

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Roberth Apolinar Aguilar Chuquimuni**

**Análise Numérica  
do Alçamento de Barragens de Terra**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2005



**Roberth Apolinar Aguilar Chuquimuni**

## **Análise Numérica do Alteamento de Barragens de Terra**

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

**Celso Romanel**  
Orientador, PUC – Rio

**Anna Paula Lougon Duarte**  
PUC - Rio

**Christianne de Lyra Nogueira**  
UFOP – MG

**José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2005

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

### **Roberth Apolinar Aguilar Chuquimuni**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional de Ingenieria (UNI-Peru) em 1997. Desenvolveu durante a tese de graduação o programa denominado SAPDG e um sistema para registro de ondas em ensaios de refração sísmica. Atuou na área geotécnica do Centro de Investigações Sísmicas e Mitigação de Desastres (CISMID-UNI). Ingressou em 2003 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa geomecânica computacional.

#### Ficha Catalográfica

Chuquimuni, Roberth Aguilar

Análise Numérica do Alçamento de Barragens de Terra / Roberth Aguilar Chuquimuni; orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

v., 165 f.: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Alçamento de barragens. 3. Análise de percolação. 4. Estabilidade estática e sísmica de taludes. 5. Elementos finitos. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III Título.

CDD: 624

À minha filhinha Ângela, a razão de minha vida.

À Maritza minha esposa, pelo amor e  
compreensão.

## Agradecimentos

A Deus, por todas as graças recebidas.

À minha esposa Maritza, por todo o apoio e compreensão que precisei durante o tempo que tirei da minha família, e a nossa filhinha Ângela, a razão da minha vida.

A toda minha amada família, que me deu carinho, apoio constante e incondicional. Aos meus pais Eva e Pedro, pelo apoio de sempre. A minha tia Maria, minha segunda mãe, meus queridos irmãos Edgar, Lucho, Ana, Marlene, Sonia e Hector, Sra. Maria, Sr. Teófilo, Sonia Z. e Fina, que sempre acreditaram na minha pessoa, agradeço infinitamente esse carinho e confiança.

Ao professor Celso Romanel pela dedicada orientação deste trabalho e, sobre tudo pela amizade proporcionada nesta etapa da minha vida, obrigado professor.

Aos demais professores do Departamento da PUC que contribuíram de alguma forma para a minha formação profissional.

Aos meus amigos Zenón, Milagro, Denys, Enrique, Wagner e Glauca, pela amizade e apoio incondicional no presente trabalho.

Aos meus amigos que encontrei na PUC e que fizeram minha vida mais alegre. Obrigado pelo adorável convívio durante todo este tempo, fico grato a vocês.

À Pontifícia Universidade Católica (PUC-Rio) e ao CNPQ pelo apoio financeiro prestado para a concretização deste trabalho.

Aos funcionários da Secretaria do Departamento de Engenharia Civil. À todas as pessoas que contribuíram, de alguma maneira, com o desenvolvimento desta tese.

## **Resumo**

Aguilar, Roberth Chuquimuni; Romanel, Celso. **Análise Numérica do Alteamento de Barragens de Terra**. Rio de Janeiro, 2005. 165 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma das atividades relacionadas à recuperação de barragens envolve o alteamento de barragens existentes, normalmente com o objetivo de aumentar a capacidade de armazenamento dos reservatórios, melhorar o fator de segurança dos taludes ou a proteção da estrutura contra possíveis cheias. O alteamento pode estar previsto no projeto original da barragem, mas na maioria dos casos trata-se de um novo estudo, com a barragem em operação, devendo-se verificar as novas condições de fluxo, efeitos na estabilidade de taludes e na resposta da barragem a carregamentos estáticos e sísmicos, estes principalmente em regiões de alta sismicidade, como no sul do Peru, onde se encontram a barragem de terra de Viña Blanca, aqui considerada. Nesta dissertação o método dos elementos finitos e o método de equilíbrio limite, isolada ou conjuntamente, são empregados para análise estática e dinâmica destas barragens de terra considerando diversas opções de alteamento, como a construção de muros parapeito, muros de gabião, solo compactado, solo reforçado com geotêxteis e solo reforçado com revestimento de concreto. De estudos de perigo sísmico efetuados no local das barragens, selecionou-se o valor de aceleração horizontal máximo para ser utilizado nos registros de aceleração ocorridos nos terremotos de Lima (1974) e de Moquegua (2001). As análises numéricas efetuadas mostram que as opções de alteamento consideradas não alteram significativamente as condições de segurança das barragens existentes, tanto do ponto de vista hidráulico como da estabilidade de taludes e resposta dinâmica durante a incidência de terremotos.

## **Palavras – chave**

Alteamento de barragens, análises de percolação, estabilidade estática e sísmica de taludes, elementos finitos.

## **Abstract**

Aguilar, Roberth Chuquimuni; Romanel, Celso (advisor). **Numerical analysis of raising earth dams**. Rio de Janeiro, 2005. 165p., M.Sc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the activities related to dam constructions involves the raising of the existent structure, normally done with the objective of increasing the water storage capacity of the reservoirs, improving the safety factor of the embankment slopes or to ensure a better protection against possible water flooding. The raising of an earth dam can be predicted in the original dam plan, but in mostly situations consists of a new design, with the dam fully operational, where the effects of a new dam height and reservoir level should be assessed with respect to flow conditions, stability of the embankment soil slopes and the response of the revised structure under static and seismic loads, mainly in highly seismic regions, as in the South of Peru where the earth dam of Viña Blanca, herein studied, was constructed. In this dissertation, the finite element method and the limit equilibrium method were used for the static and dynamic analyses of these earth dams, in their original geometry as well after dam raising with reinforced soil, compacted soil and concrete or gabion structures, among other options. From studies of seismic risk analyses carried out at the dam sites, the value of maximum horizontal acceleration equal to 0.4g was chosen to be used as the peak acceleration in the Lima (1974) and Moquegua (2001) acceleration time histories. The numerical results indicate that all dam raising options investigated in this work do not affect the safety conditions of the dams significantly, either under the point of view of the hydraulic behavior as well as soil slope stabilities or the dynamic response of the earth dams to seismic loads.

## **Keywords**

Raising of dams, analysis of seepage, static and seismic slope stability, finite elements.

# Sumário

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | Introdução                                    | 24 |
| 2      | Alteamento de Barragens                       | 26 |
| 2.1.   | Introdução                                    | 26 |
| 2.2.   | Casos Históricos do Alteamento de Barragens   | 27 |
| 2.3.   | Métodos de Alteamento de Barragens            | 30 |
| 2.3.1. | Alteamento com muros de parapeito             | 30 |
| 2.3.2. | Alteamento com solo reforçado                 | 32 |
| 2.3.3. | Alteamento com muro em gabiões                | 34 |
| 2.3.4. | Alteamento com concreto rolado compactado     | 35 |
| 2.3.5. | Alteamento com elemento inflável de borracha  | 36 |
| 2.3.6. | Alteamento de grande altura                   | 37 |
| 2.4.   | Projeto do Alteamento                         | 37 |
| 2.4.1. | Projeto Geométrico                            | 38 |
| 2.4.2. | Projeto de muros de gabião                    | 40 |
| 2.4.3  | Projeto de solos reforçados                   | 44 |
| 3      | Fluxo Permanente Não Confinado                | 51 |
| 3.1.   | Introdução                                    | 51 |
| 3.2.   | Análise com malha variável                    | 52 |
| 3.3.   | Análise com malha fixa                        | 53 |
| 4      | Estabilidade de Taludes em Barragens de Terra | 60 |
| 4.1.   | Introdução                                    | 60 |
| 4.2.   | Análise estática da estabilidade de taludes   | 62 |
| 4.2.1. | Método de equilíbrio limite                   | 62 |
| 4.2.2. | Solos não saturados                           | 67 |
| 4.2.3. | Método dos elementos finitos                  | 68 |
| 4.3.   | Análise sísmica de taludes                    | 72 |
| 4.3.1. | Métodos pseudo-estáticos                      | 73 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3.2. Método de Newmark (1965)                 | 74  |
| 5 Barragem de terra de Viña Blanca              | 78  |
| 5.1. Introdução                                 | 78  |
| 5.2. Sismicidade regional                       | 78  |
| 5.3. Configuração atual da barragem             | 83  |
| 5.4. Opções de alteamento                       | 86  |
| 5.5. Malha de elementos finitos                 | 89  |
| 5.6. Análises de fluxo permanente               | 93  |
| 5.6.1. Exemplo de validação                     | 93  |
| 5.6.2. Fluxo na seção atual e alteamentos       | 95  |
| 5.7. Análises de estabilidade estática          | 101 |
| 5.8. Análise de estabilidade sísmica            | 112 |
| 5.8.1. Método pseudo-estático                   | 112 |
| 5.8.2. Método de equilíbrio limite aperfeiçoado | 121 |
| 5.9. Estabilidade pós-sismo                     | 128 |
| 5.10. Resposta dinâmica da barragem             | 133 |
| 5.10.1. Características da resposta dinâmica    | 133 |
| 5.10.2. Resposta ao carregamento estático       | 137 |
| 5.10.3. Resposta ao carregamento sísmico        | 141 |
| 6 Conclusões e sugestões                        | 152 |
| 6.1. Conclusões                                 | 152 |
| 6.2. Sugestões                                  | 153 |
| 7 Referências bibliográficas                    | 154 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Alteamento da barragem de Iwiny, Polônia (Chacinski e outros, 1994).  | 28 |
| Figura 2.2 – Barragem de terra de Pactola - EUA alteada em 1978 (Bureau of Reclamation).   | 29 |
| Figura 2.3 – Alteamento da barragem de King Talal (Antonopoulus, 1994).  | 29 |
| Figura 2.4 – Alteamento da barragem de Al-Wehdah (Antronopoulos e outros, 1994).   | 29 |
| Figura 2.5 – Projeto do alteamento da barragem Curuá-Una (Ligocki , 2003).   | 30 |
| Figura 2.6 – Alteamento de barragem com muro parapeito (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).   | 31 |
| Figura 2.7 – Muro de parapeito curvo (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).   | 31 |
| Figura 2.8 – Muro de parapeito convencional (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).  | 32 |
| Figura 2.9 – Procedimentos típicos de construção do alteamento (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).                                 | 32 |
| Figura 2.10 – Alteamento com solo reforçado (topo) e muros de contenção com solo reforçado (base) - Giroud e Bonaparte, 1993.        | 33 |
| Figura 2.11 – Alteamento de barragem com solo reforçado (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).  | 33 |
| Figura 2.12 – Esquema da construção de muro com gabião.  | 34 |
| Figura 2.13 – Alteamento com muros de gabião.  | 35 |
| Figura 2.14 – Alteamento de barragem com concreto rolado compactado ou mistura de solo-cimento (U.S. Army Corps of Engineers, 2004). | 35 |
| Figura 2.15 – Alteamento com elemento inflável de borracha (Bureau of Reclamation, 1992).  | 36 |
| Figura 2.16 – Elevação do espaldar de jusante da barragem de terra (U.S. Army Corps of Engineers, 2004).                             | 37 |
| Figura 2.17 – Esquema da construção de muro com gabião (Maccaferri, 2003).   | 41 |
| Figura 2.18 – Muros em gabiões, com escalonamentos interno (topo) e externos (base) – Maccaferri, 2003.                              | 42 |
| Figura 2.19 – Principais funções dos geotêxteis em obras geotécnicas.  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.20 – Modos de reforço de aterros (Ingold, 1984)  | 46 |
| Figura 2.21 – Processo construtivo de camadas de aterro com solo reforçado (TENAX SpA, 2002)  | 46 |
| Figura 2.22 – Revestimentos típicos utilizados em estruturas de solos reforçados.   | 47 |
| Figura 2.23 – Extensão do método de Fellenius para análise da estabilidade de solo reforçado (Taga et al., 1992)  | 49 |
| Figura 2.24 – Extensão do método de Bishop Simplificado para análise da estabilidade de estruturas de solo reforçado (Porkharel, 1995).                                       | 50 |
| Figura 3.1 – Percolação não confinada do fluxo através da barragem de terra (Gioda e Desideri, 1988).   | 53 |
| Figura 3.2 – Uma aproximação da linha freática pelo segmento FS no elemento finito (Gioda e Desideri, 1988).  | 54 |
| Figura 3.3 – Representação esquemática da função de condutividade hidráulica (Gioda e Desireri, 1988).  | 56 |
| Figura 3.4 – Variação abrupta do coeficiente de permeabilidade com a carga de pressão para representação da interface solo seco – solo saturado (Bathe e Khoshgoftaar, 1979). | 57 |
| Figura 3.5 – Variação do coeficiente de redução de permeabilidade $K_r$ com a razão entre cargas de sucção - escalas logarítmica e aritmética (Plaxis v.8).                   | 59 |
| Figura 4.1 – Forças atuantes em uma fatia vertical e a superfície potencial de ruptura (GeoSlope/W)   | 64 |
| Figura 4.2 - Componentes de tensão na superfície potencial de ruptura.  | 71 |
| Figura 4.3 - Distribuição de tensões cisalhantes mobilizadas ( $\tau$ ) e da resistência ao cisalhamento ( $s$ ) ao longo da superfície potencial de ruptura (A→B).           | 72 |
| Figura 4.4 – Analogia de Newmark (1965) entre uma massa de solo potencialmente instável e o bloco rígido sobre um plano inclinado.  | 75 |
| Figura 4.5 – Integrações no tempo para determinação da velocidade e deslocamento relativos pelo método de Newmark (Smith, 1995).  | 77 |
| Figura 5.1- Sismicidade na região sul do Peru entre 1964 e 1996 com magnitudes superiores a 5 (Instituto Geofísico do Peru).  | 79 |
| Figura 5.2 - Distâncias características em um terremoto.  | 80 |
| Figura 5.3: Procedimento geral para a determinação do perigo sísmico por um método determinístico   | 81 |
| Figura 5.4 – Acelerograma do sismo de Lima, Peru, em 1974.  | 83 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.5 – Acelerograma do sismo de Moquegua, Peru, em 2001.   | 83 |
| Figura 5.6 – Localização da barragem de Viña Blanca, ao sul do Peru, no departamento de Moquegua.  | 85 |
| Figura 5.7 – Seção atual da barragem de Viña Blanca.   | 85 |
| Figura 5.8– Alteamento com muro de gabião.   | 86 |
| Figura 5.9 – Alteamento com solo reforçado e revestimento com painéis de concreto.   | 87 |
| Figura 5.10 – Alteamento com solo reforçado sem revestimento.  | 87 |
| Figura 5.11 – Proposta de alteamento máximo com muro de gabião.  | 88 |
| Figura 5.12 – Malha de elementos finitos da seção atual da barragem de Viña Blanca.  | 90 |
| Figura 5.13 – Malha de elementos finitos do alteamento com muro de gabião.   | 91 |
| Figura 5.14 – Detalhe da malha de elementos finitos para alteamento com muro de gabião.  | 91 |
| Figura 5.15 – Malha de elementos finitos do alteamento com muro de solo rforçado com revestimento de concreto.                                   | 91 |
| Figura 5.16– Detalhe da malha de elementos finitos do alteamento com muro de solo reforçado com revestimento de concreto.                        | 91 |
| Figura 5.17 – Malha de elementos finitos do alteamento com solo reforçado com geotêxteis, sem revestimento.                                      | 92 |
| Figura 5.18 - Detalhe da malha de elementos finitos do alteamento com solo reforçado com geotêxteis, sem revestimento.                           | 92 |
| Figura 5.19– Malha de elementos finitos do máximo alteamento previsto com muro de gabião.  | 92 |
| Figura 5.20 – Detalhe da malha de elementos finitos do máximo alteamento previsto com muro de gabião.  | 92 |
| Figura 5.21 – Funções de permeabilidade empregadas no exemplo de validação.  | 93 |
| Figura 5.22 – Rede de fluxo através de barragem de terra zonada (Lambe e Whitman, 1975).   | 94 |
| Figura 5.23 – Resultados numéricos obtidos com o programa Seep/W.  | 94 |
| Figura 5.24 – Malha de elementos finitos utilizada para obtenção dos resultados numéricos de fluxo pela barragem zonada do exemplo de validação. | 94 |
| Figura 5.25 – Funções de condutividade hidráulica para os materiais da barragem de Viña Blanca.  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.26 – Distribuição de poropressões e posição da linha freática na seção atual e nas opções de alteamento da barragem de Viña Blanca. Valores de vazão no eixo central.  | 98  |
| Figura 5.27 – Distribuição das cargas totais na seção atual e nas opções de alteamento da barragem de Viña Blanca.  | 99  |
| Figura 5.28 – Comparação dos valores de vazão e gradiente hidráulico de saída. A numeração do tipo de alteamento se refere à tabela 5.12.   | 100 |
| Figura 5.29 – Superfície potencial de ruptura considerando a seção atual, alteamento com muro de gabião e solo reforçado com revestimento de concreto determinada pelo método de Morgenst-Price (Slope/W)                   | 106 |
| Figura 5.30 – Superfície potencial de ruptura considerando o alteamento de solo reforçado sem revestimento e alteamento máximo de gabião determinada pelo método de Morgenst-Price (Slope/W).                               | 107 |
| Figura 5.31 – Fatores de segurança na análise estática de estabilidade para alteamento com muro de gabião (MacStars 2000).  | 108 |
| Figura 5.32 – Fatores de segurança na análise estática de estabilidade para alteamento de solo reforçado com revestimento de concreto (MacStars 2000).  | 108 |
| Figura 5.33 – Fatores de segurança na análise estática de estabilidade para alteamento de solo reforçado sem revestimento (MacStars 2000).  | 109 |
| Figura 5.34 – Fatores de segurança na análise estática de estabilidade para alteamento máximo com muro de gabião (MacStars 2000).   | 110 |
| Figura 5.35 – Superfície potencial de ruptura considerando o alteamento de solo reforçado sem revestimento e solo reforçado com revestimento determinada pelo método de Morgenst-Price (Slope/W).                           | 111 |
| Figura 5.36 – Superfície potencial de ruptura considerando a seção atual, alteamento com muro de gabião e solo reforçado com revestimento de concreto na análise pseudo-estática pelo método de Morgenstern-Price (Slope/W) | 115 |
| Figura 5.37 – Superfície potencial de ruptura considerando o alteamento com solo reforçado sem revestimento e alteamento máximo de gabião na análise pseudo-estática pelo método de Morgenstern-Price (Slope/W).            | 116 |
| Figura 5.38 – Análise de estabilidade pseudo-estática do alteamento com muro de gabião. Método de Bishop Modificado para determinação dos fatores de segurança global (FSg) e interno (FSi) - MacStars 2000.                | 117 |
| Figura 5.39 – Análise de estabilidade pseudo-estática do alteamento com muro de   |     |

|   |     |
|---|-----|
| solo reforçado e revestimento de concreto. Método de Bishop Modificado para determinação dos fatores de segurança global (FSg) e interno (FSi) - MacStars 2000.   | 118 |
| Figura 5.40 – Análise de estabilidade pseudo-estática do alteamento com muro de solo reforçado sem revestimento. Método de Bishop Modificado para determinação dos fatores de segurança global (FSg) e interno (FSi) - MacStars 2000.                     | 119 |
| Figura 5.41 – Análise de estabilidade pseudo-estática do alteamento máximo com muro de gabião. Método de Bishop Modificado para determinação dos fatores de segurança global (FSg) e interno (FSi) - MacStars 2000.                                       | 120 |
| Figura 5.42 - Análise de estabilidade pseudo-estática do alteamento com muro de solo reforçado sem revestimento e solo reforçado com revestimento determinada pelo método de Morgenst-Price (Slope/W).  | 121 |
| Figura 5.43 - Função de redução do módulo de cisalhamento G.  | 123 |
| Figura 5.44 - Função da redução da razão de amortecimento $\xi$ .   | 124 |
| Figura 5.45 – Variação do coeficiente de segurança durante o terremoto de Lima (1974) para a seção atual da barragem (gráfico superior), alteamento com muro de gabião e alteamento com solo reforçado e revestimento de concreto (gráfico inferior).     | 125 |
| Figura 5.46 – Variação do coeficiente de segurança durante o terremoto de Lima (1974) para a seção com alteamento de solo reforçado sem revestimento (gráfico superior) e alteamento máximo com gabiões (gráfico inferior).                               | 126 |
| Figura 5.47 – Variação do coeficiente de segurança durante o terremoto de Moquegua (2001) para a seção atual da barragem (gráfico superior), alteamento com muro de gabião e alteamento com solo reforçado e revestimento de concreto (gráfico inferior). | 127 |
| Figura 5.48 – Variação do coeficiente de segurança durante o terremoto de Moquegua (2001) para a seção com alteamento de solo reforçado sem revestimento (gráfico superior) e alteamento máximo com gabiões (gráfico inferior).                           | 128 |
| Figura 5.49 – Análise de estabilidade pós-sismo (Lima, 1974) por equilíbrio limite (método de Morgenstern-Price) da seção atual, alteamento com muro de gabião e alteamento com solo reforçado com revestimento   | 130 |
| Figura 5.50 – Análise de estabilidade pós-sismo (Lima, 1974) por equilíbrio limite  |     |

|  |     |
|--|-----|
| (metodo de Morgenstern-Price ) do alteamento de solo reforçado sem revestimento e alteamento máximo com muro de gabião.  | 131 |
| Figura 5.51 – Análise de estabilidade pós-sismo (Moquegua, 2001) por equilíbrio limite (metodo de Morgenstern-Price) da seção atual, alteamento com muro de gabião e alteamento com solo reforçado com revestimento. | 132 |
| Figura 5.52 – Análise de estabilidade pós-sismo (Moquegua, 2001) por equilíbrio limite (método de Morgenstern-Price) do alteamento de solo reforçado sem revestimento e alteamento máximo com muro de gabião.        | 133 |
| Figura 5.53 - Barragem e fundação em vale retangular (de Dakoulas, 1990).  | 135 |
| Figura 5.54 - 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 (Dakoulas, 1990).  | 136 |
| Figura 5.55 – Distribuição de tensões efetivas horizontais ( $\bar{\sigma}_x$ ), devido ao carregamento estático, na seção atual e alteamentos da barragem de Viña Blanca  | 138 |
| Figura 5.56 – Distribuição de tensões efetivas verticias ( $\bar{\sigma}_y$ ), devido ao carregamento estático, na seção atual e alteamentos da barragem de Viña Blanca.   | 139 |
| Figura 5.57 – Distribuição de tensões cisalhantes ( $\tau_{xy}$ ), devido ao carregamento estático, na seção atual e alteamentos da barragem de Viña Blanca.   | 140 |
| Figura 5.58 – Registros das acelerações na base rochosa (gráfico superior) e na crista da seção atual da barragem de Viña Blanca (gráfico inferior) – sismo de Lima (1974).  | 142 |
| Figura 5.59 – Registros das acelerações na base rochosa (gráfico superior) e na crista da seção atual da barragem de Viña Blanca (gráfico inferior) – sismo de Moquegua (2001).                                      | 143 |
| Figura 5.60 - Distribuição de tensões efetivas horizontais ( $\bar{\sigma}_x$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Lima (1974), no tempo 19,80s.   | 144 |
| Figura 5.61 - Distribuição das tensões efetivas verticais ( $\bar{\sigma}_y$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Lima (1974), no tempo 19,80s.  | 145 |
| Figura 5.62 - Distribuição das tensões cisalhantes ( $\tau_{xy}$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Lima (1974), no tempo 19,80s.  | 146 |
| Figura 5.63 - Distribuição das deformações cisalhantes máximas ( $\gamma_{max}$ ) na seção   |     |

atual e alteamentos geradas pelo sismo de Lima (1974), no tempo 19,80s. 147

Figura 5.64 - Distribuição das tensões efetivas horizontais ( $\bar{\sigma}_x$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Moquegua (2001) no tempo 48,80s. 148

Figura 5.65 - Distribuição das tensões efetivas verticais ( $\bar{\sigma}_y$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Moquegua (2001), no tempo 48,80s. 149

Figura 5.66 - Distribuição das tensões cisalhantes ( $\tau_{xy}$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Moquegua (2001), no tempo 48,80s. 150

Figura 5.67 - Distribuição das deformações cisalhantes máximas ( $\gamma_{max}$ ) na seção atual e alteamentos geradas pelo sismo de Moquegua (2001), no tempo 48,80s.151

## Lista de tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Altura da onda HV (ft) em função da máxima velocidade do vento V (km/h) e dimensão do espelho de água (km) - American Society of Civil Engineers. | 39  |
| Tabela 4.1 - Características dos métodos das fatias não rigorosos (de Campos, 1985).   | 66  |
| Tabela 4.2 - Características dos métodos das fatias rigorosos (de Campos, 1985)  | 66  |
| Tabela 4.3 – Valores típicos do coeficiente sísmico kh.  | 73  |
| Tabela 5.1 – Acelerações horizontais máximas do substrato rochoso no sismo de projeto, obtidas por estudo determinístico (Aguilar, 2004).                      | 82  |
| Tabela 5.2 – Acelerações horizontais máximas do substrato rochoso obtidas no estudo probabilístico (Aguilar, 2004).  | 82  |
| Tabela 5.3 – Características da geometria atual da barragem de Viña Blanca.  | 85  |
| Tabela 5.4 – Características geométricas gerais da seção projetada da barragem de Viña Blanca com alteamento de 3 m do nível de água do reservatório.          | 86  |
| Tabela 5.5 – Características geométricas da seção com muro de gabião.  | 87  |
| Tabela 5.6 – Características geométricas da seção com muro de solo reforçado e revestimento de concreto.   | 87  |
| Tabela 5.7 – Características geométricas da seção com muro de solo reforçado.  | 88  |
| Tabela 5.8 – Características geométricas da seção de alteamento máximo com muro de gabião.   | 88  |
| Tabela 5.9 – Tamanho máximo do elemento finito considerando a geometria atual da barragem de Viña Blanca.  | 90  |
| Tabela 5.10 – Número de elementos finitos e pontos nodais nas malhas das seções alteadas.  | 90  |
| Tabela 5.11 – Coeficientes de permeabilidade saturados.  | 95  |
| Tabela 5.12 – Resumo da análise numérica de fluxo permanente na barragem de Viña Blanca (seção atual e opções de alteamento).                                  | 97  |
| Tabela 5.13 – Propriedades dos materiais da barragem de Viña Blanca.   | 101 |
| Tabela 5.14 – Parâmetros de resistência dos materiais da barragem de Viña Blanca.  | 102 |
| Tabela 5.15 – Parâmetros de resistência dos materiais de alteamento.   | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 5.16 – Fatores de segurança mínimos para taludes de barragens de terra (US Army Corps of Engineers).  | 103 |
| Tabela 5.17 – Fatores de segurança globais (Slope/W).  | 103 |
| Tabela 5.18 – Fatores de segurança considerando reforços no alteamento, calculados pelo programa MacStars 2000.  | 104 |
| Tabela 5.19 – Análise de estabilidade global considerando só solos reforçados com geotesteis no alteamento, calculados pelo programa Slope/W.                            | 104 |
| Tabela 5.20 – Fatores de segurança globais na análise pseudo-estática  | 113 |
| Tabela 5.21 – Fatores de segurança na análise pseudo-estática considerando reforços no alteamento, calculados pelo programa MacStars 2000.                               | 113 |
| Tabela 5.22 – Análise de estabilidade global considerando só solos reforçados com geotesteis no alteamento, calculados pelo programa Slope/W no análise pseudo-estático. | 113 |
| Tabela 5.23 – Limites de variação do fator de segurança da barragem de Viña Blanca durante os sismos de Lima (1974) e de Moquegua (2001).                                | 124 |
| Tabela 5.24 – Parâmetros de resistência pós-sismo dos materiais da barragem de Viña Blanca (redução de 25%).   | 129 |
| Tabela 5.25 – Valores do coeficiente de segurança pós-sismo, poropressões geradas pelo terremoto de Lima (1974).   | 129 |
| Tabela 5.26 – Valores do coeficiente de segurança pós-sismo, poropressões geradas pelo terremoto de Moquegua (2001).   | 129 |
| Tabela 5.27 – Valores máximos nodais de aceleração, velocidade e deslocamento calculados na crista da barragem.  | 141 |

## Lista de Símbolos

|               |   |
|---------------|---|
| $B$           | Largura da crista   |
| $H$           | Altura da barragem  |
| $H_{bl}$      | Borda livre da barragem   |
| $H_v$         | Amplitude da onda gerada pelo vento                                 |
| $H_r$         | Altura da ondulação sobre o talude de montante                      |
| $\Delta H$    | Recalque máximo da crista   |
| $H_s$         | Margem de segurança   |
| $F$           | Distância da cortina da água  |
| $V$           | Velocidade do vento   |
| $E_a$         | Empuxo ativo  |
| $K_a$         | Coefficiente de empuxo ativo  |
| $\delta$      | Ângulo de atrito entre o muro de gabiões e solo do aterro           |
| $\beta$       | Ângulo entre a horizontal e a superfície interna do muro em gabiões |
| $\varepsilon$ | Ângulo do talude sobre o muro com a horizontal                      |
| $\gamma_s$    | Peso unitário do solo   |
| $a$           | Largura do muro no topo   |
| $q$           | Sobrecarga  |
| $F_{en}$      | Força estabilizante normal  |
| $d$           | Altura do ponto de aplicação do empuxo                              |
| $FS_{sl}$     | Fator de segurança contra o deslizamento                            |
| $F_{ch}$      | Força estabilizante horizontal                                      |
| $F_d$         | Força desestabilizante  |
| $E_v$         | Componente vertical do empuxo ativo                                 |
| $E_h$         | Componente horizontal do empuxo ativo                               |
| $\alpha$      | Inclinação do muro  |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\gamma_g$           | Peso unitário do gabião                               |
| $n_r$                | Porosidade do enrocamento                             |
| $G_s$                | Gravidade específica da rocha                         |
| $\gamma_w$           | Peso unitário da água                                 |
| $\gamma_p$           | Peso unitário da pedra                                |
| $x_g, y_g$           | Coordenadas do centro de gravidade do muro em gabiões |
| $M_r$                | Momento resistente                                    |
| $M_v$                | Momento favorável ao tombamento                       |
| $\sigma_1, \sigma_2$ | Tensões principais                                    |
| $N$                  | Resultante das forças normais                         |
| $e$                  | Excentricidade  |
| $\phi^*$             | Ângulo de atrito interno do gabião                    |
| $\bar{\sigma}_x$     | Tensão efetiva na direção do eixo $x$                 |
| $\bar{\sigma}_y$     | Tensão efetiva na direção do eixo $y$                 |
| $\bar{\sigma}_z$     | Tensão efetiva na direção do eixo $z$                 |
| $\bar{\sigma}_{max}$ | Tensão máxima efetiva                                 |
| $\bar{\sigma}_{min}$ | Tensão mínima efetiva                                 |
| $\sigma_{adm}$       | Tensão admissível                                     |
| $\tau_{xy}$          | Tensão cisalhante no plano $xy$                       |
| $\tau_{max}$         | Tensão cisalhante máxima                              |
| $\tau_{adm}$         | Tensão cisalhante admissível                          |
| $P_u$                | Peso unitário da malha por volume de gabião           |
| $C_g$                | Coesão equivalente do gabião                          |
| $FS$                 | Fator de segurança                                    |
| $FS_{rb}$            | Fator de segurança ao tombamento                      |

|              |  |
|--------------|--|
| $FS_a$       | Fator de segurança ao arrancamento                                 |
| $FS_{sl}$    | Fator de segurança ao deslizamento                                 |
| $FS_{cp}$    | Fator de segurança por capacidade de carga                         |
| $FS_i$       | Fator de segurança interna   |
| $FS_g$       | Fator de segurança geral   |
| $W$          | Peso da massa do solo  |
| $T$          | Força de ancoragem do reforço                                      |
| $M_D$        | Momento deslizante   |
| $M_R$        | Momento resistente do solo   |
| $\Delta M_R$ | Momento resistente dos geotêxteis                                  |
| $v$          | Velocidade de Darcy  |
| $i$          | Gradiente hidráulico   |
| $k$          | Coefficiente de permeabilidade                                     |
| $H$          | Carga total  |
| $k_z, k_y$   | Coefficiente de permeabilidade na direção z e y                    |
| $Q$          | Fluxo de contorno (vazão)  |
| $t$          | Tempo  |
| $s$          | Resistência ao cisalhamento  |
| $\tau$       | Tensão cisalhante induzida sobre a superfície potencial de ruptura |
| $c, \phi$    | Parâmetros de resistência em termos de tensões totais              |
| $c', \phi'$  | Parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas            |
| $W$          | Peso da massa do solo  |
| $W_i$        | Peso da fatia de solo i  |
| $k_h$        | Coefficiente sísmico horizontal                                    |
| $N$          | Força normal à base da fatia                                       |
| $S$          | Força tangente à base da fatia                                     |

|              |  |
|--------------|--|
| $A_1, A_2$   | Forças hidrostáticas   |
| $b$          | Largura da fatia   |
| $T_1, T_2$   | Forças cisalhantes verticais entre fatias  |
| $E_1, E_2$   | Forças horizontais entre fatias  |
| $D$          | Sobrecarga aplicada na superfície do talude  |
| $l$          | Comprimento da base da fatia   |
| $\sigma_n$   | Tensão normal média na base da fatia   |
| $\mu_a$      | Poropressão de ar  |
| $\mu_w$      | Poropressão de água  |
| $f_o$        | Fator de correção  |
| $\mu$        | Poropressão médio na base da fatia   |
| $\tan\phi^b$ | Parâmetro do material que reflete a variação na resistência devido à variações na sucção mátrica |
| $S_m$        | Parcela mobilizada da resistência ao cisalhamento  |
| MEF          | Método dos elementos finitos   |
| $g$          | Aceleração da gravidade  |
| $e_v$        | Espaçamento vertical entre camadas de reforço  |
| $L$          | Comprimento total do reforço   |
| $L_a$        | Comprimento do reforço na região ativa   |
| $L_r$        | Comprimento do reforço na região passiva   |
| $M_s$        | Magnitude do sismo   |
| $a_{max}$    | Aceleração máxima do sismo   |
| $a_{max cr}$ | Aceleração máxima do sismo na crista   |
| $V_{saída}$  | Velocidade de saída do fluxo   |
| $i_{saída}$  | Gradiente hidráulico de saída  |
| $V_s$        | Velocidade de onda cisalhante  |

|            |   |
|------------|---|
| $Z$        | Profundidade  |
| $a_x, a_y$ | Acelerações nodais nas direções x e y na crista da barragem   |
| $V_x, V_y$ | Velocidades nodais nas direções x e y na crista da barragem   |
| $D_x, D_y$ | Deslocamentos nodais nas direções x e y na crista da barragem |