d	Coefficiente de redução de tensão
r_u	Razão de poropressão (parâmetro do liquefação)
RMSA	Aceleração da raiz quadrada da média dos quadrados
S	Onda secundária ou de cisalhamento
SASW	Análise espectral para ondas de superfície
s_d	Resistência ao cisalhamento médio do solo liquefeito
SH	Onda cisalhante horizontal
SV	Onda cisalhante vertical
SPT	Ensaio de Penetração Padrão
SSL	Linha do estado permanente
s_{su}	Resistência ao cisalhamento no estado permanente
SV	Onda cisalhante vertical
$s_u(yield)$	Resistência não drenada mobilizada na condição de escoamento
$s_u(critical)$	Resistência não drenada crítica
$s_u(LIQ)$	Resistência ao cisalhamento na zona liquefeita
t	Tempo
T	Período do sistema
t_f	Duração do sismo
τ_s	Tensão cisalhante estática
τ_{cyc}	Tensão cisalhante cíclica
$\tau_{cyc,L}$	Resistência à liquefação cíclica (CRR)
$\ddot{u}_g(t)$	Aceleração do sismo
v_p	Velocidade da onda primária
v_s	Velocidade da onda de cisalhamento
v_{sl}	Velocidade da onda de cisalhamento corrigida por sobrecarga
W	Peso
x	Deslocamento relativo
\dot{x}	Velocidade relativa
Y	Parâmetro do movimento do terreno
z	Profundidade
σ'_{3c}	Tensão confinante efetiva menor
σ'_3	Tensão confinante efetiva
σ'_{vc}	Tensão efetiva vertical inicial
α	Razão de tensão cisalhante estática inicial
$\alpha_{\sigma e}$	Direção das tensões principais

ψ	Parâmetro de estado: Ângulo de dilatância
ξ	Amortecimento
ρ	Massa específica
λ	comprimento de onda
φ_m	Ângulo de atrito mobilizado
φ_{cv}	Ângulo de atrito sob volume constante
u_{excess}	Excesso de pororessão (também chamado de u_e)