Gladys Célia Hurtado Aquino

**Aspectos de Liquefação na Estabilidade de
Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre
sob Carregamento Sísmico**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Celso Romanel

Rio de Janeiro, junho de 2009

Gladys Célia Hurtado Aquino

**Aspectos de Liquefação na Estabilidade de
Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre
sob Carregamento Sísmico**

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

Prof. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Francisco Claudio Pereira de Barros

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

Zenón Aguilar Bardales

Facultad de Ingenieria Civil – UNI-Peru

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de junho de 2009

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

Gladys Célia Hurtado Aquino

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia (UNI-PERÚ) em 1997. Trabalhou na área de Mecânica dos Solos e de consultoria em geotecnia de mineração na empresas FIC-UNI e Vector, no Peru. Ingressou em 2006 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Hurtado Aquino, Gladys Célia

Aspectos de liquefação na estabilidade de pilha de lixiviação de minério de cobre sob carregamento sísmico / Gladys Célia Hurtado Aquino; orientador: Celso Romanel – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2009.

170 f. il; 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Tese. 2. Liquefação dinâmica. 3. Carregamento não-drenado. 4. Pilha de lixiviação. 5. Potencial de liquefação. 6. Modelo UBCSAND. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A minha família

Agradecimentos

A Deus, pela força para continuar.

A minha querida família: meus queridos pais Célia e Henri e minhas irmãs Gloria e Carmen pelo grande apoio, carinho e compreensão durante minha etapa de estudo. E a meus queridos sobrinhos José Enrique e Ariana por serem minha alegria e força de superação.

Ao professor Celso Romanel pelos conhecimentos aprendidos e pela orientação e guia durante esta pesquisa.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A meus amigos da Vector-Peru e Vector Engineering pelos conhecimentos com eles aprendidos e por terem fornecidos as informações e dados necessários para esta pesquisa.

A meus queridos e incondicionais amigos Verônica, Carlos, Humberto, Victor, Ronald, Jorge e Rafael, que nunca esqueceram de mim e me deram alento para continuar.

As minhas amigas e amigos que do Peru sempre me enviaram carinhos.

A meus amigos da Vila Jahuaribe - Piabetá, por se converterem em minha família brasileira.

A todos os amigos e companheiros de estudo no curso de pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial à

Rita secretária do programa de pós-graduação.

Aos professores do curso de Mestrado pela valioso ensinamento transmitido, meus sinceros agradecimentos.

Ao Brasil, pelo acolhimento.

Resumo

Hurtado Aquino, Gladys Célia; Romanel, Celso (Orientador). **Aspectos de Liquefação na Estabilidade de Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre sob Carregamento Sísmico**. Rio de Janeiro, 2009. 170p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O fenômeno de liquefação continua sendo um dos temas mais importantes, complexos e controversos da engenharia geotécnica, sendo a liquefação dinâmica, causada por terremotos, o maior contribuinte de risco sísmico urbano em vários países andinos. O movimento causa incrementos da poropressão que reduz a tensão efetiva e conseqüentemente a resistência ao cisalhamento de solos arenosos. O presente trabalho de pesquisa apresenta e compara algumas das metodologias existentes para a avaliação do fenômeno de liquefação dinâmica, variando desde o método semi-empírico de Seed-Idriss para estimativas do potencial de liquefação até a execução de algumas análises numéricas, no contexto dinâmico, através do programa computacional FLAC 2D v.5. Um estudo de caso, para uma comparação dos diversos procedimentos, consiste na análise dinâmica de uma pilha de lixiviação de minério de cobre, situada em região de atividade sísmica no Peru que, devido a problemas no sistema de drenagem interna, resultou com um alto nível de saturação que poderia colocar sua estabilidade em risco devido à possibilidade de liquefação sob carregamento sísmico. Dos resultados obtidos nessas análises, pode-se afirmar que o método semi-empírico de Seed-Idriss, para determinação do potencial de liquefação, compara-se bastante bem com modelos mais sofisticados baseados em análises dinâmicas empregando tanto o modelo constitutivo de Finn quanto o modelo constitutivo elastoplástico UBCSAND.

Palavras-chave

Liquefação dinâmica. Carregamento não-drenado. Pilha de lixiviação. Potencial de liquefação. Modelo UBCSAND. Estabilidade de taludes. Programa computacional FLAC.

Abstract

Hurtado Aquino, Gladys C. Hurtado; Romanel, Celso (Advisor). **Liquefaction Aspects on the Stability of a Copper Ore Heap Leach under Seismic Loading**. Rio de Janeiro, 2009. 170p. M.Sc. Thesis - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The phenomenon of liquefaction is still one of the most important, complex and controversial subjects of the geotechnical engineering, being the dynamic liquefaction, caused by earthquakes, the major contributor to urban seismic risks in several Andesian countries. The shaking increases the pore water pressure which reduces the soil effective stress and, therefore, the shear strength of sandy soils. This dissertation presents and compares some of the proposed methodologies to evaluate the phenomenon of dynamic liquefaction, ranging from the semi-empirical method of Seed-Idriss to estimate the liquefaction potential to the execution of some numerical analyses, within the dynamic context, through the computational program FLAC 2D v.5. The case study, for the comparison among the several procedures, consists of a copper ore heap leach, situated in a high seismic activity zone in Peru, that experimented high levels of saturation, due to problems in the internal drainage system, that could put in risk the stability of the leach pad to the possibility of liquefaction under seismic loading. From the results of such analyses, one can say that the semi-empirical method proposed by Seed-Idriss for the determination of the liquefaction potential compares quite well with outputs from more sophisticated numerical analyses based on dynamic studies that incorporate either the Finn's or the elasto-plastic UBCSAND constitutive models.

Keywords

Dynamic liquefaction. Undrained loading. Leach pad. Liquefaction potential. UBCSAND model. Slope stability. FLAC computer program.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	24
2 LIQUEFAÇÃO, REVISÃO DOS CONCEITOS	26
2.1. Fluxo por liquefação	26
2.2. Mobilidade cíclica	27
2.3. Revisão do comportamento das areias e sua modelagem	28
2.3.1. Aparelho de cisalhamento simples direto	28
2.3.2. Comportamento da areia sob cisalhamento simples	30
2.3.3. Redistribuição das poropressões de água	34
2.4. Resistência não drenada dos solos liquefeitos	35
2.4.1. Correlações baseados no SPT para determinar a resistência residual	37
3 AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE LIQUEFAÇÃO	40
3.1. Método semi-empírico para avaliar o potencial de liquefação baseado no SPT	42
3.1.1. Razão de tensões cíclicas (CSR)	43
3.1.2. Razão de resistências cíclicas à liquefação (CRR)	47
3.1.3. Fator de escala da magnitude MSF	52
3.1.4. Correções por altas pressões de sobrecarga K_σ e por tensões cisalhantes estáticas do depósito K_α	53
3.2. Modelos geotécnicos para a análise dinâmica do fenômeno de liquefação	56
3.2.1. Modelo de tensões efetivas para cálculo da liquefação - Finn & Martin 1977	56
3.2.1.1. Efeitos do endurecimento e poropressões	59
3.2.2. Modelo acoplado volume-cisalhamento cíclico e poropressões para areias - Byrne 1991	63
3.2.3. Modelo UBCSAND – Byrne, 1995	66
3.2.3.1. Comportamento elástico	68

3.2.3.2. Módulo cisalhante plástico	70
3.2.3.3. Incremento da deformação cisalhante e volumétrica plástica	72
3.2.3.4. Ângulo de atrito pico	73
3.2.3.5. Ângulo de atrito a volume constante	74
3.2.3.6. Parâmetro de forma de endurecimento cíclico, C_h	74
3.2.3.7. Limitações do modelo UBCSAND	75
 4 MODELAGEM COM O FLAC	 78
4.1. Considerações da modelagem dinâmica	79
4.1.1. Carregamento dinâmico e condições de contorno	80
4.1.2. Amortecimento mecânico	81
4.1.3. Transmissão da onda a través do modelo	84
4.2. Considerações da modelagem para análises de estabilidade	84
4.2.1. Determinação do fator de segurança no FLAC	86
 5 ANÁLISE DO FENÔMENO DE LIQUEFAÇÃO NUMA PILHA DE LIXIVIAÇÃO NO PERÚ	 88
5.1. Introdução	88
5.2. Recopilação dos estudos na pilha de lixiviação	91
5.2.1. Análise do perigo sísmico	91
5.2.2. Características do minério	92
5.2.3. Piezômetros	95
5.2.4. Investigações geotécnicas	95
5.2.4.1. Programa de campo	95
5.2.4.2. Ensaios de laboratório	99
5.2.5. Revisão dos recalques/movimentos dos marcos topográficos da pilha	100
5.3. Análise do potencial de liquefação da pilha de lixiviação	101
5.3.1. Análise de resposta sísmica	102
5.3.2. Potencial de liquefação	105
5.3.3. Conclusões da análise de potencial de liquefação	106
5.4. Análise de estabilidade de talude com o Slide e o FLAC	115
5.4.1. Propriedades de resistência para a análise de estabilidade	116
5.4.2. Modelagem com o Slide	120

5.4.2.1. Condições de análises	121
5.4.2.2. Resultados das análises	121
5.4.3. Modelagem com o FLAC	130
5.5. Análise dinâmica do fenômeno de liquefação na pilha de lixiviação	141
5.5.1. Modelagem	142
 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	 163
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 167

Lista de figuras

Figura 2.1 - Vulcão de areia.	28
Figura 2.2 - Deformação por Cisalhamento Simples.	29
Figura 2.3 - Hipótese de Razão de vazios crítico derivado dos testes de cisalhamento direto (Casagrande, 1976).	31
Figura 2.4 - Testes de cisalhamento simples drenados monotônicos nas areias de Ottawa a diferentes densidades e com a mesma tensão inicial (modificado de Vaid et al., 1981).	31
Figura 2.5 - Resultados dos testes de cisalhamento simples drenado cíclico na areia fofa e densa de River Fraser (Sriskandakumar, 2004).	32
Figura 2.6 - Dependência do ângulo de dilatação da densidade relativa e nível de tensões (de Vaid et al., 1981).	32
Figura 2.7 - Seção transversal idealizada do grupo de partículas mostrando as mudanças durante um carregamento cíclico (Youd, 1977)	33
Figura 2.8 - Razão de Resistência Cisalhante Residual S_r/σ'_{vo} , do solo liquefeito versus o N do SPT corrigido para uma areia limpa equivalente para σ'_{vo} menores que 400 kPa. Grupo 1: dados de SPT e geometria completos; Grupo 2 & 3: dados de SPT ou geometria incompletos (Idriss e Boulanger, 2007).	38
Figura 3.1 - Relações entre M_w e outras escalas de magnitude (NCEER, 1998).	47
Figura 3.2 - Casos históricos de SPT para areias limpas, a curva proposta pela NCEER (1997) e a curva recomendada por Idriss e Boulanger (2004).	49
Figura 3.3 - Curva de CRR com $(N_1)_{60}$ publicados desde 1979 para areias limpas.	49
Figura 3.4 - Casos Históricos de SPT para solos sem coesão com $FC \geq 35\%$, curvas da NCEER (1997) e a recomendada por Idriss % Boulanger (2004).	50
Figura 3.5 - Fator de Escala da Magnitude MSF propostos por vários	

pesquisadores.	52
Figura 3.6 - Definição do índice do parâmetro do estado relativo (após Boulanger 2003).	54
Figura 3.7 - Comparação das relações K_σ derivadas.	55
Figura 3.8 - Variações de K_α com o número de golpes do SPT $(N_1)_{60}$ para $\sigma'_{v0} = 1 \text{ atm}$	56
Figura 3.9 - Módulo Cisalhante médio a vários valores de Deformação Volumétrica.	60
Figura 3.10 - Comparação entre as curvas Tensão-Deformação predita e medida.	60
Figura 3.11 - Curva Deformação Volumétrica para ensaios de Cisalhamento Cíclico a Amplitude de Deformação Constante (Martin et al., 1975)	62
Figura 3.12 - Curva de Deformação Volumétrica Incremental (Martin et al., 1975)	62
Figura 3.13 - Curva Alternativa da Deformação Volumétrica dos dados de Martin, 1977.	65
Figura 3.14 - Deformação Volumétrica Incremental Normalizada.	66
Figura 3.15 - Modelo Clássico de Mohr-Coulomb.	67
Figura 3.16 - Modelo UBCSAND.	68
Figura 3.17 - Relação Hiperbólica Tensão-Deformação.	71
Figura 3.18 - Zona de contração e dilatação por cisalhamento induzido	72
Figura 3.19 - Teste de Cisalhamento Simples sob condição adensada K_0	76
Figura 3.20 - Resultados numéricos e experimentais do comportamento drenado monotônico da areia fofa do Fraser River (Sriskandakumar, 2004)	76
Figura 3.21 - Curva tensão-deformação cisalhante usando dois planos mobilizados sob condição K_0 .	77
Figura 4.1 - Tipo de condições de contorno para carregamento sísmico disponível no FLAC.	81
Figura 4.2 - Curva de valores de amortecimento versus deformação cíclica - Modelo <i>default</i> do histerético do FLAC e de Seed Idriss para uma	

areia.	83
Figura 4.3 - Curva de valores do módulo secante versus deformação cíclica - Modelo <i>default</i> do histerético do FLAC e de Seed Idriss para uma areia.	83
Figura 5.1 - Típico esquema da Fundação de uma pilha.	88
Figura 5.2 - Vista lateral da pilha de lixiviação.	89
Figura 5.3 - Vista frontal da pilha de lixiviação.	89
Figura 5.4 - Sumidouros formados na crista da pilha de lixiviação.	89
Figura 5.5 - Área de ruptura da pilha de lixiviação.	90
Figura 5.6 - Mapa de localização dos trabalhos de campo e as 4 seções tracejadas para as análises.	96
Figura 5.7 - Seções A, B, C e D para análises no EduShake.	103
Figura 5.8 - Análise estática na Seção A.	122
Figura 5.9 - Análise estática na Seção B.	123
Figura 5.10 - Análise estática na Seção C.	124
Figura 5.11 - Análise estática na Seção D.	125
Figura 5.12 - Análise pós-liquefação na Seção A.	126
Figura 5.13 - Análise pós-liquefação na Seção B.	127
Figura 5.14 - Análise pós-liquefação na Seção C.	128
Figura 5.15 - Análise pós-liquefação na Seção D.	129
Figura 5.16 - Geometria e malha criada para a Pilha de Lixiviação.	131
Figura 5.17 - Superfície freática na condição estática, modelo Mohr- Coulomb.	132
Figura 5.18 - Poropressão na condição estática, modelo Mohr- Coulomb.	132
Figura 5.19 - Tensões Verticais Totais na condição estática, modelo Mohr- Coulomb.	133
Figura 5.20 - Tensões Verticais Efetivas na condição estática, modelo Mohr-Coulomb.	133
Figura 5.21 - FS estática = 1.93, e máxima razão de tensão cisalhante atuante.	134
Figura 5.22 - Máxima razão de tensão cisalhante atuante, zoom.	134
Figura 5.23 - Deslocamentos horizontais na análise estática, máx. de	

0,025m.	135
Figura 5.24 - Deslocamentos verticais na análise estática, máx. de 0,200m (na crista).	135
Figura 5.25 - Análise de grandes deformações, máx. razão de deformação cisalhante.	136
Figura 5.26 - FS pós-sismo = 0,63 e máxima razão de tensão cisalhante atuante.	137
Figura 5.27 - Máxima razão de tensão cisalhante atuante, zoom, pós-sismo.	137
Figura 5.28 - Malha deformada na análise pós-sismo.	138
Figura 5.29 - Malha deformada pós-sismo, zoom da crista (a) e do pé da pilha (b)	138
Figura 5.30 - Deslocamentos horizontais pós-sismo, máx. de 0,125m.	139
Figura 5.31 - Deslocamentos verticais pós-sismo, máx. de 0,075m.	139
Figura 5.32 - Análise de grandes deformações, máx. razão de deformação cisalhante.	140
Figura 5.33 - Análise de grandes deformações, máx. razão de deformação cisalhante, zoom.	140
Figura 5.34 - Deslocamentos horizontais pós-sismo, máx. = 5m, grandes deformações.	141
Figura 5.35 - Deslocamentos verticais pós-sismo, máx. = 3m, grandes deformações.	141
Figura 5.36 - Sismo de Moquegua, 2001.	144
Figura 5.37 - Superfície freática na condição estática, modelo UBCSAND.	145
Figura 5.38 - Poropressão na condição estática, modelo UBCSAND.	145
Figura 5.39 - Tensões Verticais Totais na condição estática, modelo UBCSAND.	146
Figura 5.40 - Tensões Verticais Efetivas na condição estática, modelo UBCSAND.	146
Figura 5.41 - Registro tempo historia de velocidade do sismo de ingresso.	147
Figura 5.42- Registro tempo historia do deslocamento do sismo de	

ingresso.	147
Figura 5.43 - Potencia das Freqüências filtrada para 10 Hz.	148
Figura 5.44 - Registro tempo historia de deslocamentos do sismo filtrado para 10 Hz.	149
Figura 5.45 - Registro tempo historia da velocidade de correção para a linha base.	149
Figura 5.46 - Registro tempo historia de aceleração filtrada e corrigida, que será usada nas análises.	150
Figura 5.47 - Geometria, malha e aplicação das condições de contorno e do sismo.	151
Figura 5.48 - Historia das velocidades em alguns nodos, sistema sem amortecimento.	152
Figura 5.49 - Espectro de freqüência. Determinação da freqüência dominante da velocidade, num sistema sem amortecimento.	152
Figura 5.50 - Historia das poropressões em alguns nodos, sistema sem amortecimento.	153
Figura 5.51 - Historia das poropressões em alguns nodos, sistema com amortecimento Rayleigh + Local, $t=30$ seg.	154
Figura 5.52- Zonas liquefeitas $t=30$ seg de sismo.	154
Figura 5.53 - Zonas liquefeitas depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo.	155
Figura 5.54 - Zoom, malha deformada $t=30$ seg de sismo.	155
Figura 5.55 - Zoom, malha deformada depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo.	156
Figura 5.56 - Deslocamentos horizontais, depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo.	156
Figura 5.57 - Deslocamentos verticais, depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo.	157
Figura 5.58 - Historia das poropressões em alguns nós, sistema com amortecimento Rayleigh + Local, modelo UBCSAND, $t=57$ seg.	158
Figura 5.59 - Historia das poropressões em alguns nodos, modelo UBCSAND, depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo.	159

Figura 5.60 - Zonas liquefeitas t=57seg de sismo, modelo UBCSAND.	159
Figura 5.61 - Zonas liquefeitas depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo, modelo UBCSAND.	160
Figura 5.62 - Zonas liquefeitas t=30seg de sismo, Kw=1E3KPa, modelo UBCSAND.	160
Figura 5.63 - Zoom, malha deformada t=57seg de sismo, modelo UBCSAND.	161
Figura 5.64 - Zoom, malha deformada depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo, modelo UBCSAND.	161
Figura 5.65 - Deslocamentos horizontais, depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo, modelo UBCSAND.	162
Figura 5.66 - Deslocamentos verticais, depois de ter terminado a aplicação do sismo, condição pós-sismo, modelo UBCSAND.	162

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Comparação das Vantagens e Desvantagens de Vários Testes de Campo para Avaliação da Resistência à Liquefação.

Tabela 4.1 - Parâmetros do amortecimento histerético, ajustados para a linha superior da areia de Seed Idriss, 1970

Tabela 5.1 - Acelerações Espectrais

Tabela 5.2 - Comparação das massas específicas no Projeto e as encontrados na construção

Tabela 5.3 - Resume das escavações a céu aberto

Tabela 5.4 - Resume das sondagens e dados do SPT

Tabela 5.5 - Resume da Classificação do Minério

Tabela 5.6 - Movimentos na Pilha e na Berma de Estabilidade

Tabela 5.7 - Cálculo das propriedades dinâmicas para serem usadas no EduShake

Tabela 5.8 - Sismos utilizados para o cálculo das acelerações pico na superfície

Tabela 5.9 - Resumo da análise de resposta sísmica

Tabela 5.10a - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10b - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10c - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10d - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10e - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10f - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10g - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e

Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.10h - Cálculo do Potencial de Liquefação – NCEER (1998) e Idriss & Boulanger (2006)

Tabela 5.11a - Cálculo da resistência residual não drenada (Idriss e Boulanger, 2007)

Tabela 5.11b - Cálculo da resistência residual não drenada (Idriss e Boulanger, 2007)

Tabela 5.11c - Cálculo da resistência residual não drenada (Idriss e Boulanger, 2007)

Tabela 5.12 - Resume das razões de resistência residual não drenada, S_r/σ'_v

Tabela 5.13 - Propriedades de resistência dos materiais para a análise de estabilidade

Tabela 5.14 – Fatores de segurança das análises de estabilidade

Lista de símbolos

ALFABETO ROMANO

$a_{\max}$	– aceleração horizontal de pico na superfície do terreno
B	– módulo de deformação volumétrica do solo
B^e	– módulo de deformação volumétrica elástica
BPT	– ensaio de penetração de Becker
C_1 até C_4	– constantes que dependem do tipo da areia e sua densidade relativa
C_B	– fator de correção devido ao diâmetro do furo
C_E	– fator de correção devido à eficiência da energia do martelo
C_h	– parâmetro de forma de endurecimento cíclico
C_N	– fator de correção devido à pressão de sobrecarga
CPT	– ensaio de cone
$C_{p,s}$	– velocidade da propagação da onda P ou S através do meio
C_R	– fator de correção devido ao comprimento da haste
$CRR_{7,5}$	– razão de resistência cíclica à liquefação
C_s	– fator de correção devido a amostrador não-padronizado
CSR	– razão de tensões cíclicas
C_σ	– variável para o cálculo do fator de correção devido à sobrecarga
d	– dilatância
D	– amortecimento crítico
D_r	– densidade relativa
Δu	– incrementos de poropressões
Δl	– tamanho do elemento da malha
e	– índice de vazios
E	– módulo de Young
E_r	– módulo unidimensional da areia
f	– componente da maior frequência
FC	– teor de finos, materiais menores que 0.074mm
FSL	– fator de segurança contra a liquefação
g	– aceleração da gravidade

G^e	– módulo cisalhante elástico
G^p	– módulo cisalhante plástico
$G_{\max}^p$	– módulo cisalhante plástico máximo
G_{m0}	– módulo cisalhante máximo inicial
G_{mn}	– módulo cisalhante máximo
H_1 até H_4	– constantes para ajuste de equações
H_c	– coeficiente de endurecimento dos incrementos de deformação volumétrica plástica
K_0	– coeficiente de empuxo no repouso
$(K_2)_{\max}$	– número do módulo cisalhante (Seed e Idriss, 1970)
k_B^e	– número do módulo de deformação volumétrica elástico
k_G^e	– número do módulo cisalhante elástico
k_G^p	– número do módulo cisalhante plástico
K_σ	– fator de correção devido à sobrecarga
K_α	– fator de correção devido à inclinação do terreno
K_w	– módulo de deformação volumétrica da água
M	– magnitude do sismo
M_L	– magnitude local ou de Richter
m_b	– magnitude ondas de corpo de curto período
m_B	– magnitude ondas de corpo de longo período
m_e	– expoente do módulo de deformação volumétrica elástico
M_s	– magnitude de ondas de superfície
MSF	– fator de correção devido à escala de magnitudes
M_w	– magnitude do momento do sismo
n_e	– expoente do módulo cisalhante elástico
n_f	– razão de tensões na ruptura
n_p	– expoente do módulo cisalhante plástico
n_p	– porosidade
$NCEER$	– Centro Nacional de Investigação de Engenharia Sísmica
N_m	– número de golpes do SPT medido em campo
N_r	– número representativo de passos no <i>SOLVE</i> <i>fos</i> do FLAC
$(N_1)_{60}$	– número de golpes do SPT corrigido devido à sobrecarga efetiva, eficiência da energia do martelo, diâmetro do furo, comprimento da

haste e amostrador.

$(N_1)_{60cs-Sr}$	– número de golpes do SPT corrigido para areia limpa equivalente
P	– onda longitudinal
P_a	– pressão atmosférica
P_o	– probabilidade de excedência anual
R_f	– razão de ruptura
r_d	– coeficiente de redução de tensões
S	– onda cisalhante
S_{cs}	– resistência cisalhante última ou resistência no estado crítico
SPT	– ensaio de penetração normal
S_{qss}	– resistência cisalhante no estado quase-constante
S_r	– resistência residual
V_s	– velocidade de ondas de cisalhamento
$v_{n,s}$	– velocidade normal ou cisalhante da partícula
z	– profundidade

ALFABETO GREGO

σ'_y, σ'_v	– tensão normal vertical efetiva
σ'_x, σ'_h	– tensão normal horizontal efetiva
σ'_m	– tensão efetiva média
σ_n	– tensão normal aplicada
σ_s	– tensão cisalhante aplicada
σ'_{v0}	– tensão normal vertical efetiva inicial
σ_{v0}	– tensão normal vertical total inicial
δ	– deslocamentos
$\gamma(\%)$	– deformação cisalhante
γ	– peso específico do solo
τ_{m0}	– tensão cisalhante máximo inicial
τ_{mn}	– tensão cisalhante máximo
τ_{xy}	– tensão cisalhante
τ_s	– tensão cisalhante estática

τ_r	– tensão cisalhante no último carregamento reverso
γ_r	– deformação cisalhante no último carregamento reverso
ξ_R	– índice de parâmetro de estado
ϵ_v	– deformação volumétrica
ϵ_{vd}	– deformação volumétrica acumulada
$\Delta\epsilon_{vd}$	– incremento da deformação volumétrica
$d\epsilon_v^p$	– incremento da deformação volumétrica plástica
$d\gamma^p$	– incremento da deformação cisalhante plástica
$\Delta\gamma$	– incremento da deformação cisalhante
η	– razão entre tensões cisalhante e normal
ϕ_{cv}	– ângulo de atrito sob volume constante
ϕ_d	– ângulo de atrito mobilizado
ϕ_f	– ângulo de atrito no pico
ϕ_r	– ângulo de atrito reduzido
ϕ^*	– ângulo de atrito efetivo
ν	– coeficiente de Poisson
ρ	– massa específica
ψ	– ângulo de dilatação
α_B	– variável no cálculo do módulo de deformação volumétrica elástico
α_L	– amortecimento local
λ	– comprimento de onda