



Perlita Rosmery Esaine Barrantes

**Análise sísmica e hidromecânica de uma barragem de terra
zonada no Peru**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Celso Romanel

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Perlita Rosmery Esaine Barrantes

**Análise sísmica e hidromecânica de uma barragem de
terra zonada no Peru**

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^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Abril de 2013.

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

Perlita Rosmery Esaine Barrantes

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Cajamarca – UNC (Cajamarca-Peru) em 2000. Principais áreas de interesse: geotecnia computacional e barragens.

Ficha Catalográfica

Barrantes, Perlita Rosmery Esaine

Análise Sísmica e Hidromecânica de uma Barragem de Terra Zonada no Peru / Perlita Rosmery Esaine Barrantes ; orientador: Celso Romanel – 2013.

191 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Modelagem numérica. 3. Análise hidromecânica. 4. Análise dinâmica. 5. Hardening soil model. 6. Barragem de terra. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Wilzet e Jenny,

Pelo amor, compreensão, apoio e incentivo.

Agradecimentos

A Deus, meu pai... tenho certeza que me acompanhou durante todo este caminho, foi duro sim, mas também tive muitas alegrias e agradeço a Ele porque hoje ao encerrar esta etapa levo além dos conhecimentos aprendidos, uma experiência de vida que me fez crescer e ser mais forte.

Aos meus pais, Wilzet e Jenny e meus irmãos Fernando e Elizabeth, porque mesmo de longe me incentivaram para atingir este momento e tiveram que conviver com minha falta.

Ao professor Celso Romanel, pela valiosa e paciente orientação e conhecimentos transmitidos.

As pessoas que de alguma maneira influíram na realização deste trabalho, especialmente ao Gary Durán, pela sua paciente companhia e amizade, a Lidia Pacheco pelo seu carinho e alegria em todo momento, ao Frank Pérez que soube compartilhar e transmitir seus conhecimentos para enriquecer este trabalho, a Mariana Benessiuti pela sua amizade e conselhos, a Miriam Escayala e Ronald Macazana que me ofereceram apoio incondicional desde o início do mestrado.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio que conviveram e compartilharam comigo todo este tempo e se converteram em minha família brasileira, dos quais não vou mencionar nomes para não esquecer ninguém.

A Merit, a empresa que me deu apoio e incentivo para dar este último passo, através do Nick Blanchette, agregando mais valor a esta meta.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Brasil e seu povo acolhedor, obrigada pela oportunidade...

Resumo

Barrantes, Perlita Rosmery Esaine; Romanel, Celso (orientador) **Análise sísmica e hidromecânica de uma barragem de terra zonada no Peru.** Rio de Janeiro, 2013. 191 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Prever o comportamento de estruturas de solo de grande porte, como barragens, durante a construção, em operação e inclusive sob o efeito de eventos sísmicos tem muita importância para evitar possíveis consequências catastróficas e indesejáveis. Neste sentido, este estudo apresenta, através de uma análise acoplada hidromecânica pelo método dos elementos finitos, os resultados numéricos discutidos em termos de tensões e suas trajetórias, deslocamentos verticais e horizontais, poropressões, incluindo a estabilidade de taludes. Além disso, é apresentada também a análise da resposta sísmica quando a estrutura é submetida a um carregamento dinâmico. Para tanto, analisou-se a barragem de terra zonada Recreta, situada na província de Huaraz – Peru, mediante o emprego do programa PLAXIS 2010. Foram descritas as metodologias de análise para simular passo a passo a construção incremental da barragem, o primeiro enchimento do reservatório por incrementos de níveis de água, o avanço da frente de saturação até atingir a condição de fluxo permanente e a avaliação da resposta dinâmica quando a barragem é submetida ao último maior movimento sísmico (história de acelerações) registrado em 1974 na capital do Peru, Lima, adjacente à cidade onde se localiza este projeto. Também se empregou o software Seismosignal versão 5.0, para o tratamento do sinal sísmico, e os programas Shake 2000 e Strata para a calibração dos parâmetros de amortecimento. Os resultados fornecidos por estas ferramentas numéricas foram avaliados em função do fundamento teórico, exposto na revisão bibliográfica, e de uma série de testes para o estabelecimento das metodologias e procedimentos mais adequados para a obtenção destes resultados.

Palavras – chave

Modelagem numérica; análise hidromecânica, análise dinâmica, Hardening soil model, barragem de terra.

Abstract

Barrantes, Perlita Rosmery Esaine; Romanel, Celso (advisor). **Seismic and hydromechanical analysis of a zoned earth dam in Peru**. Rio de Janeiro, 2013. 191 p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Predicting the behavior of soil structures, such as large-scale dams, during construction and operation, including the effect of earthquakes, is very important to prevent possible catastrophic and undesirable consequences. This study presents, through a coupled hydromechanical analysis by the finite element method, numerical results discussed in terms of stresses and trajectories, vertical and horizontal displacements, pore pressures and soil slope stability analyses. The investigation of the seismic response when the structure is subjected to a seismic load is also included, considering the dynamic behavior of the zoned earth dam Recreta, located in the province of Huaraz in Peru. The numerical analyses were carried out using the computational program PLAXIS 2010 to simulate the incremental construction of the dam, the first fill of the reservoir by increments of the water levels, the advance of the front of saturation until achieving the condition of steady flow condition and the seismic response when the dam is subject to the last major earthquake (accelerations history) registered in Peru's capital, Lima, in 1974, which is located near to the site of the Recreta dam. The Seismosignal software version 5.0 was also used for seismic signal processing and the programs SHAKE 2000 and STRATA were also employed for calibration of the damping parameters of the soils. All the results provided herein were discussed, based on the theoretical basics presented in the literature review as well as on the various numerical examples investigated with the main purpose to better understand the hydromechanical behavior of a zoned earth dam subject to static and dynamic loads.

Keywords

Numerical modeling, hydromechanical analysis, dynamic analysis, Hardening soil model, earth dam.

Sumário

1	Introdução	25
2	Comportamento estático e dinâmico de barragens de terra	27
2.1.	Introdução	27
2.2.	Comportamento durante a fase de construção da barragem	27
2.2.1.	Distribuição dos recalques	27
2.2.2.	Influência da anisotropia	30
2.3.	Comportamento durante o enchimento do reservatório	31
2.3.1.	Percolação por fundações e barragens	31
2.3.2.	Comportamento durante o primeiro enchimento	34
2.3.3.	Pressão hidráulica no núcleo	35
2.3.4.	Pressão hidráulica na fundação e sub pressão no núcleo central	36
2.3.5.	Sub pressão a montante	36
2.3.6.	Colapso devido à saturação	37
2.4.	Transferência de cargas	37
2.4.1.	Transferência de cargas do aterro para as ombreiras	37
2.4.2.	Transferência de cargas entre o núcleo e os espaldares	38
2.5.	Trajetória de tensões	39
2.5.1.	Trajetória de tensões durante a construção	39
2.5.2.	Trajetória de tensões durante o enchimento	40
2.6.	Análise de estabilidade e segurança de barragens	42
2.6.1.	Estabilidade durante a construção	45
2.6.2.	Estabilidade em condição de fluxo permanente com reservatório cheio	46
2.6.3.	Estabilidade durante o rebaixamento rápido	46
2.6.4.	Segurança do fluxo em barragens	47
2.6.5.	Erosão regressiva	49
2.7.	Conceitos de sismologia	49

2.7.1. Estrutura interna da terra	50
2.7.2. Ondas sísmicas	50
2.7.3. Grandeza de um sismo	54
2.7.4. Parâmetros do movimento do terreno	56
2.7.5. Quantificação do movimento do terreno	60
2.7.6. Frequência fundamental do sistema	61
2.8. Fatores que influenciam a resposta sísmica	61
2.8.1. Efeitos da fundação	62
2.8.2. Efeitos da não linearidade dos materiais	64
2.8.3. Não homogeneidade da barragem	65
2.9. Características da resposta sísmica	66
2.9.1. Excitação dos modos de vibração	66
2.9.2. Amplificação na crista	67
2.9.3. Degradação da rigidez dos materiais	68
2.10. Comportamento tensão-deformação sob carregamentos cíclicos	69
2.10.1. Amplificação dinâmica de solos	69
2.10.2. Parâmetros de amplificação	70
2.10.3. Módulo de cisalhamento máximo $G_{\text{máx}}$	72
2.10.4. Curva de redução do módulo cisalhante $G/G_{\text{máx}}$	74
2.10.5. Razão de amortecimento	76
2.10.6. Critério do módulo de descarregamento- recarregamento	78
 3 Modelos constitutivos	 80
3.1. Introdução	80
3.2. Modelos constitutivos elasto-plásticos	80
3.2.1. Modelo de Mohr-Coulomb	80
3.2.2. Modelo hardening soil model - HSM	81
3.2.3. Modelo linear equivalente	90
 4 Modelagem numérica	 93
4.1. Modelagem da fase de construção por camadas	93
4.1.1. Número de camadas	93

4.2. Modelagem da fase do primeiro enchimento	94
4.2.1. Número de etapas de enchimento	94
4.3. Modelagem da fase dinâmica	95
4.3.1. Transmissão de ondas	95
4.3.2. Filtragem do registro sísmico	96
4.3.3. Correção da linha base	97
4.3.4. Carregamento dinâmico	98
4.3.5. Condições de contorno	99
4.3.6. Amortecimento mecânico	100
4.3.7. Efeitos da geometria do modelo de elementos finitos	105
5. Análise da barragem Recreta	106
5.1. Análise estática da barragem Recreta	108
5.1.1. Características gerais	108
5.1.2. Parâmetros geotécnicos dos materiais	110
5.1.3. Condições de contorno	114
5.2. Resultados da análise estática	116
5.2.1. Apresentação dos resultados - fase de construção	117
5.2.2. Apresentação dos resultados do enchimento (fluxo transiente) e fluxo permanente	126
5.2.3. Apresentação dos resultados do rebaixamento rápido	143
5.2.4. Trajetórias de tensões efetivas	146
5.3. Análise de estabilidade	150
5.3.1. Análise de estabilidade durante a construção	150
5.3.2. Análise de estabilidade durante o enchimento e fluxo permanente	151
5.3.3. Análise de estabilidade em rebaixamento rápido	153
5.4. Análise dinâmica da barragem Recreta	154
5.4.1. Características gerais	154
5.4.2. Calibração do módulo de amortecimento do modelo	158
5.4.3. Tratamento do registro sísmico	165
5.4.4. Condições de contorno e carregamento dinâmico	168
5.5. Simulação da análise dinâmica	170

5.6. Resultados da análise dinâmica	171
5.6.1. Tensão e deformação cisalhante máxima	172
5.6.2. Deslocamentos horizontais e verticais	172
5.6.3. Resposta história tempo acelerações	173
 6 Conclusões	 179
6.1. Análise estática	179
6.2. Análise dinâmica	181
6.3. Sugestões para pesquisas futuras	182
 Referências bibliográficas	 183
 ANEXO	 189

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Construção de aterro de grande extensão por camadas sucessivas-Law, 1975.....	28
Figura 2.2 - Perfil de recalque em um aterro, com valor máximo a média altura $H/2$ (Law, 1975).	29
Figura 2.3 - Curvas de distribuição do recalque em diferentes etapas da construção do aterro (Law, 1975)	30
Figura 2.4 - Efeitos do primeiro enchimento do reservatório em uma barragem zonada (de Nobari e Duncan, 1972)	36
Figura 2.5 - Trajetórias de tensão durante a fase de construção (Naylor 1992)	40
Figura 2.6 - Trajetórias de tensão típicas no material de enrocamento (Veiga Pinto, 1983)	41
Figura 2.7 - Trajetórias de tensão típicas no material do núcleo central (Veiga Pinto, 1983)	41
Figura 2.8 - Deformações produzidas por ondas de corpo: (a) ondas P e (b) ondas SV (Kramer, 1996).	51
Figura 2.9 - Ondas superficiais Love e Rayleigh (http://www.geologia.ufpr.br/graduacao/geofisica2007/ondassismicas-aula1.pdf)	52
Figura 2.10 - Deformações causadas por ondas superficiais: (a) ondas de Rayleigh; (b) ondas de Love (Kramer, 1996).	53
Figura 2.11 - Ondas sísmicas registradas a 10.000km do epicentro: a) sismo de foco profundo; b) sismo de foco superficial (Sauter, 1989).	53
Figura 2.12- Acelerograma e suas principais características.	57
Figura 2.13 - Aceleração, velocidade e deslocamento tempo história do Giroy (Kramer, 1996).....	58
Figura 2.14 - Espectro de amplitude de Fourier para o registro sísmico Giroy 2 (Kramer 1996).....	59

Figura 2.15 - Influência da frequência na resposta de uma camada linear, elástica amortecida (Kramer, 1996).....	61
Figura 2.16 - Barragem e fundação em vale retangular (Dakoulas, 1990 apud Parra, 1996)	63
Figura 2.17 - Resposta não linear e linear na seção central de uma barragem sobre camada de fundação submetida a excitações harmônicas de 0,05g e 0,20g. H1=espessura da fundação; H2=altura da barragem; $V_{S2}=V_{S1}$ =velocidades de onda S na barragem e no solo de fundação, igual a 400m/s; L=comprimento da barragem; z = profundidade medida a partir da crista (Dakoulas, 1990).....	65
Figura 2.18 - Espectro de amplificação da aceleração na barragem de Santa Felicia durante o terremoto de southern California 1976: (a) direção montante-jusante, b) direção paralela ao eixo da barragem (de Abdel-Ghaffar e Scott, 1979)	67
Figura 2.19 - Efeitos da amplificação em massas de rocha e solo.....	70
Figura 2.20 - Efeito da amplificação em diferentes tipos de solo (de Seed et al, 1976).....	70
Figura 2.21 - Gráfico tensão-deformação a) para um ciclo; b) histerético.....	71
Figura 2.22 – Esqueleto da curva mostrando a variação típica de G_{sec} com a deformação cisalhante (Kramer, 1996)	72
Figura 2.23 - Variação do módulo de cisalhamento K_{2max} para areias em densidades relativas em função das deformações cisalhantes – Seed e Idriss (1970).....	75
Figura 2.24 - Faixa de variação de G/G_{max} com a deformação cisalhante para areias (Seed e Idriss, 1970).	75
Figura 2.25 - Faixa de variação de G/G_{max} com a deformação cisalhante para pedregulhos (Seed e Idriss, 1970).	76
Figura 2.26 - Efeito do índice de plasticidade na curva de redução do módulo de cisalhamento de solos coesivos (Vucetic e Dobry,1991).	76

Figura 2.27 – Variação da razão de amortecimento para areias (Seed e Idriss, 1970).	77
Figura 2.28 - Comparação da variação da razão de amortecimento para solos com pedregulho e areias (Seed et al., 1986).	77
Figura 2.29 - Efeito do índice de plasticidade nas curvas de variação da razão de amortecimento vs deformação cisalhante para solos coesivos (Vucetic e Dobry, 1991).	78
Figura 2.30 - Carregamento inicial e repetido (de Byrne et al., 1986)	79
Figura 3.1- Critério de escoamento de Mohr-Coulomb: a) no plano (σ, τ); b) em plano octaédrico (Ibañez, 2003).	81
Figura 3.2 - Idealização da relação tensão-deformação do modelo de elasto-plasticidade perfeita.	82
Figura 3.3 Superfície de fluência no espaço das tensões principais. (Nieto, 2009)	82
Figura 3.4 - Módulo E_{oed}^{ref} obtido a partir do ensaio odométrico (PLAXIS, 2010)	84
Figura 3.5 - Relação tensão-deformação hiperbólica para ensaios triaxiais consolidados drenados (PLAXIS, 2010)	85
Figura 3.6 - Modelo HSM. Superfícies de escoamento para vários valores de \square^p . (Ibañez, 2003)	88
Figura 3.7 - Modelo HSM. Superfície “cap” no plano p' - q . (Ibañez, 2003)	88
Figura 3.8 - Modelo HSM. Curva de deformação volumétrica para ensaio triaxial drenado com indicação de <i>cut-off</i> . (PLAXIS, 2010)	90
Figura 3.9 - Comportamento cíclico típico dos solos (Kramer, 1996): a) Relação tensão - deformação cisalhante para o primeiro ciclo de carregamento. b) Variação da rigidez em função do nível de deformação por cisalhamento.	91
Figura 4.1 : Influência do número de níveis d'água e incrementos de carga nos deslocamentos verticais durante o enchimento do reservatório (de Veiga Pinto, 1983).	95
Figura 4.2- Processo de correção da linha base (manual do FLAC v.5).	98

Figura 4.3 - Influência dos parâmetros de amortecimento de Rayleigh. (PLAXIS, 2010)	101
Figura 4.4-Variação da razão de amortecimento crítico normalizada em relação à frequência angular. (Itasca, 2005 apud Bustamante, 2010)	103
Figura 4.5 - Elementos da barragem: altura H, largura lateral da fundação B e largura da base da fundação W. Jiryaeei (2010).....	105
Figura 5.1 - Localização projetada da barragem de Recreta. (Parra, 1996)	106
Figura 5.2 - Características da fundação da barragem Recreta (Parra, 1996)	107
Figura 5.3 - Seção transversal A-A analisada (Parra, 1996)	108
Figura 5.4 – Seção transversal A-A, Perfis 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 e camadas indicando os materiais e condições de contorno para análise estática (PLAXIS).....	109
Figura 5.5 - Malha de elementos finitos para análise estática da barragem Recreta	110
Figura 5.6 - Modelo estendido para comprovar a influência da locação dos contornos.....	115
Figura 5.7 – Influência dos contornos na leitura das a)Tensões principais e b) Deslocamentos verticais.	116
Figura 5.8 - Condições de contorno para o análise de fluxo	116
Figura 5.9 - Distribuição da rigidez após a construção e perfis 2-2 (- 10m do eixo) e 3-3 (-24m do eixo)	118
Figura 5.10 - Distribuição da tensão principal maior efetiva após construção e detalhe da seção 1-1.	119
Figura 5.11 - Distribuição da tensão principal menor efetiva após construção.....	120
Figura 5.12 - Distribuição dos deslocamentos a) verticais e b) horizontais, caso 1.	121
Figura 5.13 - Distribuição dos deslocamentos a) verticais e b) horizontais. Após a décima primeira camada, caso 2.	122

Figura 5.14 – Barragem homogênea para validação do cálculo dos deslocamentos verticais	123
Figura 5.15 - Validação do perfil de recalque calculado a partir do programa PLAXIS com os modelos Mohr Coulomb, HSM e a solução analítica, no eixo da barragem.....	124
Figura 5.16 - Comparação dos deslocamentos verticais do caso 1: construção em uma etapa com o caso 2: construção incremental. Perfil 1-1 (eixo da barragem).....	125
Figura 5.17 - Comparação dos deslocamentos horizontais Caso 1: construção em uma etapa com o Caso 2: construção incremental. Perfil 1-1 (eixo da barragem).....	126
Figura 5.18 - Distribuição da rigidez após enchimento - perfil 3-3 (- 24m do eixo)	129
Figura 5.19 - Distribuição da tensão principal maior efetiva após enchimento.....	129
Figura 5.20 - Distribuição da tensão principal maior efetiva após enchimento em fluxo permanente	130
Figura 5.21- Distribuição da tensão efetiva principal menor após enchimento.....	130
Figura 5.22 - Zonas de plastificação após enchimento	130
Figura 5.23 - Superfície piezométrica após a fase 9 do primeiro enchimento incremental – caso 4.....	131
Figura 5.24 - Posição da superfície freática em condição de fluxo permanente - Caso 5.....	131
Figura 5.25 - Deslocamentos verticais após a) fase 5 e b) fase 9 do enchimento incremental, caso 4.....	132
Figura 5.26 – Deslocamento horizontal após a) fase 5 e b) fase 9 do enchimento incremental, caso 4.....	133
Figura 5.27 – Sentido dos deslocamentos totais após enchimento incremental, caso 4	134
Figura 5.28 - Deslocamentos verticais sem incluir os da construção, no eixo (Perfil 1-1).....	135

Figura 5.29 - Deslocamentos verticais sem incluir os da construção, à montante (Perfil 2-2).....	136
Figura 5.30 - Deslocamentos horizontais sem incluir a construção, no eixo (Perfil 1-1).....	136
Figura 5.31 - Deslocamentos horizontais sem incluir a construção, à montante (Perfil 2-2).....	137
Figura 5.32 – Deslocamentos verticais do primeiro enchimento incluindo a construção, no eixo (Perfil 1-1)	137
Figura 5.33 - Deslocamentos verticais do primeiro enchimento incluindo a construção, à montante (Perfil 2-2)	138
Figura 5.34 - Deslocamentos horizontais do primeiro enchimento incluindo os da construção, no eixo da barragem (perfil 1-1).....	139
Figura 5.35 - Deslocamentos horizontais do primeiro enchimento incluindo os da construção, à montante (seção 2-2)	139
Figura 5.36 - Distribuição das poropressões após a fase 9 do primeiro enchimento, caso 4.	140
Figura 5.37 – Pressões de água no Perfil 1-1 (eixo da barragem) após enchimento.....	141
Figura 5.38 - Pressões de água no Perfil 2-2 (montante) após enchimento.....	141
Figura 5.39 - Determinação do tempo para atingir o estado permanente.	142
Figura 5.40 - Distribuição da rigidez após o rebaixamento rápido e perfil 3-3 (-24m do eixo)	144
Figura 5.41 - Distribuição da tensão principal maior efetiva após rebaixamento rápido	144
Figura 5.42 - Distribuição da tensão efetiva principal menor após rebaixamento rápido	145
Figura 5.43 - Distribuição da resistência ao cisalhamento após rebaixamento rápido	145
Figura 5.44 - Distribuição da relação entre a tensão cisalhante mobilizada e a resistência ao cisalhamento máxima após rebaixamento rápido	145

Figura 5.45- Distribuição do grau de saturação após rebaixamento	146
Figura 5.46 - Pontos de controle de tensões efetivas	146
Figura 5.47 Trajetórias de tensões efetivas no núcleo na construção, enchimento e rebaixamento rápido.	147
Figura 5.48 - Trajetórias de tensões efetivas à montante na construção e enchimento	148
Figura 5.49 – Trajetória de tensões efetivas à jusante, na construção e enchimento.....	149
Figura 5.50 - Superfície aproximada de rotura – após a) camada 5 e b) camada 11, caso 2.....	151
Figura 5.51 - Superfície aproximada de ruptura - fase de enchimento 9	152
Figura 5.52 - Superfície aproximada de ruptura – condição permanente	152
Figura 5.53- Superfície aproximada de ruptura – rebaixamento rápido em 5 dias.....	153
Figura 5.54 - Secção transversal A-A.....	154
Figura 5.55 - Malha de elementos finitos para análise dinâmica da barragem Recreta – PLAXIS.....	156
Figura 5.56 - Mapa de isoacelerações espectrais para 10% de excedência em 100 anos (Alva e Castillo, 1993)	157
Figura 5.57- Curvas de isoacelerações para 10% de excedência em 100 anos na zona em estudo (Alva e Castillo, 1993), Peru.....	158
Figura 5.58 – Seção transversal do modelo para calibração e pontos de controle	160
Figura 5.59- Determinação das razões de amortecimento (ξ) no programa Strata.	162
Figura 5.60-Frequências fundamentais do modelo elástico (camadas horizontais).....	162
Figura 5.61 – Calibração do PLAXIS com SHAKE 2000, para a) frequências 2,11 e 7,84 e ξ =5% e 11%, b) frequência 7,84 e ξ =4% e c) frequência 7,84 e ξ =5%	164
Figura 5.62- Registro de acelerações do terremoto de Lima de 03/10/1974	165

Figura 5.63 - Registro normalizado das acelerações do terremoto de Lima de 03/10/1974 em relação à aceleração máxima de 0,26g no embasamento rochoso.....	166
Figura 5.64 - Espectro de potência do registro de acelerações a) original e b) com filtro de 14,69 Hz. (SeismoSignal)	167
Figura 5.65- História de velocidades com e sem correção da linha base (SeismoSignal)	167
Figura 5.66- História de deslocamentos com e sem correção da linha base (SeismoSignal)	167
Figura 5.67- História de aceleração horizontal na fase intensa do sismo considerando filtro de 14,69Hz e corrigido por linha base. ...	168
Figura 5.68 – Carregamento dinâmico como história de tensões	169
Figura 5.69 – Locação dos pontos de controle.....	170
Figura 5.70 - Espectro de potência das acelerações horizontais não-amortecidas após construção. Frequências fundamentais = 1,84 e 2,11 Hz.....	170
Figura 5.71-Distribuição de σ_1' após construção durante.....	171
Figura 5.72-Deformação cisalhante máxima.....	172
Figura 5.73-Distribuição das tensões cisalhantes máximas ao final da excitação sísmica após construção.....	172
Figura 5.74-Distribuição dos deslocamentos horizontais ao final da excitação sísmica após construção.....	173
Figura 5.75-Deslocamentos horizontais obtidos durante a excitação sísmica após a construção.....	174
Figura 5.76-Comparação entre o tempo-história das acelerações de entrada e da resposta na a) cresta, topo da fundação b) da jusante e c) de montante da barragem após a construção.	176
Figura 5.77 – Espectro de resposta na a) cresta, b) na base da jusante e c) montante da barragem após a construção	178

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores típicos do coeficiente de permeabilidade k (Romanel, 2010)	33
Tabela 2.2 – Classificação quanto ao grau de permeabilidade (Terzaghi e Peck, 1967)	33
Tabela 2.3-Levantamento de acidentes em barragens (Middlebrooks, 1953 apud Sandroni, 2012)	48
Tabela 2.4-Escala de Mercalli Modificada de intensidade sísmica (http://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Mercalli)	55
Tabela 2.5 - Escala de Richter de magnitude sísmica	56
Tabela 2.6 - Estimativa de $K_{2,max}$ (Seed e Idriss, 1970).....	74
Tabela 3.1 - Parâmetros do modelo HSM (PLAXIS, 2010)	86
Tabela 4.1- Valores de c_1 e c_2 em função do coeficiente de Poisson ν (White et al, 1977 apud Bustamante, 2010)	100
Tabela 4.2- Valores típicos da razão de amortecimento crítico (Richart et al., 1970, apud Bustamante, 2010).	103
Tabela 5.1- Parâmetros do modelo hiperbólico para análise estática do comportamento da barragem e da fundação	112
Tabela 5.2- Parâmetros do modelo HSM para análise estática do comportamento da barragem e fundação	113
Tabela 5.3 - Parâmetros de fluxo	114
Tabela 5.4 - Deslocamentos máximos e mínimos casos 1 e 2.....	121
Tabela 5.5 – Permeabilidade dos materiais da barragem	128
Tabela 5.6 Fatores de segurança por etapas de construção	152
Tabela 5.7 Fatores de segurança durante o fluxo	153
Tabela 5.8 - Parâmetros do modelo Mohr Coulomb para análise dinâmica do comportamento da barragem e fundação	156
Tabela 5.9 Valores representativos de critérios de projeto considerando movimentos sísmicos (Parra, 1996)	159

Tabela 5.10- Fatores de redução do módulo cisalhante e razão de amortecimento em função da deformação cisalhante efetiva para os solo da barragem de Recreta (Parra, 1996)	161
Tabela 5.11- Cálculo dos coeficientes de amortecimento de Rayleigh ..	171

Lista de Símbolos

c	-	coesão
e	-	índice de vazios
E	-	módulo de Young
E_{ur}	-	módulo de elasticidade em descarregamento- recarregamento
E_{50}^{ref}	-	módulo de elasticidade referencial no carregamento
E_{ur}^{ref}	-	módulo de elasticidade referencial no descarregamento- recarregamento
E_{oed}^{ref}	-	módulo de compressão confinada referencial
E_{50}	-	módulo de elasticidade no carregamento
E_{oed}	-	módulo de compressão confinada
F	-	função de escoamento
F_p	-	força de percolação
j	-	força de percolação por unidade de volume
ϕ	-	ângulo de atrito interno do solo
G	-	módulo cisalhante
G_{max}	-	módulo cisalhante máximo
G_t	-	módulo cisalhante tangencial
g	-	aceleração da gravidade
H	-	espessura do aterro
γ	-	peso específico
γ_m	-	peso específico natural
γ_{sat}	-	peso específico saturado
γ_w	-	peso específico d'água
K_0	-	coeficiente de empuxo no repouso
K_b	-	parâmetro do modelo hiperbólico relativo ao módulo de compressibilidade volumétrica
K_{ur}	-	parâmetro do modelo hiperbólico relativo ao módulo no descarregamento

K_l	-	número de rigidez adimensional
K_t	-	rigidez tangencial
K_G	-	número do módulo cisalhante tangencial
m	-	parâmetro do modelo hiperbólico relativo ao módulo de compressibilidade volumétrica
m	-	parâmetro do modelo HSM relativo à dependência da rigidez com o estado de tensão
n	-	parâmetro do modelo hiperbólico relativo ao módulo tangencial
ν	-	coeficiente de Poisson
p_a	-	pressão atmosférica
ξ	-	coordenada local ou razão de amortecimento
p	-	tensão média
q	-	tensão desviadora
q_a	-	valor assintótico da tensão desviadora
R_f	-	razão de ruptura
ρ	-	recalque vertical
S	-	grau de saturação
σ	-	tensão normal
σ_1	-	tensão normal principal maior
σ_3	-	tensão normal principal menor
T	-	período natural do sistema
τ	-	tensão cisalhante
c_p	-	velocidade de onda compressional
C_s	-	velocidade de onda cisalhante
ω_1	-	frequência fundamental de vibração
Δt	-	intervalo de tempo